

LIVRE DU PROFESSEUR

Nouveau programme

SVT Tle

Enseignement
de spécialité



Belin:
ÉDUCATION

SOMMAIRE

Chapitre 1

Choix pédagogiques 2
Éléments de correction des tâches complexes 11
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 17
Éléments de correction des exercices 23

Chapitre 2

Choix pédagogiques 30
Éléments de correction des tâches complexes 35
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 40
Éléments de correction des exercices 44

Chapitre 3

Choix pédagogiques 48
Éléments de correction des tâches complexes 53
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 57
Éléments de correction des exercices 62

Chapitre 4

Choix pédagogiques 67
Éléments de correction des tâches complexes 72
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 75
Éléments de correction des exercices 78

Chapitre 5

Choix pédagogiques 80
Éléments de correction des tâches complexes 84
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 88
Éléments de correction des exercices 92

Chapitre 6

Choix pédagogiques 95
Éléments de correction des tâches complexes 100
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 104
Éléments de correction des exercices 108

Chapitre 7

Choix pédagogiques 113
Éléments de correction des tâches complexes 125
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 133
Éléments de correction des exercices 144

Chapitre 8

Choix pédagogiques 150
Éléments de correction des tâches complexes 159
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 164
Éléments de correction des exercices 168

Chapitre 9

Choix pédagogiques 173
Éléments de correction des tâches complexes 180
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 185
Éléments de correction des exercices 189

Chapitre 10

Choix pédagogiques 193
Éléments de correction des tâches complexes 202
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 207
Éléments de correction des exercices 211

Chapitre 11

Choix pédagogiques 214
Éléments de correction des tâches complexes 225
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 229
Éléments de correction des exercices 232

Chapitre 12

Choix pédagogiques 235
Éléments de correction des tâches complexes 248
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 257
Éléments de correction des exercices 265

Chapitre 13

Choix pédagogiques 269
Éléments de correction des tâches complexes 282
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 285
Éléments de correction des exercices 290

Chapitre 14

Choix pédagogiques 295
Éléments de correction des tâches complexes 306
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 311
Éléments de correction des exercices 322

Chapitre 15

Choix pédagogiques 324
Éléments de correction des tâches complexes 331
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 336
Éléments de correction des exercices 340

Chapitre 16

Choix pédagogiques 344
Éléments de correction des tâches complexes 348
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 353
Éléments de correction des exercices 354

Chapitre 17

Choix pédagogiques 358
Éléments de correction des tâches complexes 390
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 400
Éléments de correction des exercices 412

Chapitre 18

Choix pédagogiques 419
Éléments de correction des tâches complexes 423
Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 423
Éléments de correction des exercices 446

Chapitre 19

Choix pédagogiques 456

Éléments de correction des tâches complexes 471

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 481

Éléments de correction des exercices 488

Exercices Bac de fin de thème

Génétique et évolution 519

À la recherche du passé géologique de notre planète 523

De la plante sauvage à la plante domestiquée 529

Les climats de la Terre 534

Corps humain et santé 540

Chapitre 20

Choix pédagogiques 497

Éléments de correction des tâches complexes 505

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas » 511

Éléments de correction des exercices 513

Chapitre 1. L'origine du génotype des individus

Il s'agit dans ce chapitre, de comprendre comment la reproduction sexuée participe à la diversification des génomes et contribue ainsi à la diversité du vivant. Les bases de la génétique sont réinvesties et approfondies. L'élève est ainsi amené à comprendre comment, associées aux techniques de séquençage et aux progrès de la bioinformatique, elles permettent d'accéder à la connaissance du génome d'un individu.

Thème 1 La Terre, la vie et l'organisation du vivant Génétique et évolution	
Connaissances	Capacités, attitudes
<p>La conservation des génomes : stabilité génétique et évolution clonale</p> <p>En enseignement de spécialité de la classe de première, les élèves ont appris que la succession de mitoses produit un clone, c'est-à-dire un ensemble de cellules, toutes génétiquement identiques, aux mutations près. Ces clones sont constitués de cellules séparées (cas des nombreuses bactéries ou de nos cellules sanguines) ou associées de façon stable (cas des tissus solides). > Unité 1</p> <p>En l'absence d'échanges génétiques avec l'extérieur, la diversité génétique dans un clone résulte de l'accumulation de mutations successives dans les différentes cellules. Tout accident génétique irréversible (perte de gène par exemple) devient pérenne pour toute la lignée (sous-clone) qui dérive du mutant. > Unité 2</p> <p>Le brassage des génomes à chaque génération : la reproduction sexuée des eucaryotes</p> <p>La fécondation entre gamètes haploïdes rassemble, dans une même cellule diploïde, deux génomes d'origine indépendante apportant chacun un lot d'allèles. Chaque paire d'allèles résultant est constituée de deux allèles identiques (homozygotie) ou de deux allèles différents (hétérozygotie).</p> <p>En fin de méiose, chaque cellule produite reçoit un seul des deux allèles de chaque paire avec une probabilité équivalente. Pour deux paires d'allèles, quatre combinaisons d'allèles sont possibles, équiprobables ou non en cas de gènes liés.</p> <p>Le nombre de combinaisons génétiques possibles dans les gamètes est d'autant plus élevé que le nombre de gènes à l'état hétérozygote est plus grand chez les parents. > Unité 4</p>	<p>Comprendre la notion de clone à partir de divers exemples tirés de l'agriculture ou du domaine de la santé (cellules cancéreuses, lymphocytes B producteurs d'un seul anticorps, clones bactériens). > Unité 1</p> <p>En fonction du nombre de cellules de l'organisme humain, estimer le nombre théorique de mutations (connaissant le nombre moyen de mutations à chaque division cellulaire) qui surviennent dans l'organisme humain, lors de son développement. > Unité 2</p> <p>Extraire et organiser des informations sur les mutations et leurs effets phénotypiques, notamment sur un site régulateur de l'expression d'un gène. > Unité 2</p> <p>Comprendre les relations de dominance / récessivité en fonction de l'équipement chromosomique chez les diploïdes (par exemple sur le système ABO, et/ou les gènes de la globine). > Unité 4</p> <p>Schématiser les conséquences de la méiose pour deux paires d'allèles portés par deux chromosomes différents ou par un même chromosome. > Unité 4</p> <p>Interpréter des résultats de croisements avec transmission de deux paires d'allèles (liés ou non entre eux), portés ou pas par les chromosomes sexuels. > Unité 4</p>

<p>Comprendre les résultats de la reproduction sexuée : principes de base de la génétique</p> <p>L'analyse génétique peut se fonder sur l'étude de la transmission héréditaire des caractères observables (phénotype) dans des croisements issus le plus souvent de lignées pures (homozygotes) et ne différant que par un nombre limité de caractères. > Unité 3</p> <p>Dans le cas de l'espèce humaine, l'identification des allèles portés par un individu s'appuie d'abord sur une étude au sein de la famille, en appliquant les principes de transmission héréditaire des caractères. > Unité 5</p> <p>Le développement des techniques de séquençage de l'ADN et les progrès de la bioinformatique donnent directement accès au génotype de chaque individu comme à ceux de ces descendants et descendants. L'utilisation de bases de données informatisées permet d'identifier des associations entre certains gènes mutés et certains phénotypes. > Unité 5</p> <p>Les accidents génétiques de la méiose</p> <p>Des anomalies peuvent survenir au cours de la méiose : crossing-over inégal ; migrations anormales de chromatides au cours des divisions de méiose... Ces accidents, souvent létaux, engendrent parfois une diversification importante des génomes et jouent un rôle essentiel dans l'évolution biologique (familles multigéniques, barrières entre populations...). > Unité 6</p>	<p>Extraire et organiser des informations sur l'élaboration des lois de Mendel. > Unité 3</p> <p>Recenser et comparer des séquences d'ADN sur des trios père / mère / enfant permettant d'analyser la présence de mutations nouvelles. > Unité 5</p> <p>Recenser des informations sur les nombreux mutants du gène de la mucoviscidose et les analyses prédictives qui peuvent être conduites. > Unité 5</p> <p>Schématiser les mécanismes expliquant certaines anomalies chromosomiques après méiose et fécondation. > Unité 6</p>
--	---

Compétences travaillées et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
<p>Pratiquer des démarches scientifiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Formuler et résoudre une question ou un problème scientifique • Observer, questionner, formuler une hypothèse, en déduire ses conséquences testables ou vérifiables, expérimenter, raisonner avec rigueur, modéliser • Justifier et expliquer une théorie, un raisonnement, une démonstration • Interpréter des résultats et en tirer des conclusions • Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique • Savoir disséquer la complexité apparente des phénomènes observables en éléments et des principes fondamentaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 2 à 4 Exercices 4 et 5 • Unité 4 Exercices 5 et 7 • Unités 3 et 4 Exercices 5, 6 et 7 • Unités 4 et 5 Exercices 2 et 3 • Unité 2 • Unité 3 Exercice 7
<p>Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifier et choisir les outils et les techniques pour garder trace de ses recherches (à l'oral et à l'écrit) • Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 6 • Unités 1 à 6 Exercices 6, 7, 8 et 9
<p>Pratiquer des langages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 6 Exercices 1 à 9

Choix pédagogiques

Dans ce chapitre, les unités ont été construites en respectant globalement l'ordre proposé par le programme. Ainsi, l'**unité 1** permet d'aborder la notion de clone cellulaire et d'établir le lien entre l'unicité du génome des cellules du clone et les fonctions que celui-ci assure au sein de l'organisme. L'**unité 2** traite des modifications génétiques qui peuvent survenir au sein d'un clone et de leurs conséquences possibles sur le phénotype à différentes échelles. L'**unité 3** est une introduction à la génétique à partir des travaux de Mendel. L'**unité 4** aborde les phénomènes de brassages génétiques liés à la reproduction sexuée (méiose et fécondation). L'**unité 5**, en se basant notamment sur l'exemple de la mucoviscidose, permet d'aborder les modes de transmission des caractères héréditaires chez l'humain ainsi que les apports des analyses génétiques dans la connaissance du génome d'un individu. L'**unité 6** développe des exemples d'accidents génétiques pouvant avoir lieu au cours de la méiose et leurs rôles dans l'évolution biologique.

Unité 1

> En enseignement de spécialité SVT de première, les élèves ont appris que la succession de mitoses est à l'origine d'un ensemble de cellules génétiquement identiques (à l'exception des mutations) appelé clone. Ici, il s'agit de relier la particularité génétique de ce groupe de cellules et les fonctions assurées par les clones cellulaires.

Les **documents 1, 2 et 3** portent sur l'exemple très courant de clonage en agronomie : le bouturage.

> Le **document 1** montre 5 boîtes de Petri à l'intérieur desquelles on retrouve différentes étapes de croissance d'un cal. La nature *in vitro* de cette technique est mise en évidence. Par ailleurs, la première boîte en haut à gauche de l'image, illustre la notion de cal, amas de cellules indifférenciées. Puis, la succession des boîtes permet d'observer la formation des plants génétiquement identiques (clones) à partir de la multiplication de ces cellules initiales.

> Le **document 2** est constitué de schémas détaillant la technique de bouturage à partir de l'exemple de la pomme de terre. Le caryotype de la pomme de terre, dont sont issues les cellules utilisées pour le clonage, et le caryotype des plants de pomme de terre, obtenus à l'issue de l'expérience, ont été ajoutés afin de montrer leur similitude génétique à l'échelle du caryotype.

> Le **document 3**, montre par l'analyse génétique de différents plants de pomme de terre issus de bouturage que leur similitude génétique est vérifiable également à l'échelle des séquences nucléotidiques de l'ADN. La technique utilisée est celle de l'ISSR-PCR qui se base sur l'analyse de séquences situées entre des séquences répétées au sein du génome (microsatellites ou SSR). La similitude des bandes obtenues par l'électrophorèse des ISSR des trois clones entre eux et avec la plante mère montre que ces quatre plants ont des profils génétiques identiques. Ces clones cellulaires sont donc la base de ce type de reproduction asexuée chez les végétaux, permettant la conservation des caractéristiques phénotypiques du plant initial.

> Le **document 4** développe l'exemple des clones de plasmocytes, cellules qui ont été étudiées par les élèves en classe de première. Chez la souris comme chez l'humain, ces cellules sont issues de l'amplification clonale de lymphocytes B activés par la rencontre avec l'antigène dont ils sont spécifiques. Un clone de plasmocytes est constitué de cellules capables de fabriquer, toutes, le même anticorps spécifique du même antigène.

Pour appuyer le fait que chaque clone de plasmocytes est bien spécifique du lymphocyte dont il est issu, une partie de la séquence du gène *VH* codant pour la chaîne lourde des IgG a été représentée. On peut observer que les séquences sont différentes entre les deux clones comparés.

Ainsi, la production d'un clone de plasmocytes permet la synthèse de grandes quantités d'anticorps spécifiques de l'antigène, fonction importante dans le cadre de l'immunité adaptative.

> Le **document 5** présente le rôle des clones dans le renouvellement cellulaire des tissus en prenant ici l'exemple des cellules de l'épithélium intestinal.

Unité 2

> Après avoir rappelé le principe global de la conservation du patrimoine génétique au sein d'un clone cellulaire, il s'agit dans cette unité de traiter des modifications génétiques qui peuvent survenir au cours de la multiplication cellulaire et de montrer que ces modifications, lorsqu'elles se transmettent, peuvent impacter la diversité phénotypique à l'échelle de l'individu et de la population.

> Le **document 1** présente l'exemple d'un clone de cellules tumorales au sein de l'œsophage. L'étude de la séquence du gène *p53* montre l'existence d'une mutation (en position 833, voir fichier «.edi» dans le manuel numérique). L'exemple du gène *p53* a été choisi notamment parce qu'il permet de remobiliser les acquis de l'enseignement de spécialité de première. Ainsi, il est indiqué dans le texte que le gène *p53* code une protéine dont la fonction est d'empêcher la multiplication des cellules dont l'ADN est endommagé. Ici, le caryotype d'une cellule du clone tumoral, dont la fluorescence des chromosomes 2 et 3 est obtenue par la technique FISH, montre un réarrangement de ces chromosomes.

> Le **document 2** est une modélisation de l'hétérogénéité des cellules d'une tumeur. En effet, l'image montre de nombreux amas de couleurs différentes et ainsi une forte diversité génétique des cellules au sein d'une tumeur.

> Les données d'observation des **documents 1 et 2** mises en relation avec les informations du **document 3** permettent de comprendre que lorsqu'une mutation survient au sein d'un gène codant une protéine impliquée dans la régulation de la prolifération cellulaire, le clone de cellules qui en découle possède un avantage sélectif par rapport aux cellules non mutées et va ainsi pouvoir se multiplier plus rapidement. Chaque cellule de ce clone continue de se multiplier même si elle accumule les modifications génétiques, entraînant le développement de la tumeur.

> Le **document 4** présente une des conséquences possibles d'un remaniement chromosomal au sein d'un lymphocyte B. Le choix de cet exemple permet une mise en relation avec le **doc 4 de l'unité 1** (clones de plasmocytes). Ce remaniement chromosomal, en plaçant le gène *Bcl-2* à proximité d'une séquence favorisant l'expression des gènes, va permettre la survie et la multiplication des cellules, même si elles accumulent des anomalies génétiques. Ainsi, au lieu d'avoir la multiplication clonale d'un lymphocyte B en réponse à son activation par l'antigène dont il est spécifique, le lymphocyte B va se multiplier sans avoir besoin d'être activé et de façon incontrôlée. Se forme alors un clone tumoral.

> Le **document 5** traite de l'exemple d'une mutation responsable de la modification de la couleur du pelage chez le chat (voir ressources complémentaires). En effet, au début des années 2000, des chats présentant un pelage de couleur ambre sont apparus au sein de la race de chat Norvégien. Cette couleur étant jusqu'alors inconnue au sein de cette race, des travaux de génétique ont été menés et ont permis de démontrer qu'il s'agissait d'une mutation germinale et non d'une hybridation avec une autre race de chat. Ces travaux ont abouti à l'inscription au livre des origines de cette couleur de pelage et ainsi à la possibilité pour les éleveurs d'utiliser ces chats pour la reproduction. Ce cas illustre là une

autre conséquence d'une mutation au sein d'un clone cellulaire, sans effet pathologique, ainsi que l'intérêt pratique que peut avoir la connaissance de l'origine des innovations génétiques.

> Le **document 6** permet d'estimer le nombre de mutations au sein d'une cellule germinale (spermatozoïde) chez l'humain. Pour cela, il faut choisir un âge de l'individu (par exemple 25 ans) et appliquer la formule proposée afin de connaître tout d'abord le nombre de divisions cellulaires nécessaires pour produire le spermatozoïde. Une fois le nombre de divisions nécessaires connu, il faut le multiplier par 1 qui est le nombre estimé de mutation par division cellulaire.

> Le **document 7** illustre chez le chat les conséquences possibles d'une mutation au cours du développement embryonnaire soit au sein d'un clone de cellules somatiques soit au sein d'un clone de cellules germinales. La notion de transmission de la mutation à la descendance (mutation germinale) ou non (mutation somatique) est ainsi étudiée.

Remarque : les variations de couleurs du pelage chez le chat peuvent également être dues à d'autres mécanismes génétiques non développés ici, tels que l'X-inactivation.

Unité 3

> Il s'agit dans cette unité d'introduire les principes de la génétique en partant notamment des travaux de Gregor Mendel.

> Le **document 1** permet de situer l'état des connaissances sur la transmission des caractères à l'époque où Mendel entreprend ses travaux de recherche ainsi que les caractéristiques du pois qui lui ont fait choisir cette plante comme modèle d'étude.

> Le **document 2** est composé de deux images de la fleur de pois et permet d'illustrer certaines des caractéristiques énoncées dans le **doc 1**.

> Le **document 3** présente la technique de fécondation croisée artificielle, utilisée notamment par Mendel pour étudier la transmission des caractères. De plus, ce document présente des définitions clés ainsi que des conventions d'écriture indispensables en génétique.

> Le **document 4** est une représentation schématique d'une expérience de Mendel. Celle-ci consiste à étudier le résultat du croisement d'un plant de pois lisses de lignée pure (P1) par un plant de pois ridés de lignée pure (P2). L'obtention en F1 de 100% de pois lisses permet d'aborder la notion de dominance (lisse) et de récessivité (ridé). L'autofécondation de F1 donne, en F2, 1850 pois ridés et 5474 pois lisses. On voit ici réapparaître le caractère « ridé » avec une proportion proche de $\frac{1}{4}$ alors que le caractère « lisse » représente environ $\frac{3}{4}$ des graines en F2. Ces résultats sont à rapprocher à la fois des informations du **doc 5** et du **doc 6**.

> Ainsi le **document 5** présente les trois lois que Mendel a énoncé à la lecture des différents résultats de croisements qu'il a obtenu au cours de ses recherches. Il s'agit également de rappeler aux élèves que, lorsque Mendel a mené ses études, les notions de chromosomes, de gène ou d'ADN étaient inconnues.

> Le **document 6**, lui, présente l'interprétation de ces résultats à la lueur des connaissances actuelles en génétique avec notamment la construction de deux échiquiers de croisements et en suivant les conventions d'écriture énoncées dans le **doc 3**.

Unité 4

> Dans cette unité sont abordés les brassages qui, au cours de la méiose et de la fécondation, peuvent être à l'origine d'associations phénotypiques nouvelles (=recombinées).

> Les **documents 1 et 2** portent sur les résultats de croisements chez la Drosophiles, effectués par l'équipe du généticien Thomas Morgan au début du 20^{ème} siècle. Il s'agit ici de partir de parents P de lignées pures c'est-à-dire homozygotes pour les deux caractères étudiés.

Dans le **doc 1** les deux caractères sont : la longueur des ailes et la couleur du corps ; dans le **doc 2**, les deux caractères sont : la longueur des ailes et la couleur des yeux. Aucune interprétation sous forme de représentation chromosomique ou d'écriture conventionnelle n'a été rajoutée à côté des images de drosophiles afin de permettre aux élèves d'aboutir, à partir de leurs connaissances et des résultats observés à ce type d'interprétation. L'un des points qui émerge de la comparaison de ces deux études, est la différence de proportions des quatre phénotypes observés en F2.

En effet dans le **doc 1**, les quatre phénotypes en F2 sont équiprobables. Il s'agit de deux caractères dont les gènes sont non liés, c'est-à-dire portés par des paires de chromosomes différentes. Ce premier cas illustre donc le brassage interchromosomique.

En F2 dans le **doc 2**, les phénotypes parentaux sont majoritaires alors que les deux phénotypes recombinés sont minoritaires. Les gènes impliqués dans les deux caractères étudiés sont liés, c'est-à-dire portés par le même chromosome. Ce deuxième cas illustre donc le brassage intrachromosomique. Le mécanisme de crossing-over responsable de ce deuxième type de brassage est présenté dans le **document 3**.

> Le **document 4** rappelle certaines données, notamment chiffrées, qui vont permettre d'estimer la diversité des gamètes produits par un individu. Ainsi, si on simplifie en ne considérant que deux paires de chromosome portant chacun un seul gène à l'état hétérozygote, il y a : $2 \times 2 = 4$ possibilités différentes. En effet, les chromosomes peuvent se séparer de deux façons possibles lors de la première division de méiose et chaque façon donne deux gamètes différents.

Cet exemple est illustré par le schéma du **doc 4**. A chaque fois qu'on ajoute une paire de chromosome qui ne portera qu'un gène à l'état hétérozygote, on double de nombre de gamètes possibles. Ainsi, pour 23 paires, on aboutit au résultat : $2^{23} = 8388608$ soit plus de 8 millions de gamètes différents. A cet exemple, le **doc 4** rappelle qu'il existe 20000 gènes dont 7% sont à l'état hétérozygote et qu'il faut en plus ajouter le brassage intrachromosomique lié aux crossing-over.

> Le **document 5** présente deux images d'observation microscopique de la fécondation chez l'humain et rappelle que le patrimoine génétique du zygote est formé par la combinaison des allèles contenus dans le spermatozoïde avec ceux contenus dans l'ovocyte. Ainsi, on peut estimer, en se plaçant dans le cas cité précédemment, le nombre de combinaisons différentes possibles entre les gamètes de deux individus à $2^{23} \times 2^{23} = 7,92.10^{28}$.

Unité 5

> Dans cette unité il s'agit de montrer comment les analyses génétiques permettent de préciser l'origine et le risque de transmission d'une maladie humaine. Il a été choisi de travailler à partir de l'exemple de la mucoviscidose qui est une maladie déjà abordée en classe de première et pour laquelle les élèves ont déjà acquis des connaissances notamment concernant ses symptômes et son origine génétique.

> Le **document 1** est un tableau présentant les différents types de transmission des maladies héréditaires. Pour chaque type de transmission, un exemple de maladie a été indiqué. Ces informations permettent d'aborder les modes de transmission autosomale ou gonosomale, et dominante ou récessive.

Ainsi dans le cas d'une maladie monogénique chez l'humain, en fonction de la localisation du gène, soit sur un chromosome sexuel (gonosome) soit un autosome (paires 1 à 22), les risques d'être atteint de la maladie sont différents.

Pour une maladie gonosomale telle que l'hémophilie, dont le gène *F8* est porté par le chromosome X, le risque pour un garçon d'être atteint est bien plus important que pour une fille. En effet, la présence de deux chromosomes X chez la femme et la faible fréquence de l'allèle muté dans la population générale, diminuent le risque d'être atteint. Les cas d'homozygote pour l'allèle muté du gène *F8* étant très rares, le nombre de cas de femmes atteintes d'hémophilie A est donc très faible. A l'inverse, les hommes ne possédant qu'un chromosome X, ont 1 risque sur 5000 d'être atteints d'hémophilie A.

Pour les maladies à transmission autosomale, cette différence de fréquence entre sexes n'est pas observable (exemple de la phénylcétonurie ou de la maladie de Huntington).

> Ce **document 1** permet également de lister les caractéristiques principales des arbres généalogiques en fonction de chaque mode de transmission (gonosomale/autosomale et dominante/récessive), informations qui pourront être utilisées en lien avec le **document 3** qui correspond à l'arbre généalogique de la famille étudiée et sur lequel on retrouve un homme (III1) et une femme (II2) atteints de mucoviscidose. Cet arbre montre également qu'aucun individu de la génération I n'est atteint. L'ensemble de ces informations permet de déterminer le mode de transmission de cette maladie : autosomale récessive.

> La diversité génétique est également mise en évidence à travers le **document 2** qui témoigne du nombre considérable de mutations du gène *CFTR* aujourd'hui identifiées comme étant impliquées dans la survenue de la mucoviscidose. Ces mutations sont à l'origine de symptômes et de degrés de gravité différents en fonction de l'impact qu'elles ont sur l'une des étapes allant de la transcription du gène *CFTR* jusqu'à la fonctionnalité de la protéine CFTR.

> Le **document 4** est un extrait de la comparaison par anagène des séquences du gène *CFTR* des individus II4 (père), II5 (mère), III1 (fils malade) et III2 (fille saine). Ce travail d'étude des séquences est effectué habituellement après établissement de l'arbre généalogique par le généticien, dans le cadre d'un conseil génétique. Ici, les séquences du gène *CFTR* du fœtus III3 ne sont pas présentées car il s'agit d'amener les élèves à estimer le risque qu'il soit atteint, comme cela peut se faire en amont d'une potentielle étude de l'ADN fœtal après une amniocentèse par exemple.

> Le **document 5** présente la façon dont se déroule l'étude du génome d'un couple présentant un risque particulier de faire naître un enfant atteint de maladie génétique et d'introduire notamment la notion de banques de données. Ce document pourra être l'occasion de présenter ou d'amener les élèves à travailler sur une banque de données telle que « Cystic Fibrosis Mutation Database » ou « CFTR-France » (voir lien dans les ressources complémentaires).

Unité 6

> La dernière unité vise à faire découvrir aux élèves qu'il existe, en dehors des mutations, d'autres sources de diversité génétique. Elle est aussi l'occasion de montrer le rôle de ces accidents de la méiose dans l'évolution biologique.

> Dans le **document 1**, un schéma accompagné d'un texte illustrent l'exemple de la duplication génique engendrée par un crossing-over inégal. En effet, l'existence des séquences répétées

responsables des crossing-over à différents loci sur les chromosomes peut être à l'origine de crossing-over inégal. Ainsi, l'échange de chromatides entre chromosomes homologues n'est pas proportionné. Ceci a pour conséquence d'entraîner, sur l'un des chromosomes, une perte de gènes et sur l'autre au contraire une duplication de gènes.

> L'exemple de la duplication des gènes *Est-2* et *Est-3* (**document 2**) illustre les conséquences que peuvent avoir ces crossing-over inégaux. Ici, la duplication de ces gènes entraîne une résistance aux insecticides organophosphorés (**documents 2 et 3**).

> Le **document 4** présente des cas d'anomalies de migration des chromosomes au cours de la méiose. Ces anomalies peuvent être à l'origine de gamètes présentant un ou des chromosomes surnuméraires. Si ces gamètes sont ensuite impliqués dans la reproduction ils peuvent être à l'origine de polyploidies. Le **document 5** présente le cas de la banane Cavendish qui est un exemple de végétal ayant subi une autopolypliodisation. Le caryotype de ces bananes montre des triplets de chromosomes homologues. Cette innovation génétique est responsable des caractéristiques phénotypiques rendant la banane Cavendish propre à la consommation humaine (taille des fruits par exemple).

Quelques ressources

> Matériel et protocole de culture in-vitro de pomme de terre
http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/biologie/ress/cultures/pdt_cul.html

> Dossier de demande de modification du LOOF chats Norvégiens ambre
<http://s1.e-monsite.com/2009/05/11/10222829dossierambre-loof-pdf.pdf>

> Thèse chats Norvégiens ambre
http://www2.vet-lyon.fr/bib/fondoc/th_sout/th_pdf/2009lyon015.pdf

> Simulateur de croisements de drosophiles : <https://www.didac-tic.fr/droso/>

> Carte factorielle chromosome 3 de la drosophile
http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/IMG/gif/cart_facto_3.gif

> Carte factorielle du chromosome 2 de la drosophile
http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/IMG/gif/cart_facto_2.gif

> Cystic Fibrosis Mutation Database : <http://www.genet.sickkids.on.ca/Home.html>

> CFTR-France : <https://cftr.iurc.montp.inserm.fr/cftr/>

> Resistance des moustiques au insecticides
<http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/evolution/mecanismes-de-l-evolution/comprendre-la-resistance-des-moustiques-aux-insecticides>

> Informations et recherches sur la génomique de la banane
<https://academic.oup.com/aob/article/100/5/1073/137119#1076202>

Corrigé des parcours « tâche complexe »

Unité 1

Cette unité est l'occasion de mettre en œuvre la compétence : Pratiquer des langages.

> Synopsis de la réponse attendue

En prenant l'exemple des végétaux et notamment d'un clone de pomme de terre par bouturage, on apprend que les cellules d'un clone sont génétiquement identiques (doc 1). Cette identité génétique est maintenue à l'échelle de l'organe (doc 2) et à l'échelle de l'organisme. En effet, l'analyse génétique menée sur les ISSR (doc 3) de différentes plantes obtenues par bouturage montre que les trois clones ont un profil génétique identique entre eux et identique à la plante mère.

Cette similitude génétique des cellules au sein d'un clone est impliquée dans plusieurs fonctions. On peut notamment citer le cas des clones de plasmocytes (doc 4) qui participent à la réponse immunitaire adaptative. Chaque clone de plasmocytes est issu de la prolifération par mitoses et de la différenciation d'un même lymphocyte B initial. Tous les plasmocytes d'un même clone partagent le même patrimoine génétique et notamment la même séquence du gène *VH* impliqué dans la synthèse de la chaîne lourde des anticorps. Ainsi, l'ensemble de ces plasmocytes produit le même anticorps, spécifique de l'antigène à l'origine de l'infection. Ceci permet une réponse massive et spécifique du système immunitaire vis-à-vis de l'agent infectieux.

Une autre fonction des clones cellulaires est leur implication dans le renouvellement cellulaire. Ainsi, dans le cas de l'épithélium de l'intestin grêle (doc 5), on peut observer que sa desquamation entraînée par la digestion est compensée par la multiplication clonale de ses cellules. En 3 à 5 jours, l'intégralité de ce tissu peut ainsi être renouvelée.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente mais maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Eléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplets soit / connaissances soit / extraction d'information des documents	Complets ou suffisants	
Communication Texte	Non conforme	Le texte reprend une partie des éléments des documents et/ou ne répond qu'à une partie de la question	Le texte inclut les notions présentées par les documents en présentant les caractéristiques génétiques et à deux fonctions des clones cellulaires	Le texte est bien structuré, répond aux attentes du sujet, la syntaxe correcte, sans faute d'orthographe, et fait explicitement référence aux documents

Unité 2

Cette unité est l'occasion de mettre en œuvre la compétence : Pratiquer des démarches scientifiques.

> Synopsis de la réponse attendue

On cherche à montrer que les clones cellulaires sont impliqués dans la diversité phénotypique. Dans les docs 1 à 3, on peut observer qu'une mutation (substitution du nucléotide C par un nucléotide T) du gène *p53* (doc 1) dans une cellule de l'œsophage peut entraîner la formation d'un clone de cellules se multipliant de façon anormale. Au sein de ce clone, il existe une hétérogénéité génétique des cellules (doc 2) qui s'explique par le fait que cette mutation du gène *p53* empêche l'élimination des cellules présentant des modifications de l'ADN. Ainsi, ce clone est lui-même constitué de sous-clones ayant accumulé des anomalies génétiques telles que des mutations (doc 3) ou des réarrangements chromosomiques (doc 1). Ce premier exemple d'innovation génétique au sein d'un clone cellulaire a ici pour conséquence le développement pathologique d'un clone de cellules tumorales chez un individu.

Par ailleurs, dans le doc 4, on observe qu'une modification génétique, caractérisée par un échange de fragments entre les chromosomes 18 et 14, a été identifiée comme étant responsable de la formation d'un clone de lymphocyte B en dehors de toute activation par un antigène et malgré l'accumulation par ces cellules d'un grand nombre d'anomalies génétiques. Ici aussi, cela montre qu'une innovation génétique au sein d'un clone peut être à l'origine d'une modification du phénotype chez un individu. En dehors de ces modifications pathologiques, il existe d'autres exemples d'innovations génétiques ayant des conséquences sur le phénotype telles que celles pouvant se produire au sein d'une cellule embryonnaire (doc 7).

Si on prend l'exemple de la couleur du pelage chez le chat, les conséquences de l'innovation dépendent notamment de la lignée cellulaire à laquelle appartient cette cellule. Ainsi, si cette innovation (mutation) a lieu au sein d'une cellule embryonnaire de la lignée somatique, elle sera à l'origine d'une modification (souvent localisée) de la couleur du pelage de l'individu mais ne sera pas transmissible à sa descendance. À l'inverse, si cette mutation touche une cellule de la lignée germinale, cette modification sera héréditaire. Le doc 5 montre l'exemple du phénotype « ambre » lié à une innovation génétique survenue dans une lignée germinale chez le chat Norvégien.

Enfin, le doc 6 permet d'estimer la diversité liée aux erreurs de réPLICATION au sein d'un spermatozoïde produit par exemple par un homme de 25 ans. En appliquant la formule : $D = 30 + 23 \times (25 - 15) + 5$ soit $D = 265$, on peut estimer à 265 le nombre de mutations liées aux erreurs de réPLICATION au sein d'un spermatozoïde d'un homme de 25 ans. Chacune de ces innovations pouvant être à l'origine ou non d'une modification du phénotype, transmissible aux descendants et donc pouvant avoir un impact à l'échelle de la population et non plus seulement de l'individu.

> Exemples d'innovations génétiques au sein de clones cellulaires et leurs conséquences sur le phénotype

Nature de l'innovation	Exemples de conséquences sur le phénotype
Mutation dans un clone de cellules somatiques	Clone tumoral (doc 1) Modification d'une partie de la couleur du pelage chez l'individu concerné (doc 7)
Mutation dans un clone de cellules germinales	Modification de la couleur du pelage transmissible aux descendants (doc 5 et doc 7)
Echange de fragments de chromosomes	Clone tumoral de lymphocytes (doc 4)

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente mais maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Eléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplets soit / connaissances soit / extraction d'information des documents	Complets ou suffisants	
Communication Texte	Non conforme	Le texte reprend une partie des éléments des documents et/ou ne répond qu'à une partie de la question	Le texte inclus les notions présentées par les documents en présentant les innovations génétiques et leurs conséquences sur le phénotype à différentes échelles	Le texte est bien structuré, répond aux attentes du sujet, la syntaxe correcte, sans faute d'orthographe, et fait référence explicitement aux documents

Unité 3

Cette unité est l'occasion de mettre en œuvre la compétence : Pratiquer des langages.

> Synopsis de la réponse attendue

Schéma d'interprétation chromosomique du croisement de P1 par P2

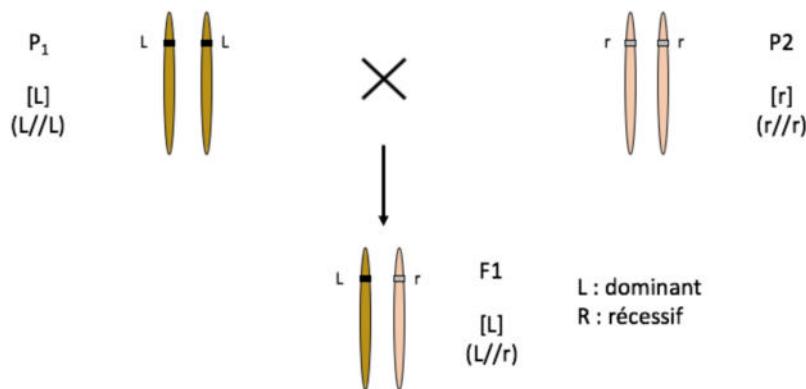
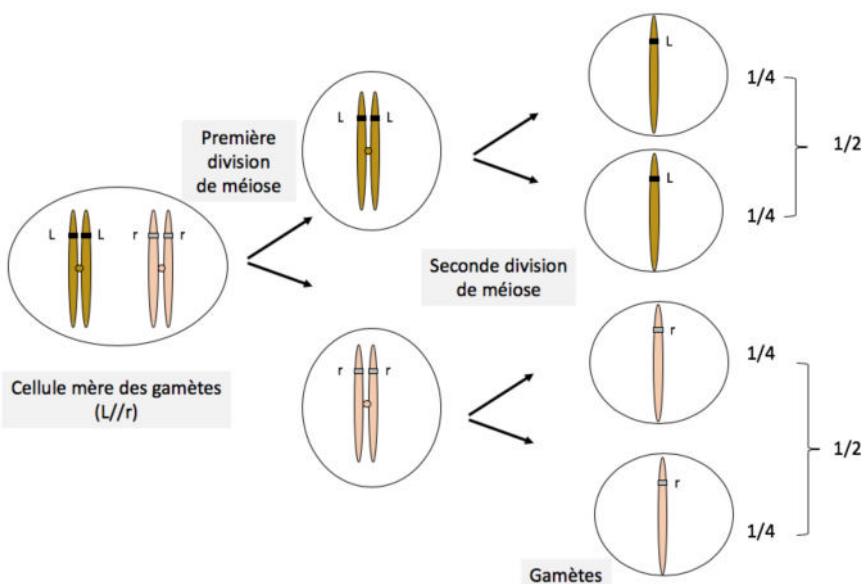


Schéma simplifié de la méiose à l'origine des gamètes de F1



> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
<u>Démarche</u> Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente mais maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente
<u>Contenu</u> Eléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplets soit / connaissances soit / extraction d'information des documents	Complets ou suffisants	
<u>Communication</u> Schémas	Non conforme	Sous forme de schémas mais peu soignés et pas ou mal titrés et légendés	Sous forme de schémas correctement titrés et légendés	

Unité 5

Cette unité est l'occasion de mettre en œuvre la compétence : Pratiquer des langages.

> Synopsis de la réponse attendue

Une analyse génétique peut être menée à différentes échelles. A l'échelle de la population, on étudie la fréquence d'une maladie en fonction du sexe. Cette première donnée permet de préciser la localisation du gène impliqué (doc 1). Par exemple, lorsqu'une maladie touche essentiellement des garçons, cela laisse supposer qu'elle est à transmission gonosomale récessive.

Cette première caractéristique se retrouve dans l'analyse génétique que l'on peut mener à l'échelle d'une famille. Ainsi, l'étude de l'arbre généalogique de la famille du doc 3 met en évidence l'existence de deux individus touchés à deux générations différentes : une femme (II2) et un homme (III1) ce qui témoigne d'une transmission de type autosomale.

De plus, il n'y a pas d'individu malade à toutes les générations (génération I indemne) ce qui est caractéristique d'une transmission de type récessive. Ce constat permet de calculer le risque pour le couple II4 et II5 d'avoir un enfant III3 atteint de mucoviscidose : étant donné que II4 et II5 ne sont eux-mêmes pas atteints de mucoviscidose mais qu'ils ont un enfant (III1) atteint, cela signifie qu'ils sont hétérozygotes pour le gène *CFTR*. Ceci est confirmé par l'analyse génétique à l'échelle de l'ADN présentée dans le doc 4. Les individus II4 et II5 présentent tous les deux un allèle muté R553X (substitution d'un C par un T impliquant l'apparition d'un codon stop en position 553) et un allèle non muté. On peut ainsi estimer le risque pour ce couple d'avoir un enfant atteint (voir tableau ci-dessous).

> Échiquier de croisement des gamètes des parents II4 et II5

Gamète II5	Gamète II4	CFTRR553X	CFTRef
CFTRR553X		CFTRR553X // CFTRR553X [malade]	CFTRef // CFTRR553X [sain]
CFTRef		CFTRef // CFTRR553X [sain]	CFTRef // CFTRef [sain]

Ce risque est donc de ¼. La mutation R553X est une mutation de classe 1 (docs 4 et 2). Ce type de mutation est à l'origine de l'absence d'ARN et donc d'une maladie sévère. Le fœtus III3 ayant un quart de risque d'être homozygote (CFTRR553X // CFTRR553X) et donc atteint d'une mucoviscidose sévère, il pourra être conseillé à ce couple de réaliser un diagnostic prénatal visant à établir précisément son génome pour le gène *CFTR*.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente mais maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Eléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplets soit / connaissances soit / extraction d'information des documents	Complets ou suffisants	
Communication Texte	Non conforme	Le texte reprend une partie des éléments des documents et/ou ne répond qu'à une partie de la question	Le texte inclut les notions présentées par les documents en présentant l'origine et les risques de transmission de la mucoviscidose	Le texte est bien structuré, répond aux attentes du sujet, la syntaxe correcte, sans faute d'orthographe, et fait explicitement référence aux documents

Unité 6

Cette unité est l'occasion de mettre en œuvre la compétence : Pratiquer des langages.

> Des exemples d'accidents génétiques de la méiose impliqués dans la diversité du vivant

Type d'accident	Phase de la méiose impliquée	Exemple	Conséquences à l'échelle chromosomique	Conséquences à l'échelle des gènes
Crossing-over inégal	Prophase I	Résistance de <i>Culex pipens</i> aux insecticides organophosphorés	Echange inégal de fragments entre chromosomes homologues	Duplication de gènes
Migration anormale de chromatides	Anaphase I ou Anaphase II	Caryotype de la banane Cavendish	Polypliodisation	Tous les gènes sont présents en 3 exemplaires

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente mais maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Eléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplets soit / connaissances soit / extraction d'information des documents	Complets ou suffisants	
Communication Tableau	Non conforme	Réponse sous la forme d'un tableau	Le tableau est correctement renseigné, il y a des titres aux colonnes et/ou aux lignes	Le tableau est complet, correctement renseigné et titré

Propositions de parcours « pas-à-pas »

Unité 1

Question 1

Décrivez le principe et les objectifs de la technique de bouturage d'un plant de pomme de terre (docs. 1 à 3) puis trouvez les arguments montrant que les plants obtenus sont des clones de la plante mère.

Question 2

Retrouvez ce qui constitue un clone de plasmocytes puis indiquez son origine et sa fonction (doc. 4).

Question 3

Expliquez comment les clones cellulaires sont impliqués dans le bon fonctionnement de la muqueuse intestinale (doc. 5).

Question 4

En prenant appui sur au moins deux exemples, justifiez l'affirmation suivante : « les clones cellulaires sont impliqués dans des fonctions diverses au sein du monde vivant ».

Unité 2

Question 1

Décrivez la particularité du caryotype de la cellule cancéreuse (doc. 1) puis expliquez en quoi le gène p53 peut être impliqué dans l'existence d'un clone cellulaire tumoral.

Question 2

À partir des documents 1 à 3, présentez les caractéristiques d'un clone cellulaire tumoral puis expliquez son origine.

Question 3

Décrivez l'anomalie génétique présentée dans le doc. 4 ainsi que ses conséquences possibles au sein de l'organisme.

Question 4

À partir de l'exemple de la couleur du pelage chez le chat (docs. 5 et 7), montrez qu'une mutation qui apparaît au cours du développement embryonnaire a des conséquences variables en fonction de la lignée cellulaire dans laquelle elle apparaît.

Question 5

À l'aide d'un calcul, estimatez le nombre de mutations liées aux erreurs de réPLICATION au sein d'un spermatozoïde produit par un homme de 25 ans (doc. 6).

Unité 3

Question 1

Quelles sont les caractéristiques de la plante de pois qui en font un matériel biologique intéressant pour étudier la transmission des caractères héréditaires ? (docs. 1 à 3)

Question 2

En supposant que la plante A, de lignée pure, produit des pois jaunes et la plante B, de lignée pure, produit des pois verts, écrire le génotype et le phénotype de ces deux plantes suivant les conventions d'écriture en génétique. (doc. 3)

Ecrire le génotype des gamètes de la plante A et des gamètes de la plante B.

Ecrire le génotype et le phénotype la plante de génération F1 qui produit 100% de pois jaunes.

Question 3

À partir des données du doc. 4, déterminez l'allèle récessif et l'allèle dominant pour la forme du pois. Justifiez votre réponse.

Question 4

Identifiez le ou les résultat(s) pouvant servir d'argument(s) en faveur de chacune des lois de Mendel (docs. 4, 5 et 6).

Unité 4

Question 1

D'après le doc. 1, déterminez les allèles dominants et récessifs pour les gènes eb et vg.

Dans le 1^{er} croisement, les parents P1 et P2 sont de lignée pure c'est-à-dire homozygotes pour les gènes eb et vg. En F1, 100% des individus sont de phénotype [ailes longues] et [corps clair] et sont hétérozygotes pour les gènes eb et vg.

Ainsi, pour le gène eb : l'allèle qui est responsable du phénotype [corps clair] est dominant. Il sera noté eb+. L'allèle responsable du phénotype [corps sombre] est récessif. Il sera noté eb.

Pour le gène vg : l'allèle qui est responsable du phénotype [ailes longues] est dominant. Il sera noté vg+. L'allèle qui est responsable du phénotype [ailes courtes] est récessif. Il sera noté vg.

Question 2

Montrez que les résultats des croisements du doc. 1 permettent de préciser si les gènes eb et vg sont liés ou non.

Dans le doc 1 on réalise le croisement de drosophiles P1 et P2 qui diffèrent par le caractère « longueur des ailes » gouverné par le gène vg qui existe sous deux allèles vg (ailes courtes) et vg+ (ailes longues) et le caractère « couleur du corps » gouverné par le gène eb qui existe sous deux allèles eb (couleur ébène) et eb+ (couleur claire). Les individus P1 et P2 sont de lignée pure c'est à dire homozygotes pour les gènes vg et eb. Le phénotype des parents est : P1 [eb ; vg] et P2 [eb+ ; vg+].

Formulons l'hypothèse que les gènes vg et eb sont indépendants (= non liés) c'est à dire sur deux paires de chromosomes différentes.

> Analyse du premier croisement

La première génération (F1) est homogène : [eb+ ; vg+]. Les parents étant homozygotes, leurs génotypes sont : P1 (vg//vg, eb//eb) et P2 (vg+//vg+, eb+//eb+). Ils ne peuvent donc produire chacun qu'un seul type de gamète : pour P1 (vg/ ; eb/) et pour P2 (vg+/ ; eb+/).

La génération F1 a donc pour génotype ($vg+//vg$, $eb+//eb$) et étant donné qu'elle est homogène d'un point de vue phénotypique : 100% de [$vg+$; $eb+$], on peut en déduire que les allèles $vg+$ et $eb+$ sont dominants.

> Analyse du deuxième croisement = croisement-test

La deuxième génération F2 est obtenue par un croisement test : F1 x [vg ; eb].

Les individus de F1 sont hétérozygotes, donc ils peuvent produire plusieurs types de gamètes. Dans l'hypothèse où les gènes sont non-liés, le brassage interchromosomique au cours de la méiose donne lieu à 4 combinaisons possibles des allèles au sein des gamètes des individus F1 : ($vg+/-$; $eb+/-$), ($vg/-$; $eb/-$), ($vg+/-$; $eb/-$) et ($vg/-$; $eb+/-$). *Un schéma de méiose est possible ici.*

On peut ainsi construire l'échiquier de croisement suivant :

Gamètes F1	($vg+/-$; $eb+/-$)	($vg/-$; $eb/-$)	($vg+/-$; $eb/-$)	($vg/-$; $eb+/-$)
Gamètes [vg ; eb]				
($vg/-$; $eb/-$)	($vg+//vg$; $eb+//eb$) [$vg+$; $eb+$]	($vg//vg$; $eb//eb$) [vg ; eb]	($vg+//vg$; $eb//eb$) [$vg+$; eb]	($vg//vg$; $eb//eb+$) [vg ; $eb+$]
Proportion théorique de chaque phénotype	25%	25%	25%	25%

Échiquier de croisement des gamètes de F1 par les gamètes de [vg ; eb]

Les résultats théoriques font apparaître une proportion équitable des quatre phénotypes en F2. Or, en comparant la théorie aux résultats réels donnés dans le doc 1, on constate que les pourcentages des quatre phénotypes sont : [$vg+$; $eb+$] : $102/405 \times 100 = 25,67\%$, [vg ; eb] : $25,18\%$, [$vg+$; eb] : $24,9\%$ et [vg ; $eb+$] : $24,19\%$.

Les résultats réels sont donc bien comparables aux résultats théoriques. L'équiprobabilité des phénotypes en F2 démontre donc que les gènes vg et eb sont non-liés.

Question 3

Après avoir déterminé les allèles dominants pour le gène bw , expliquez en quoi les résultats du croisement-test du doc. 2 sont surprenants. Proposez une explication à l'aide des informations du doc. 3.

Dans le doc 2 on réalise le croisement de drosophiles P1 et P2 qui diffèrent par le caractère « longueur des ailes » gouverné par le gène vg qui existe sous deux allèles vg (ailes courtes) et $vg+$ (ailes longues) et le caractère « couleur des yeux » gouverné par le gène bw qui existe sous deux allèles bw (couleur brune) et $bw+$ (couleur rouge). Les individus P1 et P2 sont de lignée pure c'est à dire homozygotes pour les gènes vg et bw . Le phénotype des parents est : P1 [bw ; vg] et P2 [$bw+$; $vg+$].

Si l'on formule l'hypothèse que les gènes bw et vg sont non-liés alors on devrait obtenir des phénotypes équiprobables en F2 comme dans l'exemple présenté doc 1. Or, on obtient quatre phénotypes en F2 dont deux ont des proportions majoritaires [$vg+$; $bw+$] et [vg ; bw] et deux des proportions minoritaires [$vg+$; bw] et [vg ; $bw+$].

Formulons donc l'hypothèse que les gènes bw et vg sont liés c'est-à-dire situés sur le même chromosome.

> Analyse du premier croisement

La première génération (F1) est homogène : [bw+ ; vg+]. Les parents étant homozygotes, leurs génotypes sont : P1 (vg,bw // vg,bw) et P2 (vg+,bw+ // vg+ + bw+). Ils ne peuvent donc produire chacun qu'un seul type de gamète : pour P1 (vg,bw/) et pour P2 (vg+,bw+/).

La génération F1 a donc pour génotype (vg,bw // vg+,bw+) et étant donné qu'elle est homogène d'un point de vue phénotypique : 100% de [vg+ ; bw+], on peut en déduire que les allèles vg+ et bw+ sont dominants.

> Analyse du deuxième croisement = croisement-test

La deuxième génération F2 est obtenue par un croisement-test : F1 x [vg ; bw].

Les individus de F1 sont hétérozygotes, donc ils peuvent produire plusieurs types de gamètes. Dans l'hypothèse où les gènes sont liés, les génotypes possibles des gamètes des individus F1 sont : (vg+,bw+/) et (vg,bw/). *Un schéma de méiose est possible ici.*

On peut ainsi construire l'échiquier de croisement suivant :

Gamètes F1	(vg+,bw+/)	(vg, bw/)
Gamètes [vg ; bw]		
(vg/ ; bw/)	(vg,bw // vg+,bw+) [vg+ ; bw+]	(vg,bw // vg,bw) [vg ; bw]
Proportion théorique de chaque phénotype	50%	50%

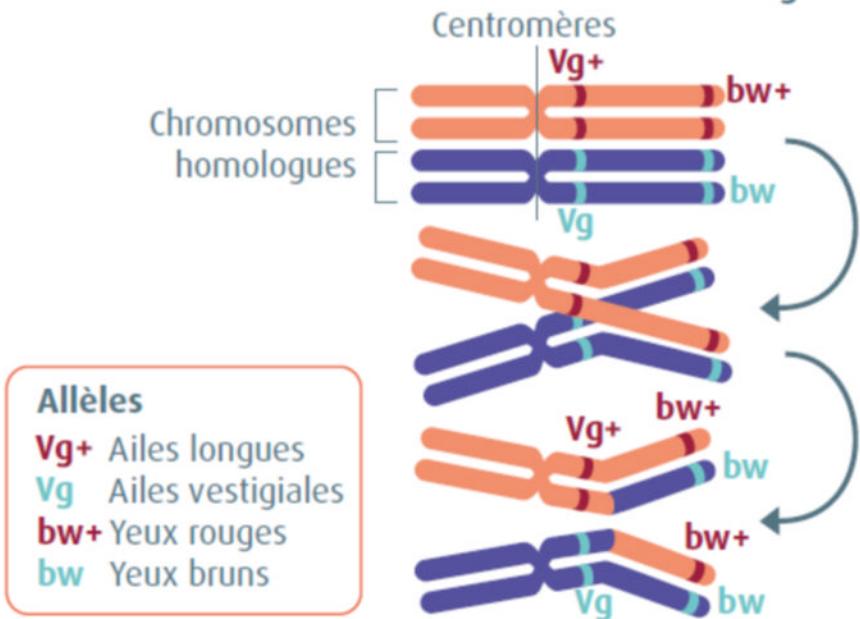
Échiquier de croisement des gamètes de F1 par les gamètes de [vg ; bw]

Ainsi, en comparant les résultats on peut constater que les résultats obtenus dans le doc 2 ne correspondent pas non plus aux résultats obtenus en cas de gènes liés.

À partir des informations du doc 3, on peut comprendre l'origine des deux phénotypes recombinés aux proportions minoritaires [vg+ ; bw] et [vg ; bw+]. En effet, on apprend que, lors de la prophase I de méiose, un phénomène appelé crossing-over peut engendrer un échange de portions de chromatides entre chromosomes homologues au moment de leur appariement. Ainsi, de nouvelles combinaisons alléliques peuvent se former. Ce phénomène n'étant pas systématique, les chromatides présentant des recombinations alléliques sont en proportions minoritaires par rapport aux chromatides présentant des combinaisons alléliques parentales.

Le schéma du doc 3 illustre le phénomène de crossing-over, brassage intrachromosomique, qui peut expliquer l'apparition en F2 des phénotypes recombinés [vg+ ; bw] et [vg ; bw+].

Mécanisme et résultat du crossing-over



Question 4

Justifiez l'affirmation suivante : « La diversité des zygotes issus de la reproduction sexuée est quasi infinie. » (doc. 3 à 5)

On peut justifier l'affirmation selon laquelle « la diversité des zygotes issus de la reproduction sexuée est quasi infinie » à partir du fait qu'un zygote est issu de l'union des génomes de deux gamètes. Or, la combinaison des allèles au sein d'un gamète fait intervenir deux types de brassages : les brassages interchromosomiques et les brassages intrachromosomiques. À ces brassages s'associe la diversité liée à la fécondation.

Ainsi, si on simplifie la situation réelle en ne considérant que deux paires de chromosomes portant chacun seulement un gène à l'état hétérozygote, il y a : $2 \times 2 = 4$ possibilités différentes. En effet, les chromosomes peuvent se séparer de deux façons possibles lors de la première division de méiose et chaque façon donne deux gamètes différents. Cet exemple est illustré par le schéma du doc 4.

À chaque fois qu'on ajoute une paire de chromosome qui ne porterait qu'un gène à l'état hétérozygote, on double de nombre de gamètes possibles. Ainsi, pour 23 paires, on aboutit au résultat : $2^{23} = 8388608$ soit plus de 8 millions de gamètes différents. À cet exemple, il faut ajouter les informations apportées par le doc 4 qui rappelle qu'il existe 20000 gènes dont 7% sont à l'état hétérozygote et qu'à ceci il faut ajouter les nouvelles combinaisons alléliques dues au brassage intrachromosomique (crossing-over).

Le doc 5 présente deux images d'observation microscopique de la fécondation chez l'humain et rappelle que le patrimoine génétique du zygote est formé par la combinaison des allèles contenus dans un spermatozoïde avec ceux contenus dans un ovocyte. Ainsi, si on se place dans le cas initialement cité, qui ne prend en compte que le brassage interchromosomique pour 23 paires de chromosomes ne possédant chacune qu'un seul gène, on peut estimer le nombre de combinaisons différentes possibles entre les gamètes de deux individus à $2^{23} \times 2^{23} = 7,92 \cdot 10^{28}$.

Ainsi, si on tient compte des caractéristiques réelles du génome humain, des brassages liés à la méiose et à la fécondation, on peut effectivement considérer que la diversité des zygotes issus de la reproduction sexuée est quasi infinie.

Unité 5

Question 1

En choisissant au moins deux exemples, montrez que certaines caractéristiques d'un arbre généalogique permettent d'identifier le type de transmission d'une maladie monogénique (doc. 1).

Question 2

Identifiez le type de transmission de la mucoviscidose. Justifiez votre réponse (docs. 1 et 3).

Question 3

Calculez le risque pour l'individu III3 d'être atteint de mucoviscidose (docs. 3 et 4).

Question 4

Quel est le degré de sévérité de la mucoviscidose qui touche l'individu III1 ? (docs. 2, 3 et 4)

Question 5

Justifiez de la tenue d'un conseil génétique dans le cas de la famille présentée dans le doc. 3. (docs. 1 à 5).

Unité 6

Question 1

Comparez les résultats d'analyse génétique des moustiques 1, 2 et 3 puis présentez les phénomènes qui ont pu être à l'origine de ces différences (docs. 1 et 2).

Question 2

Expliquez l'origine de la résistance aux insecticides de certains moustiques (docs. 1 à 3).

Question 3

Schématisez le contenu chromosomique des cellule-œufs obtenues suite à la fécondation de chaque type de gamète présenté dans le doc. 4 avec un gamète normal.

Question 4

Comparez les caryotypes des deux types de banane puis émettez une hypothèse concernant le phénomène qui a pu être à l'origine du caryotype des bananes Cavendish (docs. 4 et 5).

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

> Échiquier de croisement de P1 par P2 dans le cas où les deux parents sont homozygotes.

Gamète P1 Gamète P2	MN/	MN/
MF/	MN//MF	MN//MF
MF/	MF//MF	MN//MF

Seulement un phénotype possible. Hypothèse non valide.

> Échiquier de croisement de P1 par P2 dans le cas où l'un des deux parents est hétérozygote, l'autre homozygote.

Gamète P1 Gamète P2	MN/	MN/
MF/	MN//MF	MN//MF
MN/	MN//MN	MN//MN

Seulement deux phénotypes possibles. Hypothèse non valide.

> Échiquier de croisement de P1 par P2 dans le cas où les deux parents sont hétérozygotes.

Gamète P1 Gamète P2	MN/	MF/
MN/	MN//MN [normal]	MN//MF [frisé]
MF/	MN//MF [frisé]	MF//MF [crépu]

Trois phénotypes possibles avec $\frac{1}{4}$ de [normal], $\frac{1}{4}$ de [crépu] et $\frac{1}{2}$ de [frisé].

Les résultats théoriques correspondent aux résultats obtenus par croisement. Hypothèse validée : les deux parents sont hétérozygotes et possèdent des gamètes de génotype (MN/) et (MF/).

Exercice 3

1. P1 et P2 sont issus de lignées pures donc homozygotes pour les deux gènes étudiés :

- P1 [CJ ; FL] (CJ//CJ ; FL//FL) ou (CJ ; FL // CJ ; FL)
- P2 [Cv ; Fr] (Cv//Cv ; Fr//Fr) ou (Cv ; Fr // Cv ; Fr)

2. Les individus F1 sont tous hétérozygotes mais on observe 100% de phénotype [CJ ; FL]. Les allèles CJ et FL sont donc dominants.

3. Les phénotypes des individus issus du croisement-test étant équiprobables, on peut supposer que les gènes sont non-liés. Les résultats théoriques correspondent aux résultats obtenus lors des croisements. Les gènes C et F sont donc bien non-liés.

> Échiquier de croisement de F1 par P2 dans le cas de gènes C et F non-liés :

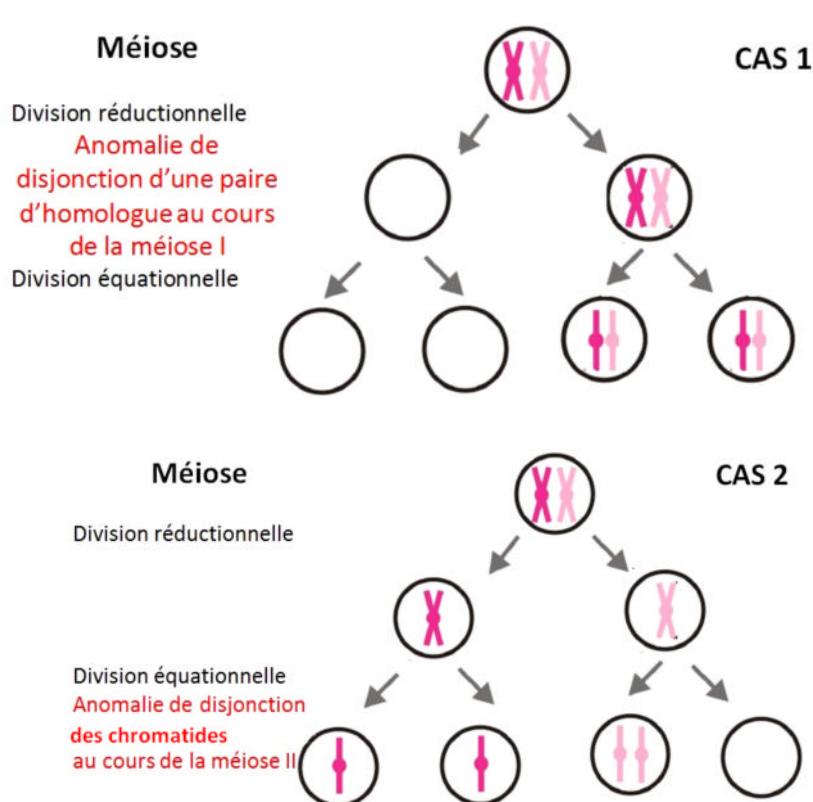
Gamète F1 \ Gamète P2	(CJ/ ; FL/)	(CJ/ ; Fr/)	(Cv/ ; FL/)	(Cv/ ; Fr/)
(Cv/ ; Fr/)	(CJ//Cv ; FL//Fr) [CJ ; FL]	(CJ//Cv ; Fr//Fr) [CJ ; Fr]	(Cv//Cv ; (Fr//FL) [Cv ; FL]	(Cv//Cv ; Fr//Fr) [Cv ; Fr]
Proportion théorique du phénotype	25%	25%	25%	25%

Exercice 4

1. La technique FISH montre un point vert dans la cellule ce qui marque la présence d'un chromosome Y et deux points roses ce qui marque la présence de deux chromosomes X.

Le caryotype présente 22 paires de chromosomes homologues et 3 chromosomes sexuels : 2 chromosomes X et 1 chromosome Y.

2.



Exercice 5

1. Les proportions des différents phénotypes et l'apparition des phénotypes « blanche » et « noire » en F1 nous indiquent que les allèles liés à ces phénotypes sont présents dans le génome des parents mais ne s'expriment que lorsqu'ils sont à l'état homozygote. Les allèles possibles pour ce gène sont n et b.

2. Génotype couple initial : (n//b).

> Échiquier de croisement de P1 par P2 :

Gamète P1	n/	b/
Gamète P2		
n/	n//n [noire]	n//b [herminée]
b/	n//b [herminée]	b//b [blanche]

Les proportions théoriques [noire] = 25%, [herminée] = 50% et [blanche] = 25% correspondent aux proportions observées.

3. Les poules noires étant homozygotes (n//n), si on les croise ensemble cela ne donnera que des poules noires soit 0% de poules herminées.

Exercice 6

Éléments de correction :

- > Les gènes R, V et V' sont situés sur les chromosomes X.
- > Les séquences V et V' sont identiques.
- > Un crossing-over inégal peut être à l'origine de la duplication du gène V en V' chez un des parents de l'individu 2.
- > Les gènes R et V ont des séquences à 96% identiques. En plus du crossing-over, des mutations peuvent être à l'origine des différences identifiées.
- > Proposition de succession des événements : une duplication donne les gènes R et V ; des mutations ont lieu ; une duplication du gène V donne V'.
- > Des schémas peuvent être réalisés : crossing-over inégal et succession des phénomènes montrant leur chronologie.

Exercice 7

Éléments de correction :

> La fréquence du phénotype « yeux blancs » est beaucoup plus importante chez les mâles donc le gène qui contrôle ce caractère est probablement lié à un chromosome sexuel.

> Croisement 1 : écriture des phénotypes et génotypes parents.

Échiquier de croisement P1 par P2 et identification des génotypes de F1 :

Gamète P2 ♀	(R/) X	(R/) X
Gamète P1 ♂		
(b/) X	(R//b) ♀ [R]	(R//b) ♀ [R]
(/) Y	(R//) ♂ [R]	(R//) ♂ [R]

L'allèle b est récessif, l'allèle R est dominant.

> Croisement 1 : échiquier de croisement F1 x F1

Gamète F1 ♀	(R/) X	(b/) X
Gamète F1 ♂		
(R/) X	(R//R) ♀ [R]	(R//b) ♀ [R]
(/) Y	(R//) ♂ [R]	(b//) ♂ [b]

Les pourcentages théoriques des différents phénotypes en F2 : ♀ [R] 50% ; ♂ [R] 25% ; ♂ [b] 25% correspondent aux pourcentages observés.

> Croisement 2 : génotype des P2 femelles aux yeux blancs : (b//b)

Échiquier de croisement de P1 par P2 du croisement 2 :

Gamète P2 ♀	(b/) X	(b/) X
Gamète P1 ♂		
(R/) X	(R//b) ♀ [R]	(R//b) ♀ [R]
(/) Y	(b//) ♂ [b]	(b//) ♂ [b]

Les pourcentages théoriques des différents phénotypes en F1 : ♀ [R] 50% ; ♂ [R] 50% correspondent aux pourcentages observés.

> Croisement 2 : échiquier de croisement F1 x F1

Gamète P2 ♀	(R/) X	(b/) X
Gamète P1 ♂		
(b/) X	(R//b) ♀ [R]	(b//b) ♀ [b]

(/) Y	(R//) ♂ [R]	(b//) ♂ [b]
-------	----------------	----------------

Les pourcentages théoriques des différents phénotypes en F2 : ♀ [R] 25% ; ♂ [R] 25% ; ♀ [b] 25% ; ♂ [b] 25% correspondent aux pourcentages observés.

> Conclusion : Le gène qui contrôle le caractère « couleur des yeux » est porté par le chromosome X.

Exercice 8 (Bac type 2)

Éléments d'évaluation

Qualité de la démarche	Démarche cohérente		Démarche maladroite		Pas de démarche ou démarche incohérente	
Éléments scientifiques issus des documents et issus des connaissances	Suffisants dans les deux domaines	Suffisants pour un domaine et moyen dans l'autre ou moyen dans les deux	Suffisants pour un domaine et moyen dans l'autre ou moyen dans les deux	Moyen dans l'un des domaines et insuffisant dans l'autre	Insuffisant dans les deux domaines	Rien
Note	9	7	5	3	1	0

Démarche cohérente : structurée par des connecteurs logiques pour répondre à la problématique dans un texte soigné (orthographe, syntaxe) et mettant en évidence clairement les relations entre les arguments utilisés. La démarche ne peut être considérée comme cohérente que si l'idée principale est présente.

Idée principale : La DMD est une maladie génétique à transmission gonosomale récessive liée à une mutation du gène de la dystrophine porté par le chromosome X. Le fœtus III3 étant une fille et son père étant non malade, elle n'a donc pas de risque d'être atteinte de DMD du fait de cet allèle.

Éléments scientifiques issus des documents

> Document 1

Seuls des hommes dans cette famille sont atteints et pas à toutes les générations. On peut donc penser que cette maladie est à transmission gonosomale récessive.

> Document 2

Dystrophine : protéine intracellulaire impliquée dans l'architecture des cellules musculaires.

DMD : maladie héréditaire donc origine liée aux gènes (mise en relation avec doc 1).

Une dystrophine modifiée entraîne une dégénérescence des muscles.

> Document 3

Le gène de la dystrophine est porté par le chromosome X (mise en relation avec doc 1) ce qui confirme l'origine génétique d'une maladie à transmission gonosomale.

La mutation « 2368 » chez les individus atteints III2 et II2 : G est remplacée par A donc le codon GTC devient ATC donc apparition d'un codon UAG dans l'ARNm.

> Document 4

Mise en relation avec doc 3 : le codon UAG est un codon stop donc la dystrophine produite est plus courte, non fonctionnelle.

> Document 5

Le caryotype du fœtus III3 a deux chromosomes X, c'est une fille.

La DMD est une maladie à transmission gonosomale récessive donc le génotype doit contenir deux allèles mutés pour qu'un individu soit atteint. La femme II4 a un fils atteint mais n'est pas malade, elle est donc hétérozygote. Le père II5 n'étant pas atteint, il n'est pas porteur de l'allèle muté et ne le transmet donc pas à ses enfants. Donc l'individu III3 a dû hériter d'un allèle non muté de son père II5 (pas d'information concernant l'allèle transmis par la mère II4). III3 est soit homozygote pour l'allèle « normal » soit hétérozygote mais ne sera pas atteinte de la maladie (sauf en cas d'une autre mutation).

Éléments scientifiques issus des connaissances

- Arguments en faveur d'un mode de transmission gonosomal récessif d'une maladie génétique
- Maladie héréditaire = liée au génome
- Le brin transcrit est complémentaire de l'ARNm et ribonucléotide U (pas de T)
- Si codon stop = arrêt de la traduction

Exercice 9

Éléments d'évaluation

Qualité de la démarche	Démarche cohérente		Démarche maladroite		Pas de démarche ou démarche incohérente	
Éléments scientifiques issus des documents et issus des connaissances	Suffisants dans les deux domaines	Suffisants pour un domaine et moyen dans l'autre ou moyen dans les deux	Suffisants pour un domaine et moyen dans l'autre ou moyen dans les deux	Moyen dans l'un des domaines et insuffisant dans l'autre	Insuffisant dans les deux domaines	Rien
Note	9	7	5	3	1	0

Démarche cohérente : structurée par des connecteurs logiques pour répondre à la problématique dans un texte soigné (orthographe, syntaxe) et mettant en évidence clairement les relations entre les

arguments utilisés. La démarche ne peut être considérée comme cohérente que si l'idée principale est présente.

Idée principale : L'homozygotie pour l'allèle C chez les individus LNP est responsable de la synthèse d'un facteur de transcription MCM6 muté, incapable d'assurer son rôle. Le gène *LCT* n'est pas transcrit, la lactase n'est pas produite et le lactose n'est pas hydrolysé et donc n'est pas digéré.

Éléments scientifiques issus des documents

> Document 1

Le lactose du lait doit être hydrolysé en galactose et glucose grâce à une enzyme : la lactase.
Hypothèse : problème au niveau de la lactase chez les individus LNP.

> Document 2

Le gène *LCT* codant la lactase a la même séquence chez tous les individus donc ce ne serait pas un problème lié à une mutation du gène *LCT*. Le gène *MCM6* code un facteur de transcription. Il y a plus d'ARNm du gène *LCT* chez les individus LNP, il y aurait donc un problème de transcription du gène *LCT*.

> Document 3

Il y a une mutation de substitution T (allèle T) en C (allèle C) en position -14kb donc dans le gène *MCM6* positionné à proximité du gène *LCT*.

Les élèves doivent extraire des données chiffrées du tableau.

Les individus LP possèdent au moins une copie de l'allèle T. Les individus LNP possèdent 2 copies de l'allèle C. L'allèle C est impliqué dans le phénotype LNP et est récessif.

> Document 4

Un facteur de transcription est une protéine qui permet d'agir sur la transcription d'autres gènes en ouvrant l'ADN et en permettant l'action de l'ARNpolymérase.

> Mise en relation des docs 2, 3 et 4

Lorsque le gène *MCM6* est muté, le facteur de transcription n'assure plus son rôle, il n'y a pas de transcription du gène *LCT*.

Éléments scientifiques issus des connaissances

- ARNm, molécule issue de la transcription d'un gène
- Changement d'un nucléotide par un autre : mutation de type substitution
- Lorsqu'un allèle s'exprime uniquement à l'état homozygote il est récessif
- ARN polymérase : molécule permettant la transcription de l'ADN en ARNm

Chapitre 2. La complexification des génomes : Transferts horizontaux et endosymbioses

Ce chapitre s'appuie sur un nombre important de prérequis touchant tout à la fois à la structure cellulaire des eucaryotes et des bactéries, au support de l'information génétique, aux interactions entre êtres vivants et à leurs conséquences sur l'évolution du vivant et la santé humaine.

Les élèves vont y découvrir que les gènes ne sont pas seulement hérités de la génération précédente (c'est-à-dire verticalement, par reproduction sexuée ou asexuée) mais peuvent être acquis « horizontalement » à partir de sources environnementales (acides nucléiques présents dans le milieu ou autres organismes en interaction).

L'unité 1 aborde le cas des échanges génétiques (transferts horizontaux) entre bactéries. Ces derniers ont été les premiers décrits et ils ont joué un rôle important dans la compréhension fonctionnelle de l'ADN (expérience de Griffiths, Avery, Mac Leod en 1944).

L'unité 2 montre que les transferts génétiques horizontaux sont relativement fréquents dans l'arbre du vivant et sont à l'origine de caractères qui sont soumis notamment à la sélection naturelle.

L'unité 3 décrit les endosymbioses chloroplastiques et mitochondriales avec les arguments associés ainsi que les conséquences génétiques sur les génomes de ces organites et du noyau des cellules eucaryotes.

Thème 1. La Terre, la vie et l'organisation du vivant : génétique et évolution	
Connaissances	Capacités, attitudes
<p>L'universalité de l'ADN et l'unicité de sa structure dans le monde vivant autorisent des échanges génétiques entre organismes non nécessairement apparentés. > Unité 1</p> <p>Des échanges de matériel génétique, hors de la reproduction sexuée, constituent des transferts horizontaux. Ils se font par des processus variés (vecteurs viraux, conjugaison bactérienne...). > Unité 1</p> <p>Les transferts horizontaux sont très fréquents et ont des effets très importants sur l'évolution des populations et des écosystèmes. > Unités 1 et 2</p> <p>Les pratiques de santé humaine sont concernées (propagation des résistances aux antibiotiques). > Unité 1</p> <p>Les endosymbioses transmises entre générations, fréquentes dans l'histoire des eucaryotes, jouent un rôle important dans leur évolution > Unité 3.</p> <p>Le génome de la cellule (bactérie ou eucaryote) intégré dans une cellule hôte régresse au cours des générations, certains de ses gènes étant transférés dans le noyau de l'hôte. Ce processus est à l'origine des mitochondries et des chloroplastes, organites contenant de l'ADN. > Unité 3</p>	<p>Étudier des expériences historiques mettant en évidence la transformation bactérienne. > Unité 1</p> <p>Comprendre comment la connaissance des mécanismes des transferts horizontaux permet des applications biotechnologiques (notamment la production de molécules d'intérêt dans les lignées bactériennes). > Unité 1</p> <p>Recenser des informations attestant l'existence de transferts horizontaux de gènes dans l'histoire du génome humain. > Unité 2</p> <p>Extraire et organiser des informations d'un arbre phylogénétique pour identifier l'importance des transferts horizontaux. > Unité 2</p> <p>Mettre en œuvre une méthode permettant de comprendre les arguments qui ont conduit à considérer que les organites énergétiques sont issus de symbioses dans la lignée des eucaryotes. > Unité 3</p>

Compétences travaillées et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
<p>Pratiquer des démarches scientifiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Formuler et résoudre une question ou un problème scientifique. • Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution. • Observer, questionner, formuler une hypothèse, en déduire ses conséquences testables ou vérifiables, expérimenter, raisonner avec rigueur, modéliser, argumenter. • Interpréter des résultats et en tirer des conclusions. • Discerner, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 3 • Unité 3 • Unités 1 et 3 • Unité 1 • Unité 2
<p>Concevoir, créer, réaliser</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifier et choisir des notions, des outils et des techniques, ou des modèles simples pour mettre en œuvre une démarche scientifique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 1
<p>Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 3
<p>Pratiquer des langages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant. • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 1 • Unités 1 à 3

Choix pédagogiques

Unité 1

- > Cette première double page permet d'aborder les transferts génétiques horizontaux, que l'on oppose aux transferts génétiques verticaux (c'est-à-dire d'une génération à l'autre à travers la reproduction sexuée ou asexuée).
- > Les **documents 1 et 2** abordent les expériences historiques de Griffith, Avery et Mac Leod, lesquelles ont permis de comprendre que l'ADN était le support de l'information génétique (ce que F. Griffith appelle « facteur transformant »). Ces expériences ont pu être déjà vues par les élèves en 1^e, mais elles sont exploitées ici pour mettre en évidence une autre notion : les bactéries peuvent intégrer à leur propre génome de l'ADN de l'environnement. Notons que F. Griffith ne publia pas ses résultats immédiatement, parce qu'il en fut lui-même surpris semble-t-il.
- > Le **document 3** est un document classique faisant la synthèse des modes d'acquisition de gènes par transferts horizontaux chez les bactéries : transformation, transfert viral (transduction), conjugaison. Il peut éventuellement être exploité à la lumière de l'**exercice 5**.
- > Les documents de la page de droite sont des applications de ces transferts horizontaux chez les bactéries. Le **document 4** montre une application des phénomènes de transformation chez les bactéries *Acinetobacter baumanii*. Le texte précise que cette bactérie, capable de lyser d'autres bactéries, présente des multirésistances. L'élève peut faire l'hypothèse que les bactéries lysées libèrent leur ADN dans l'environnement local et que celui-ci peut être acquis par transferts horizontaux par *Acinetobacter baumanii*.
- > Le **document 5** permet de fournir un argument en faveur de cette hypothèse : il semble qu'*Acinetobacter baumanii* est capable d'acquérir la résistance à la kanamycine portée par *E. coli* à la suite de 19 heures de co-culture. Les expériences 1 et 2 représentent des témoins négatifs. On constate également la baisse des effectifs d'*E. coli* cohérente avec l'activité « prédatrice » d'*Acinetobacter baumanii*.
- > Le **document 6** est un exemple d'application en biotechnologie humaine des transferts de gènes horizontaux. En l'occurrence, il s'agit d'une des premières applications commerciales et médicales de la transgénèse : la synthèse d'insuline humaine par des bactéries *E. coli* transformées. On insistera sur l'importance de l'universalité du code génétique pour expliquer la capacité des bactéries à exprimer des gènes d'organismes éloignés phylogénétiquement. Il existe aujourd'hui un grand nombre de molécules, principalement pour des usages industriels, produites par des micro-organismes transgéniques, principalement des bactéries, des moisissures et des levures. On pourra trouver d'autres exemples dans l'**Objectif oral page 64**. Le document permet de discuter de l'influence des conditions de culture des bactéries sur le rendement de la synthèse des protéines transgéniques.

Unité 2

- > Cette unité montre que les transferts de gènes horizontaux ne concernent pas uniquement les bactéries, mais s'observent également dans d'autres groupes d'êtres vivants.
- > La page de gauche prend l'exemple de la syncitine que l'on retrouve chez les mammifères placentaires et un lézard (mabuya). C'est aussi l'occasion de montrer que les humains sont concernés par les transferts de gènes, avec l'exemple fonctionnel de la syncitine. On estime que 8 à 10 % du génome humain a une origine virale (alors que seulement 1,5 % code des gènes fonctionnels). Par ailleurs, on trouve au moins une dizaine de gènes d'origine bactérienne (peut être hérité par transduction, voir unité 1) auquel il faut ajouter des gènes d'origine mitochondriale (voir unité 3).

- > Le **document 3** propose de localiser le gène de la syncytine (appelé ERVWE1) sur le génome humain à l'aide de Mapviewer (on trouve alors que le gène ERVWE1 se trouve sur le chromosome 7).
- > Le **document 5** doit permettre aux élèves de faire deux hypothèses sur l'origine des syncytines chez les mammifères : soit elles sont héritées d'un ancêtre commun puis ont été perdues dans de nombreuses branches, soit elles sont le fruit de transferts horizontaux ayant eu lieu dans chacune des branches. La présence des symboles indiquant les transferts horizontaux conforte la deuxième hypothèse. On constate alors que les transferts horizontaux, pour cette catégorie de protéines au moins, ne semblent pas exceptionnel dans l'histoire des mammifères.
- > Les documents présentés abordent la parenté des syncytines de mammifères avec celles de virus, mais pas les modalités du transfert horizontal. On pourra faire réfléchir les élèves à ces modalités et notamment leur faire constater qu'un transfert horizontal ne peut s'inscrire durablement dans le génome des descendants d'un individu qu'à deux conditions au moins : il concerne le génome des cellules germinales et il n'est pas contre-sélectionné.
- > La page de droite prend un exemple chez les insectes (puceron vert du pois *Acyrthosiphon pisum*) et montre que les donneurs de gènes sont eux-mêmes variés. *A. pisum* provoque des dégâts sur de nombreuses plantes cultivées et peut transmettre plus de 30 virus au plantes : mosaïque du haricot (BCMV), mosaïque jaune du haricot (BYMV), mosaïque du concombre, etc. Sa couleur est dépendante de la synthèse de caroténoïdes, des pigments photosynthétiques accessoires fréquemment produits des bactéries, des champignons ou les plantes, mais rarement chez les animaux.
- > Suite à la comparaison des séquences des gènes correspondants, le **document 7** montre l'apparentement des enzymes responsables de cette synthèse (caroténoïde désaturase et caroténoïde synthase) avec celle des champignons (moisissures proches des *Mucor* fréquemment associées à la décomposition des végétaux). On constate par ailleurs que les enzymes des plantes sont apparentés à *Synechococcus*, une cyanobactérie libre, considérée comme la plus abondante du plancton marin. Cette observation pourra être exploitée dans l'unité 3.
- > Le **document 6** apporte également des arguments sur le maintien de ce polymorphisme. Les élèves peuvent en effet se poser la question de l'absence de contre-sélection d'une des deux couleurs, vert ou rose. Il semble que ce polymorphisme résulte d'une prédation différentielle. Les pucerons ont en effet un grand nombre de prédateurs (ici les coccinelles et les guêpes *Aphidius sp.*) utilisant des signaux différents pour détecter leur proie. On comprend ainsi que ces prédateurs exercent une pression de sélection sur chacune des deux couleurs empêchant probablement dans certaines populations que l'une des deux couleurs domine.
- > Le **document 8** permet de replacer les transferts horizontaux dans l'histoire du vivant et de rappeler que la phylogénie repose d'abord sur les transferts verticaux (héritage génétique de la génération précédente). La représentation des transferts horizontaux nécessite alors l'utilisation de « flèches entre les branches », particulièrement nombreuses chez les micro-organismes, beaucoup moins chez les eucaryotes pluricellulaires.

Unité 3

- > Cette unité s'intéresse aux indices permettant de proposer une origine bactérienne aux organites semi-autonomes que sont chloroplastes et mitochondries. Ces endosymbioses ont des conséquences importantes sur les transferts génétiques horizontaux entre génome bactérien génome nucléaire.
- > La page de gauche reprend les principaux arguments accessibles à des élèves de terminale, en insistant sur l'autonomie de reproduction des mitochondries (**document 2**), l'existence d'une double membrane (**documents 2 et 3**), les caractéristiques biochimiques des lipides (**document 3**), les

mécanismes d'expression des gènes de type bactérien (**document 3**) et l'organisation du génome (**document 3**).

> Par ailleurs, le **document 4** rappelle quelques éléments historiques sur l'élaboration de la théorie endosymbiotique. Il a fallu presque un siècle pour formaliser les intuitions d'Andreas Schimper grâce aux travaux de Lynn Margulis. Plus généralement, c'est l'importance écologique, évolutive, génétique, et physiologique des symbioses, longtemps sous-estimée, qui peut être abordée. Cet exemple est aussi l'occasion de discuter des modalités d'élaboration des connaissances scientifiques, dans la continuité des réflexions à l'esprit critique mise en avant dans le programme d'enseignement scientifique. En l'occurrence, on constatera, jusqu'à la fin du xx^e siècle, une prééminence de la biologie consacrée à l'individu et aux échelles infra-individuelles, sous-estimant l'importance des interactions interspécifiques dans l'organisation et l'évolution du vivant. Ces thématiques, à travers les différentes branches de l'écologie, se révèlent aujourd'hui essentielles à la compréhension des dynamiques des communautés, des populations et même des individus.

> Le **document 5**, à travers l'analyse de parenté des trois génomes du maïs (le génome nucléaire, le génome mitochondrial et le génome chloroplastique), illustre le caractère chimérique des cellules eucaryotes (végétales en l'occurrence). Les élèves doivent ainsi saisir la contribution génétique bactérienne importante résultant des phénomènes d'endosymbiose.

> Une grande partie des gènes des bactéries dont elles sont issues ont été perdue par les organites au cours de leur histoire avec la cellule eucaryote hôte. Le **document 6** illustre ce transfert horizontal intracellulaire. Notons qu'avec ce document, il n'est pas possible de savoir si les gènes ont été définitivement perdus (parce qu'inutiles, c'est-à-dire neutres ou contre-sélectionnés) ou transférés vers le noyau. En revanche, le **document 7**, avec l'exemple du chloroplaste, montre qu'une part très importante (> 90 %) des gènes bactériens d'origine ont été transférés vers le noyau. On peut donc interpréter l'important transfert post-traductionnel de protéines exprimées à partir du génome nucléaire (2300 protéines) comme étant une conséquence du transfert génétique horizontal. Les chloroplastes récupèrent les protéines nécessaires à leur fonctionnement exprimées à partir de gènes qui ont été transférés vers le noyau.

Références et pistes bibliographiques

Unité 2

Références

- Blaise, S., de Parseval, N., Bénit, L., & Heidmann, T. (2003). Genomewide screening for fusogenic human endogenous retrovirus envelopes identifies syncytin 2, a gene conserved on primate evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(22), 13013-13018.
- Cornelis, G., Funk, M., Vernoched, C., Leal, F., Tarazona, O. A., Meurice, G., ... & Heidmann, T. (2017). An endogenous retroviral envelope syncytin and its cognate receptor identified in the viviparous placental Mabuya lizard. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(51), E10991-E11000.
- Mi, S., Lee, X., Li, X. P., Veldman, G. M., Finnerty, H., Racie, L., ... & Keith Jr, J. C. (2000). Syncytin is a captive retroviral envelope protein involved in human placental morphogenesis. *Nature*, 403(6771), 785.
- Moran, N. A., & Jarvik, T. (2010). Lateral transfer of genes from fungi underlies carotenoid production in aphids. *Science*, 328(5978), 624-627.

Vargas, A., Moreau, J., Landry, S., LeBellego, F., Toufaily, C., Rassart, É., ... & Barbeau, B. (2009). Syncytin-2 plays an important role in the fusion of human trophoblast cells. *Journal of molecular biology*, 392(2), 301-318.

Pistes bibliographiques

Éric Baptiste, *Tous entrelacés ! : Des gènes aux super-organismes : les réseaux de l'évolution*, Paris, Belin, 2017, 359 p.

Bianca Sclavi et John Herrick Microorganismes : une évolution collective Bianca Sclavi et John Herrick, *Pour la Science* n° 469 novembre 2016

H. Le Guyader, « L'arbre du vivant cachait une forêt » *Pour la Science* n° 469 novembre 2016

Éric Tannier, Bastien Boussau et Vincent Daubin, « Quand les branches de l'arbre du vivant s'entremêlent », *Pour la Science*, n° 506, décembre 2019, p. 56-65

Marc-André Selosse, *Des organismes chimériques : le sexe « lent » des eucaryotes. Aux origines de la sexualité*, chapitre 3, pp. 46 à 67, Fayard.

Unité 3

Pistes bibliographiques

Marc-André Selosse, *La symbiose, structures et fonctions, rôle écologique et évolutif*. Vuibert, 2000. 154 pp.

Bianca Sclavi et John Herrick Microorganismes : une évolution collective Bianca Sclavi et John Herrick, *Pour la Science* n° 469 novembre 2016

Corrigé des parcours des unités

Unité 1

> Éléments de correction

La production attendue est un exposé oral, avec ou sans support écrit (vidéo projection, schéma au tableau). Durée proposée pour l'exposé : cinq minutes.

Cet exposé devra présenter une courte introduction (trois ou quatre phrases au maximum), un développement s'appuyant sur les documents de la double page et une courte conclusion.

On pourra ou non suggérer aux élèves de s'appuyer sur des figures (projectées ou refaites au tableau) : expériences de Griffith, Avery et Mac Leod ; schéma de synthèse des différents modes de transports horizontaux sur les bactéries ; exemples de transgénèse bactérienne. Ces figures peuvent être fournies par l'enseignant ou demandées dans la production et attendues de la part des élèves. Dans ce cas, on s'attachera à évaluer la qualité de l'articulation du discours par rapport à l'exploitation de la figure (présentation puis étude du contenu de la figure, analyse et interprétation).

Dans l'hypothèse d'un exposé sans support visuel, l'évaluation devra tenir compte de la difficulté d'évoquer les expériences ou les exemples de transferts génétiques horizontaux uniquement à l'oral.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• ne présente pas les modalités de mise en évidence des transferts génétiques horizontaux chez les bactéries• ne présente pas les conséquences pour les humains	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les liens de cause à effet ne sont pas clairs dans l'interprétation des expériences.• Les informations ne sont pas (ou partiellement) mises en relation	Démarche à la fois pertinente et cohérente. <ul style="list-style-type: none">• Les informations des documents ont été exploitées et mises en relation.• Les conséquences pour les humaines des transferts horizontaux sont clairement exposées.
Contenu Eléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• ne s'appuie pas sur les données expérimentales• ne donne pas d'exemple d'application	Complets ou suffisants	
Communication Diaporama	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• L'exposé n'est pas correctement structuré• L'exposé ne précise pas l'origine des informations citées• L'exposé ne s'appuie pas sur les supports visuels (le cas échéant)	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Quelques maladresses dans la structuration de l'exposé• L'exposé est correct mais mal articulé avec les supports visuels	Le discours est bien structuré et cohérent par rapport aux éventuelles figures présentées

Pour rappel

- L'évaluation de la **démarche** repose sur la pertinence (qui répond la question posée) et la cohérence (pas de grosses erreurs, enchaînement logique des idées et mise en relation correcte des informations).
- L'évaluation du **contenu** repose sur la suffisance (assez d'éléments, quand les attendus sont nombreux) et la complétude (tous les éléments, quand ils sont peu nombreux, sont présents).
- L'évaluation de la **communication** repose sur la précision (utilisation d'unités de valeur, de données et d'arguments précis), la clarté (sens et lisibilité du texte, du discours ou du schéma) et la conformité (respect des règles d'usage dans la construction du texte, du schéma ou du discours).

Unité 2

> Éléments de correction

La production attendue est un exposé oral, avec ou sans support écrit (vidéo projection, schéma au tableau). Durée proposée pour l'exposé : cinq minutes.

Cet exposé devra présenter une courte introduction (trois ou quatre phrases au maximum), un développement s'appuyant sur les documents de la double page et une courte conclusion.

Sur le fond, les exposés doivent faire apparaître les notions suivantes :

- les organismes donneurs de gènes sont en interaction avec les organismes receveurs : le virus MPMV est à l'origine d'infections des cellules eucaryotes (interaction parasitaire), les champignons vivent sur les plantes où se trouve les pucerons ;
- I événements de transferts génétiques horizontaux peuvent être rares (comparés aux transferts génétiques horizontaux chez les bactéries vus dans l'unité 1) mais s'ils apportent un nouveau caractère qui peut être sélectionné, ils peuvent se répandre dans une population au fil des générations ;
- un même caractère peut se retrouver chez des organismes peu apparentés puisque les transferts génétiques horizontaux s'affranchissent de la reproduction et des isolements reproducteurs (exemple de la syncytine doc. 5).

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• ne s'appuie(nt) pas sur les données des documents• ne présente pas clairement ce qui est tiré des documents et ce qui appartient au scénario proposé	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• ne s'appuie que partiellement sur les documents• n'organise pas son propos de façon à faire apparaître les étapes du scénario et les liens de causes à conséquences.	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Eléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple, le(s) scénario(s) : <ul style="list-style-type: none">• n'explique pas l'existence de syncytine chez des organismes peu apparentés• ne donne(nt) pas les conséquences évolutives (convergence par exemple)• n'explique pas l'origine de caractères originaux difficilement explicable par les mécanismes de reproduction	Complets ou suffisants	

Communication Exposé	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none"> • L'exposé n'est pas correctement structuré • L'exposé ne précise pas l'origine des informations citées • L'exposé ne s'appuie pas sur les supports visuels (le cas échéant) 	Par exemple : <ul style="list-style-type: none"> • Quelques maladresses dans la structuration de l'exposé • L'exposé est correct mais mal articulé avec les supports visuels 	Le discours est bien structuré et cohérent par rapport aux éventuelles figures présentées
--------------------------------	--------------	--	--	---

Unité 3

> Éléments de correction

La forme attendue est un texte. Ce dernier peut être ou non illustré de schéma. Il doit présenter une courte introduction, une courte conclusion répondant en synthèse à la question. Dans le développement, les notions clés doivent être séparées et s'enchaîner logiquement. Le texte doit faire référence aux documents de la double page. Si l'élève a choisi de faire un schéma, les informations qu'il contient, sans être redondantes avec le texte, doivent être articulées avec celui-ci. Le schéma, le cas échéant, doit être correctement titré et légendé.

En ce qui concerne le contenu, on attend du texte qu'il rappelle :

- l'existence de la théorie endosymbiotique (doc. 4) ;
- les différents arguments qui soutiennent cette théorie (indices de l'origine bactérienne des mitochondries et des chloroplastes) (doc. 1 à 5).

Les conséquences de ces endosymbioses (transfert des gènes vers le noyau, acquisition de nouveau caractère apporté par ces organites) ne sont pas explicitement demandées mais peuvent être évoquées.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• ne s'appuie(nt) pas sur les données des documents• ne sépare pas ce qui appartient aux données ce qui appartient la théorie	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• ne s'appuie que partiellement sur les documents• suppose l'endosymbiose comme un acquis et non comme une théorie.	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Eléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• n'évoque pas l'existence d'une théorie permettant de mettre en cohérence les observations• ne présente pas les observations faites sur les organismes comme des indices confirmant l'hypothèse de l'endosymbiose	Complets ou suffisants	
Communication Texte	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Le texte n'est pas correctement structuré (séparation des idées, enchaînement logique)• Le texte ne précise pas l'origine des informations citées	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Quelques maladresses dans la structuration du texte• Le texte est correct mais mal articulé avec les éventuels supports visuels	Le texte est bien structuré et cohérent par rapport aux éventuelles figures présentées

Propositions de parcours « pas-à-pas » pour les unités en tâche complexe

Unité 1

Question 1. Décrire puis interpréter les expériences de F. Griffith (doc. 1).

Griffith réalise quatre types d'expériences qui correspondent aux quatre lignes du tableau. Les trois premières expériences (trois premières lignes) sont des expériences témoins :

- la première expérience montre que les pneumocoques S vivants sont virulents (ils provoquent la mort des souris). Par ailleurs, ils se multiplient et survivent dans l'organisme puisqu'ils sont très nombreux dans le sens des souris mortes en fin d'expérience ;
- la deuxième expérience montre que les pneumocoques R vivants ne posent pas de problème de santé apparent aux souris. Ils ne provoquent pas leur mort et ne se multiplient pas. Il semble que le système immunitaire des souris les élimine ;
- la troisième expérience montre que les pneumocoques S tués ne sont plus virulents et ne se multiplient plus.

Dans la quatrième expérience, Griffith met en présence deux souches de pneumocoques dont les expériences témoins montrent qu'ils ne sont pas virulents : les pneumocoques R vivants et les pneumocoques S tués. De façon surprenante, l'association de ces deux types de bactéries provoque la mort des souris et l'analyse du sang montre que des pneumocoques S vivants s'y sont développés.

Si l'on considère qu'il n'est pas possible aux pneumocoques S d'être à nouveau vivant, ce sont nécessairement les pneumocoques R qui se sont transformés en pneumocoques S. Les pneumocoques S tués apportent donc un « facteur transformant » permettant aux pneumocoques R, normalement non virulents de devenir virulents.

Question 2. Décrire puis interpréter les expériences d'Avery et Mac Leod (doc. 2).

Les expériences d'Avery et Mac Leod visent à caractériser la nature biochimique du facteur transformant mis en évidence par Griffith. Les auteurs reprennent la quatrième expérience de Griffith (doc. 1) et réalisent trois catégories d'expériences à partir des extraits de pneumocoques S tués. Ils traitent ces extraits de façon à détruire spécifiquement soit les protéines, soit l'ADN, soit l'ARN. Dans un second temps, ils mettent en contact ces extraits privés d'une des trois catégories de molécules avec des pneumocoques R vivants.

On constate que seule la destruction de l'ADN permet d'empêcher la transformation des pneumocoques R vivants en pneumocoques S. Cela suggère que l'ADN est le support d'une information permettant la transformation des pneumocoques R en S : c'est le facteur transformant de Griffith.

Question 3. Décrivez les différents types de transfert de gènes. Déterminez quel type de transfert de gènes les expériences de Griffith, Avery et Mac Leod ont mises en évidence (doc. 1, 2 et 3).

D'après le doc. 3, on constate qu'il existe trois types de transfert de gènes décrit chez les bactéries :

- la transformation : de l'ADN présent dans le milieu provenant de bactéries mortes est intégré par une bactérie receveuse dans son génome ;
- le transfert viral : de l'ADN d'une bactérie prélevé par un virus (phage) est transmis à une autre bactérie lors de son infection par le virus ;
- la conjugaison : de l'ADN est échangé directement via un pont entre les deux bactéries.

Dans les expériences des doc. 1 et 2, les pneumocoques R sont transformés en pneumocoques S en présence de pneumocoques S tués. C'est donc probablement l'ADN des pneumocoques S tués qui est incorporé aux pneumocoques R et réalise leur transformation. Il s'agit donc d'une transformation bactérienne.

Question 4. Expliquer le rôle des transferts génétiques horizontaux dans le cas de la résistance aux antibiotiques d'*A. baumanii* (doc. 4 et 5).

Dans le doc. 4, on constate qu'*Acinetobacter baumanii* est une bactérie capable de lyser d'autres bactéries. En tuant ses bactéries, elle libère dans l'environnement leur ADN. Elle peut donc par transformation intégrer de l'ADN des bactéries qu'elle a lysées.

D'après le doc. 5, une expérience montre qu'*Acinetobacter baumanii* est capable d'acquérir la résistance à la kanamycine portée par *E. coli* à la suite de 19 heures de co-culture. Les expériences 1 et 2 représentent des témoins négatifs. Par ailleurs, on constate qu'il y a une baisse du nombre bactéries *Escherichia coli* ce qui suggère qu'elles sont tuées par *Acinetobacter baumanii*. On peut donc en déduire que cette bactérie est capable d'acquérir des résistances aux antibiotiques possédées par les bactéries qu'elle a tuées. Cette acquisition se fait par intégration de leur ADN (transformation).

Ces expériences fournissent une explication aux multi-résistances aux antibiotiques fréquemment observées chez *Acinetobacter baumanii*.

Question 5. Après avoir décrit la transgénèse, montrer que cette technologie est un transfert génétique horizontal particulier (doc. 6).

La transgénèse consiste à extraire de l'ADN d'une cellule donneuse (une cellule humaine dans cet exemple) et à l'insérer dans le génome d'une cellule donneuse (le plasmide d'une bactérie *Escherichia coli* dans cet exemple). Les bactéries transformées vont alors exprimer l'information portée par cet ADN (produire de l'insuline dans cet exemple).

L'action humaine mime donc un phénomène existant naturellement (la transformation), à la différence près que les séquences génétiques à insérer sont spécifiquement choisies pour leur fonction (ici la production d'insuline) et l'organisme transformé cultivé dans des conditions favorisant l'expression du gène d'intérêt.

Question 6. Écrire un court texte utilisant les documents de la double page et faisant le bilan des transferts génétiques horizontaux chez les bactéries (doc. 1 à 6).

Les documents montrent donc l'existence de transfert d'ADN entre bactéries de la même génération. Ces transferts sont appelés transferts génétiques horizontaux. Les informations portées par ces ADN peuvent toucher à la virulence des bactéries (cas des pneumocoques), à leur résistance aux antibiotiques (cas d'*yAcinetobacter baumanii*) ou à des manipulations biotechnologiques (transgénèse) réalisées au laboratoire (production de l'insuline humaine par *Escherichia coli*). Ces transferts génétiques horizontaux peuvent prendre des formes variées : transformation, transfert viral, conjugaison.

Unité 2

Question 1. Expliquer la fonction de la syncytine dans la formation du placenta et ses points communs avec la protéine d'enveloppe du virus MPMV (doc. 2, 3 et 4).

La syncytine est une protéine membranaire que l'on trouve chez de nombreux vertébrés qui permet la fusion des membranes à l'origine de la formation du placenta. Chez les virus MPMV, les protéines présentes sur les enveloppes périphériques permettent de fusionner ces enveloppes avec les membranes plasmiques et de pénétrer à l'intérieur des cellules.

Le doc. 3 montre que cette ressemblance fonctionnelle s'accompagne d'une ressemblance structurale : il y a de nombreux points communs dans la séquence d'acides aminés (les séquences comparées sont identiques à 80 %) ce qui suggère une parenté entre ces molécules.

Question 2. Proposer une hypothèse pour expliquer que des organismes appartenant à des groupes très différents possèdent des syncytines apparentées (doc. 1, 3 et 5).

Les points communs entre les syncytines et les protéines d'enveloppe du virus MPMV montrent un apparentement probable entre ces molécules. Cela suggère que les gènes portés par le virus ont pu être transmis dans de nombreux groupes de vertébrés, ce qui expliquerait que l'on retrouve ces protéines dans des groupes assez éloignés.

Question 3. Expliquer l'origine et le maintien des différentes couleurs chez le puceron vert du pois (doc. 6 et 7).

La couleur chez le puceron vert du pois est due à des pigments caroténoïdes. Or d'après le doc. 7, les enzymes nécessaires à la synthèse de ces pigments sont apparentées à celles de champignons (leur séquence est proche des enzymes similaires que l'on observe chez les champignons du genre *Mucor*). Ceci suggère qu'il y a eu un transfert génétique horizontal des gènes à l'origine de ces enzymes depuis les champignons vers les pucerons. L'expression de ces gènes permet la production des pigments et serait à l'origine des différentes couleurs des pucerons.

Si une couleur donnée des pucerons favorisait leur prédation, elle disparaîtrait au fil des générations. À l'inverse, si une couleur donnée des pucerons les protégeait de leur prédateur, elle serait sélectionnée et deviendrait dominante dans les populations de pucerons. Or les différentes couleurs se maintiennent au sein des populations. Le doc. 6 explique que, selon leur couleur, les pucerons font l'objet d'une prédation différentielle. Cette différence de pression de prédation selon la couleur pourrait expliquer le polymorphisme de couleur observée chez pucerons et son maintien.

Question 4. Écrire un court bilan sur les transferts génétiques horizontaux à partir des informations fournies par les différents documents (doc. 1 à 8).

À travers l'exemple du virus MPMV, on constate que l'interaction parasitaire de celui-ci avec de nombreux vertébrés (doc. 2) a pu mener ponctuellement à l'acquisition du gène de la syncytine chez quelques-uns d'entre eux (doc. 3 et 5). La protéine issue de ce gène, la syncytine, responsable de la fusion de l'enveloppe du virus et des membranes cellulaires, permet également la fusion des cellules par leurs membranes plasmiques, à l'origine des placentas (certains mammifères dont les humains, lézard mabuya) (doc. 1 et 4).

De la même façon, les pucerons du pois ont pu acquérir, au contact des champignons, les gènes permettant la synthèse de pigments caroténoïdes (doc. 7) leur donnant une couleur rose (doc. 6). Cette couleur (et les gènes associés) a été sélectionnée car elle permet de réduire l'impact de la prédation par les coccinelles (doc. 6).

On constate donc que l'acquisition de gènes par transferts génétiques horizontaux confère de nouvelles caractéristiques aux organismes receveurs, ces dernières étant transmissibles aux générations suivantes. Il s'agit d'un mécanisme de transfert de gènes différent de la reproduction sexuée (doc. 8). Les gènes peuvent donc non seulement être transmis par hérédité (les filiations sont représentées sous forme d'un arbre) mais également par des transferts génétiques horizontaux, certes moins fréquents (ce qui contribue à transformer l'arbre en réseau).

Unité 3

Question 1. Relever les arguments soutenant une origine bactérienne des chloroplastes et des mitochondries (doc. 1 à 5).

Voici quelques arguments qui peuvent être extraits de la double page :

- Les mitochondries se divisent comme des bactéries de façon indépendante de la cellule eucaryote qui les contient (doc. 2).
- Les mitochondries et les chloroplastes possèdent deux membranes, contrairement aux autres organites, ce qui suggère que la membrane externe est une membrane de la cellule eucaryote entourant la bactérie (doc. 3).
- Les membranes des mitochondries et des chloroplastes possèdent des lipides typiquement bactériens (doc. 3).
- La transcription et la traduction des gènes sont simultanées comme les bactéries (doc. 3).
- Les mitochondries et les chloroplastes ont leur propre génome sous forme d'ADN et leurs propres ribosomes (doc. 3).
- Les ribosomes des mitochondries et des chloroplastes sont de type bactérien (doc. 3).
- Les séquences génétiques des mitochondries et des chloroplastes sont apparentées à celle des bactéries (doc. 5).

Question 2. Justifier qu'un eucaryote possède plusieurs génomes (doc. 3 et 5).

Un eucaryote possède son génome sous forme d'ADN contenu dans le noyau (génome nucléaire) et de l'ADN contenu dans les mitochondries (génome mitochondrial). Les végétaux, qui possèdent en plus des chloroplastes, ont un troisième génome : le génome chloroplastique.

Question 3. Expliquer la position des différents génomes du maïs sur l'arbre du vivant (doc. 5).

Le maïs possède trois génomes : un génome nucléaire, un génome mitochondrial et un génome chloroplastique. On constate que le génome nucléaire est localisé dans l'arbre du vivant avec les eucaryotes (il leur est donc apparenté), tandis que les génomes mitochondrial et chloroplastique sont apparentés aux génomes bactériens.

L'explication la plus parcimonieuse consiste à considérer que les génomes de ces organites ont une origine bactérienne et par conséquent les organites eux-mêmes ont une origine bactérienne. On peut donc supposer que le génome nucléaire est hérité par transfert vertical (reproduction sexuée ou asexuée) tandis que les génomes des organites ont été hérités par transfert génétique horizontal (endosymbiose) chez un ancêtre commun aux eucaryotes puis transmis par reproduction sexuée ou asexuée.

Question 4. Quelles sont les conséquences pour les génomes des organites et du noyau de l'endosymbiose (doc. 6 et 7).

D'après le doc. 7, on constate que depuis l'acquisition des chloroplastes, le noyau des eucaryotes a acquis un grand nombre de gènes (1400) initialement possédés par la cyanobactérie ancestrale (ayant subi l'endosymbiose) tandis que le chloroplaste n'a gardé qu'environ 87 gènes. Ces gènes intégrés au

génome nucléaire chez l'arabette des dames ainsi que d'autres gènes nucléaires sont à l'origine de 2300 protéines qui seront importées par le chloroplaste.

On constate donc qu'il existe de nombreux transferts de gènes du génome des organites vers le génome nucléaire. Le génome restant dans les chloroplastes est donc très éloigné de celui de la cyanobactérie ancestrale qui a subi l'endosymbiose.

Question 5. Écrire un court bilan sur l'endosymbiose des chloroplastes et des mitochondries (doc. 1 à 7).

Il existe aujourd'hui de très nombreux arguments (doc. 1 à 5) permettant de confirmer la théorie endosymbiotique formulée par A. Schimper et L. Margulis (doc. 4). On peut considérer le scénario suivant : une α -protéobactérie (doc. 5) a été intégrée dans le cytoplasme de l'ancêtre des eucaryotes ; elle est restée entourée d'une membrane (ce qui explique la double membrane des mitochondries) ; elle a perdu (doc. 6) une partie de ces gènes au profit du génome nucléaire de la cellule hôte. Elle est alors devenue une mitochondrie, c'est-à-dire un organite gardant quelques caractères bactériens (génome, ribosomes, transcription traduction etc. ; doc. 1 et 3).

Un scénario similaire peut être imaginé pour les cellules eucaryotes à l'origine des organismes photosynthétiques : une cyanobactérie (doc. 5) a été intégrée dans le cytoplasme de l'ancêtre de ces organismes, elle a gardé une seconde membrane, ses caractéristiques bactériennes (doc. 3) et perdus de nombreux gènes (doc. 6 et 7). Ces cyanobactéries sont devenues des chloroplastes chez les végétaux.

Corrigés des exercices

Exercice 2

1. Le doc. 3 montre que les nématodes phytophages ne sont pas apparentés, ce qui paraît surprenant car le doc. 2 nous apprend que de nombreuses enzymes spécifiques sont nécessaires pour dégrader les composés de la paroi végétale.

2. On peut donc supposer que les gènes de ces nématodes ont été hérités par des transferts génétiques horizontaux. L'étude des enzymes polygalacturonases des nématodes phytophages montre que celles-ci ont des séquences proches de celles des bactéries *Ralstonia*. On peut donc supposer qu'il y a eu des transferts génétiques horizontaux des gènes correspondant à ces enzymes entre cette bactérie et les différents groupes de nématodes phytophages.

3. On peut supposer que les ancêtres des nématodes phytophages étaient des nématodes bactériophages se nourrissant des bactéries du sol comme *Ralstonia* à proximité des racines. Ils ont hérité de leur proie les gènes codant les enzymes polygalacturonases. Ces derniers leur permettent d'exploiter les composés des parois végétales des racines situées dans le même environnement.

Exercice 3

1. Le génome dans le stroma du chloroplaste est d'origine cyanobactérienne, le génome du nucléomorphe provient d'une algue verte eucaryote, le génome mitochondrial provient d'une bactérie (α -protéobactérie) intégrée, comme le chloroplaste, par une endosymbiose.

2. Puisque le plastide présente des caractéristiques de cyanobactéries, on peut imaginer qu'il a été intégré par une première endosymbiose comme chloroplaste à une algue verte dont le nucléomorphe

serait le reste du noyau. Lors d'une seconde endosymbiose (peut-être suite à une phagocytose), cette algue verte a formé à son tour un chloroplaste à quatre membranes au sein de l'amibe, son noyau ayant dégénéré en nucléomorphe.

3. Lors des endosymbioses, il est fréquent qu'il y ait des échanges entre les génomes des différents partenaires. Une partie importante des gènes des endosymbiotes étant transférés vers le noyau.

4.

- A. membrane d'origine de la cyanobactérie de la première endosymbiose.
- B. membrane de phagocytose ou de digestion de la première endosymbiose.
- C. membrane plasmique de l'algue verte subissant la seconde endosymbiose.
- D. membrane externe du chloroplaste pouvant être le reste de la membrane de phagocytose lors de l'internalisation de l'algue verte (endosymbiose secondaire).
- E. membrane plasmique de l'amibe.

5. Cette amibe étant un prédateur, on peut imaginer qu'une partie des gènes de ses proies a été intégrée au fil du temps dans son génome.

Exercice 4

On constate que les facteurs de virulence sont portés par des éléments génétiques susceptibles d'être échangé avec d'autres bactéries : îlot de pathogénicité, génome de phage (échangeable par transduction) et plasmides (échangeable par conjugaison). On peut donc supposer que des souches pathogènes puissent transférer à des souches non pathogènes les gènes responsables de la virulence, formant ainsi une nouvelle souche pathogène.

Exercice 5

Quelques éléments de correction

Connaissances : *en bleu*

Chez les bactéries, on connaît trois types de transferts génétiques horizontaux : la transformation (acquisition de gènes provenant d'organismes morts est présent dans l'environnement des bactéries), le transfert par des virus (les virus transportent dans leur génome des extraits de gènes provenant des différentes cellules infectées), la conjugaison (des ponts cytoplasmiques entre bactéries permettent l'échange de matériel génétique).

Si les transferts de gènes horizontaux sont très fréquents chez les bactéries (et sont par exemple à l'origine de la résistance aux antibiotiques), ils sont plus rares chez les eucaryotes mais peuvent avoir des conséquences évolutives importantes. C'est le cas notamment des transferts de gènes ayant eu lieu entre mitochondries, chloroplaste et les génomes nucléaires dans l'histoire des eucaryotes suite à leur endosymbiose.

D'après les biologistes B. F. Smets et T. Barkay, quels que soient les organismes impliqués dans les transferts génétiques horizontaux, les étapes permettant ces transferts peuvent être classés en 5 catégories, soit, chronologiquement : (1) la préparation de l'ADN dans la cellule donneuse ; (2) le transfert d'une cellule à l'autre (par contact physique ou non) ; (3) l'entrée dans les cellules de l'organisme receveur ; (4) l'intégration de l'ADN donneur au génome de l'organisme receveur, permettant aux gènes de l'organisme donneur d'être exprimés ; (5) éventuellement la transmission par transferts génétiques verticaux (reproduction) aux générations suivantes.

Exercice 6 (Bac type 1)

Quelques éléments de correction

Connaissances : en bleu

Les transferts génétiques horizontaux sont des échanges d'ADN entre des organismes non apparentés de la même génération. Ils s'opposent aux transferts génétiques verticaux (héritage d'ADN d'une génération à l'autre par la reproduction). Ces transferts génétiques horizontaux, d'abord décrits chez les bactéries, peuvent être responsables de l'acquisition d'une résistance aux antibiotiques chez ces dernières.

La transgénèse, une biotechnologie, permet de transférer des gènes d'un organisme vers un autre. C'est le cas par exemple du transfert du gène de l'insuline humaine vers une bactérie pour la production industrielle de cette hormone.

Enfin, dans l'histoire évolutive des humains, on connaît plusieurs transferts horizontaux. Par exemple, la syncytine, une protéine permettant la formation du placenta, a été héritée d'un transfert génétique horizontal depuis un virus.

La thérapie génique, est une technique biomédicale encore au stade expérimental qui, à l'aide de transferts génétiques ciblés dans l'organisme humain, permet de corriger des maladies génétiques, telles que la mucoviscidose, la myopathie de Duchenne, etc.

Exercice 7

La capacité des Japonais à digérer les glucides spécifiques des algues rouges comme la nori leur est apportée probablement par la possession des enzymes permettant d'attaquer ces glucides : agarases, porphyranases et carraghénases.

D'après le doc. 3, on constate, chez cinq individus japonais, qu'une bactérie de leur tube digestif, *B. plebeius*, possède des séquences génétiques correspondant à certaines de ces enzymes. Tous les individus ne possèdent pas toutes les enzymes : on constate que l'individu 1 possède trois séquences proches des porphyranases, mais aucune séquence proche des agarases ; au contraire l'individu 4 possède des séquences d'agarases, mais pas de séquence de porphyranases.

Il est surprenant de constater qu'une bactérie intestinale possède des séquences de ces enzymes, que l'on trouve habituellement chez des bactéries marines. L'arbre phylogénétique du doc. 2 nous montre que ces séquences sont en fait apparentées à des séquences d'une bactérie marine, *Z. galactanovirans*. On peut donc supposer qu'il y a eu un transfert génétique horizontal depuis la bactérie marine *Z. galactanovirans* vers la bactérie *B. plebeius*.

Cet apparentement confirme les données du tableau : les séquences des porphyranases observées chez les humains sont partiellement apparentées à celle des bactéries marines (31 à 42 % d'identité) et celles des agarases également (51 à 59 % d'identité).

On peut donc proposer le scénario suivant : la consommation d'algues rouges, fréquente au Japon, possédant à leurs surfaces des bactéries marines *Z. galactanovirans* a mis en contact ces dernières avec les bactéries du tube digestif humain *B. plebeius*. Des transferts de gènes horizontaux entre les bactéries ont pu avoir lieu dans le tube digestif humain permettant à *B. plebeius* d'acquérir la capacité à produire les enzymes dégradants les glucides des parois des algues rouges. Cette capacité apportant un avantage sélectif elle a été maintenue au cours du temps.

Remarque

Avec les informations présentées, on ne peut pas savoir si ces transferts génétiques horizontaux se sont produits de nombreuses fois ou bien s'ils se sont produits rarement et les bactéries résultantes se sont ensuite répandues dans la population. On ne peut pas non plus dater ces acquisitions : ont-elles eu lieu chez les ancêtres des populations humaines actuelles puis ont été transmises de génération en génération ? Ou bien sont-elles récentes et se reproduisent-elles toujours aujourd'hui ?

Exercice 8

On constate que, pour des acides aminés identiques, les voies de synthèse chez les deux espèces de cochenilles sont également semblables (en nombre d'étapes). Toutefois, l'origine génétique des enzymes est très différente. Concernant la synthèse du tryptophane par exemple, chez *P. avanae* toutes les enzymes sont produites à partir des gènes du β -symbiose tandis que chez *P. citri* plusieurs enzymes sont codées par des gènes du γ -symbiose. On peut reproduire des observations similaires sur la plupart des autres voies de synthèse des acides aminés : celles-ci reposent sur des origines génétiques très variées chez *P. citri*, alors qu'elle repose pour l'essentiel sur le β -symbiose chez *P. avanae*.

Par ailleurs, on constate qu'une partie de ces enzymes sont produits par le noyau de l'insecte ou par des transferts de gènes provenant d'autres bactéries. Les endosymbioses sont des contextes favorables aux transferts de gènes horizontaux. En l'occurrence, *P. citri* présente deux niveaux d'endosymbiose (le γ -symbiose est en endosymbiose avec le β -symbiose lequel est en endosymbiose avec les bactériocytes de la cochenille) susceptibles de générer davantage de transfert de gènes.

On peut donc supposer pour conclure que la diversité des voies métaboliques chez les cochenilles résulte tout à la fois de la diversité des endosymbioses et de l'existence de transferts génétiques horizontaux consécutifs à ces endosymbioses ainsi qu'à d'autres interactions.

Chapitre 3. L'inéluctable évolution des génomes au sein des populations

Ce chapitre présente les mécanismes de l'évolution des génomes au sein des populations. Il s'agit d'un approfondissement des concepts abordés notamment en 2^{nde} (sélection naturelle, dérive génétique et spéciation).

Thème 1. La Terre, la vie et l'organisation du vivant Génétique et évolution	
Connaissances	Capacités, attitudes
<p>Dans les populations eucaryotes à reproduction sexuée, le modèle théorique de Hardy-Weinberg prévoit la stabilité des fréquences relatives des allèles dans une population.</p> <p>> Unité 1</p> <p>Mais, dans les populations réelles, différents facteurs empêchent d'atteindre cet équilibre théorique : l'existence de mutations, le caractère favorable ou défavorable de celles-ci, la taille limitée d'une population (effets de la dérive génétique), les migrations et les préférences sexuelles.</p> <p>> Unités 2 à 4</p> <p>Les populations sont soumises à la sélection naturelle et à la dérive génétique. À cause de l'instabilité de l'environnement biotique et abiotique, une différenciation génétique se produit obligatoirement au cours du temps. Cette différenciation peut conduire à limiter les échanges réguliers de gènes entre différentes populations. Toutes les espèces apparaissent donc comme des ensembles hétérogènes de populations, évoluant continuellement dans le temps.</p> <p>> Unités 3 et 4</p>	<p>Comprendre et identifier les facteurs éloignant de l'équilibre théorique de Hardy-Weinberg, notamment l'appariement non-aléatoire, la sélection, la population finie (dérive).</p> <p>> Unités 1 à 4</p> <p>Extraire, organiser et exploiter des informations sur l'évolution de fréquences alléliques dans des populations. > Unités 1 à 4</p> <p>Questionner la notion d'espèce en s'appuyant sur les apports modernes du séquençage de l'ADN. > Unité 5</p>

Compétences travaillées et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
Pratiquer des démarches scientifiques <ul style="list-style-type: none"> Formuler et résoudre une question ou un problème scientifique. Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 3 et 4 Exercices 7 et 8 • Exercice 2, 4 Unité 1 et 2
Concevoir, créer, réaliser <ul style="list-style-type: none"> Concevoir et mettre en œuvre un protocole. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exercice 8
Pratiquer des langages <ul style="list-style-type: none"> Communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant. Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique. Utiliser des logiciels d'acquisition, de simulation et de traitement de données 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 5 • Unité 2 Exercices 5 et 6 • Unité 1
Adopter un comportement éthique et responsable <ul style="list-style-type: none"> Comprendre les responsabilités individuelle et collective en matière de préservation des ressources de la planète (biodiversité, ressources minérales et ressources énergétiques) et de santé. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exercice 3

Choix pédagogiques

Le découpage de ce chapitre suit globalement les points du programme. Les deux premières unités se penchent sur l'équilibre de Hardy-Weinberg en lien avec l'enseignement scientifique de terminale. Les unités 2 et 3 s'intéressent à la dérive génétique et à la sélection naturelle, avec pour objectif de démontrer que la différenciation génétique qui en résulte peut aboutir à limiter les échanges génétiques. Enfin, l'unité 5 permet de se pencher de manière plus précise sur les apports modernes du séquençage de l'ADN pour définir une espèce. À noter que la notion de spéciation apparaît en filigrane durant ce chapitre, et que les barrières à la reproduction, prézygotique et postzygotique, sont évoquées de manière indirecte puisqu'elles ne font pas parties des connaissances exigibles.

Unité 1

> Cette unité présente le modèle théorique de Hardy-Weinberg. Le **document 1** démontre que les fréquences alléliques n'évoluent pas d'une génération à l'autre. Les élèves pourront à l'aide du questionnement calculer la fréquence des allèles de la génération $n+1$ en utilisant une fréquence de départ $p = 0,7$. Ce document insiste sur la différence entre fréquence allélique et fréquence génotypique.

> Le **document 2** présente les conditions nécessaires à l'équilibre de Hardy-Weinberg. On distingue ici la structure génétique de Hardy-Weinberg ($p^2 + 2pq + q^2$) qui permet de connaître la répartition des différents génotypes selon la fréquence des allèles, et l'équilibre de Hardy-Weinberg qui stipule que les fréquences alléliques et génotypiques sont stables dans le temps. Sur ce point important mais délicat, on lira avec profit l'article suivant, téléchargeable à l'adresse <http://www.ipubli.inserm.fr/handle/10608/964> :

J. Génermont, « Loi et équilibre de Hardy-Weinberg », *Médecine/sciences* 14 : 1301-1304 (1998)

> Le **document 3** permet de démontrer mathématiquement cette stabilité en la modélisant de manière simple.

> Le **document 4** présente la méthode pour tester la structure génétique d'une population. Le questionnement associé permet de bien distinguer structure génétique et stabilité des fréquences alléliques.

Unité 2

> Cette unité permet de revenir sur quelques facteurs susceptibles de perturber l'équilibre de Hardy-Weinberg. Le **document 1** présente une expérience historique de Tessier et L'Héritier basée l'introduction d'une mutation dans une population de drosophiles. On peut ainsi démontrer que la sélection naturelle perturbe l'équilibre de Hardy-Weinberg.

> Le **document 2** évoque lui aussi la sélection naturelle dans l'exemple classique de la résistance des moustiques aux insecticides. On pourra, à partir des données, vérifier si la structure génétique de Hardy-Weinberg est respectée et observer l'évolution des fréquences alléliques.

> Le **document 3** présente un exemple d'autopollinisation partielle chez le lamier qui conduit à une surabondance des génotypes homozygotes au détriment des hétérozygotes. Dans ce cas, sans panmixie, la structure génétique de Hardy-Weinberg n'est pas atteinte.

> Enfin, le **document 4** présente une expérience historique qui met en évidence l'effet de la dérive génétique sur la fréquence de l'allèle bw⁷⁵.

Unité 3

> Cette unité propose des documents permettant d'envisager comment la dérive génétique peut à terme amener à la formation de 2 espèces. L'exemple choisi ici concerne les souris de l'île de Madère qui n'évoque pas les fréquences alléliques mais des modifications au niveau du caryotype, conservées par dérive (pour référence : <https://www.mnhn.fr/fr/explorez/dossiers/evolution-vivant/mecanismes-evolution/derive-selection-naturelle-moteurs-stabilite-changement>).

> Le **document 1** présente les caryotypes des différentes populations de l'île mais aussi les obstacles géographiques qui limitent les échanges génétiques entre chaque population, localisées le long des côtes.

> Le **document 2** montre comment la fusion de certains chromosomes permet d'envisager une réduction du nombre de chromosomes dans les populations de souris de Madère. Cette fusion n'apportant pas d'avantage évolutif, on pourra ici évoquer la dérive génétique comme mécanisme évolutif en jeu. Il faut noter que les caryotypes ne sont pas exactement à la même échelle, on pourra utiliser les chromosomes sexuels comme repères de taille pour constater qu'en réalité les chromosomes fusionnés sont bien plus grands que les chromosomes des souris continentales.

> Le **document 3** compare la fécondité de différentes populations de souris de Madères. Le fait que les hybrides aient une fertilité faible s'explique par le nombre plus important de gamètes possédant un nombre anormal de chromosomes. On pourra s'appuyer sur les connaissances sur la méiose pour expliquer ces observations.

> Les **documents 4 et 5** permettent de reconstituer, via des données génétiques, l'origine probable des souris de Madères.

> Enfin le **document 6** permet de comprendre comment l'isolement reproducteur pourrait à terme entraîner la formation d'une ou de plusieurs nouvelles espèces de souris. Ainsi, l'isolement reproducteur est à la fois prézygotique (isolement écologique ou géographique) et postzygotique (fécondité réduite des hybrides) dans cet exemple.

> Sources :

- J. Britton-Davidian et coll. « Rapid chromosomal evolution in island mice », *Nature* 403 : 158 (2000).
- A. C. Nunes et coll. « Fertility assessment in hybrids between monobrachially homologous Rb races of the house mouse from the island of Madeira: implications for modes of chromosomal evolution », *Heredity* 106 : 348-356 (2011)

Unité 4

> L'exemple présenté dans la double page de l'unité 4 montre que la sélection naturelle peut dans un temps très court aboutir à des différences morphologiques qui entravent la reproduction.

> Les **documents 1 et 2** présentent les protagonistes de cet exemple, à savoir les pigeons et les poux qui peuvent les parasiter.

> Le **document 3** présente le protocole expérimental suivi par les scientifiques et les résultats sont présentés dans le **document 4**. Ces documents permettent de mettre en évidence des différences dans la taille des poux selon le milieu de vie, ici le plumage des pigeons.

> Les **documents 5 et 6** évoquent quant à eux la reproduction de ces différentes populations de poux et le fait que la sélection opérée sur la taille des poux peut entraîner à moyen terme une barrière reproductive, ici prézygotique (isolement mécanique).

> Source :

S. M. Villa et coll., « Rapid experimental evolution of reproductive isolation from a single natural population », *PNAS* 116(27) : 13 440-13 445 (2019).

Unité 5

> Cette dernière unité permet de mieux comprendre l'apport du séquençage de l'ADN dans le cadre de l'étude des espèces. Les **documents 1 et 2** reviennent sur le principe (doc 1) de la technique du code-barre moléculaire (DNA barcoding), mais aussi sur les avantages et les limites de cette méthode (doc 2).

> La suite des documents évoque 2 exemples : la découverte d'une nouvelle espèce de brochet dans les cours d'eau français (**documents 3 et 4, activité pratique**), et à une plus grande échelle l'estimation du nombre d'amphibiens à Madagascar en utilisant le DNA barcoding associé à d'autres méthodes d'identifications (**document 5**).

> Sources :

- David R. Vieites et coll., « Vast underestimation of Madagascar's biodiversity evidenced by an integrative amphibian inventory », *PNAS* 106(20) : 8267-8272 (2009)
- G. P. J Denys et coll., « Morphological and molecular evidence of three species of pikes *Esox* spp. (Actinopterygii, Esocidae) in France, including the description of a new species », *C. R. Biologies* 337 : 521-534 (2014).

Conseils

> Il est important d'insister sur le fait que la variabilité des individus est un préalable obligatoire à la sélection naturelle. Bien souvent les élèves pensent que le facteur de sélection permet l'apparition du caractère favorable alors qu'il ne s'agit que d'une sélection de ce caractère.

> Autre point de vigilance, la distinction entre sélection naturelle et sélection artificielle, le terme « naturelle » portant parfois à confusion. Dans l'exemple de la résistance des moustiques aux insecticides, c'est bien le milieu naturel qui est l'agent de sélection, même si l'être humain a modifié ce milieu en y ajoutant des insecticides. Une comparaison avec une sélection artificielle dans le cadre de l'élevage ou de l'agriculture devrait permettre de bien distinguer ces 2 notions.

Corrigés des parcours « tâche complexe »

Unité 3

> Proposition de texte

On constate que les différentes populations de souris de Madère possèdent des formules chromosomiques différentes, de $2n=22$ à $2n=28$ (**doc 1**) alors même que les souris du Portugal continental possèdent 40 chromosomes ($2n=40$). Le **doc 2** nous apprend que les chromosomes possédés par les souris de Madère proviennent de la fusion de certains chromosomes, ce qui explique la réduction du nombre de chromosomes évoqués plus haut. Ainsi, 9 fusions chromosomiques dans la population de souris 1 permettent le passage d'une formule chromosomique $2n=40$ à une formule $2n=22$. Le **doc 4** nous montre que les souris originaires de l'île de Madère sont plus proches génétiquement de souris du nord de l'Europe (Allemagne, Danemark ou Suède) que de souris portugaises. Cela peut s'expliquer par une colonisation de l'île par ces souris via un transport involontaire sur des bateaux provenant de ces régions (**doc 5**), même si des colonisations en provenance du Portugal ont aussi eu lieu. À l'aide de ces différents éléments, on peut imaginer que dans des populations de souris de petites tailles, des fusions chromosomiques aient pu être conservées par ces populations par un effet de dérive génétique. Si les différentes populations de souris de Madère peuvent encore se reproduire entre elles (**doc 3**), la fécondité des hybrides qui résultent de ces accouplements est plus faible que dans les populations parentales. Des anomalies sont en effet constatées dans les testicules des souris mâles, entraînant un grand nombre de gamètes anormaux. Si on ajoute à cela des obstacles géographiques qui empêchent les différentes populations de se reproduire, ces populations se trouvent isolées génétiquement les unes des autres comme l'évoque le **doc 6**. Cet isolement reproducteur peut aboutir à la formation de nouvelles espèces, mais l'isolement reproducteur ne semble pas complet dans ces populations de souris, la spéciation est encore en cours.

> Éléments scientifiques attendus

Les éléments soulignés sont issus des connaissances, les autres éléments sont extraits des documents (cités en gras).

Sous l'effet du hasard, dans des populations de petite taille, des modifications génétiques peuvent être conservées (notion de dérive). Les espèces se forment par spéciation. Les souris de Madère possèdent des caryotypes différents (**doc 1**). Les caryotypes différents proviennent de la fusion de certains chromosomes (**doc 2**). Les souris de Madère proviennent de la colonisation de l'île par des souris du nord de l'Europe (**doc 5**). Les souris de Madère sont plus proches génétiquement des souris du nord de l'Europe que des souris portugaises (**doc 4**). Une espèce peut se former s'il y a une rupture des échanges génétiques entre deux populations (**doc 6**). Les souris de Madère peuvent s'hybrider mais leurs descendances possèdent une faible fécondité (**doc 3**). La faible fécondité provient d'anomalies des gamètes chez les hybrides mâles.

> Mise en relation des éléments scientifiques

Les fusions chromosomiques chez certaines souris ont été conservées par dérive génétique car les populations étaient de petite taille (**docs 1, 2 et 5**). Les souris de Madère peuvent difficilement se reproduire entre elles à cause de barrières géographiques (**doc 1**) et biologiques (**doc 3**). Cela aboutit à un isolement reproducteur qui permet la spéciation (**doc 6**).

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente mais maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Une partie seulement des éléments scientifiques sont extraits des documents et ils ne sont pas reliés entre eux.	Une partie seulement des éléments scientifiques sont présents (connaissances et/ou documents) mais sont dans l'ensemble correctement reliés entre eux	La plupart des éléments scientifiques sont présents (connaissances et documents) mais sont insuffisamment reliés entre eux	La plupart les éléments scientifiques sont présents (documents et connaissances) et correctement reliés entre eux
Communication Texte	Non conforme	Le texte reprend une partie des éléments des documents	Le texte inclut toutes les notions présentées par les documents en précisant les causes et les conséquences	Le texte est bien structuré, la syntaxe est correcte, sans faute d'orthographe, et fait explicitement référence aux documents

Unité 4

> Proposition de texte

L'exemple proposé traite de la sélection naturelle chez les poux des pigeons. Le **doc 2** indique que les poux présentent une survie différentielle selon leur taille et leur environnement. La taille des poux est un caractère héréditaire et il existe une forte variabilité dans la taille des poux (**doc 2**).

Le **doc 1** nous présente 2 pigeons de races différentes, l'un (Giant runt) étant plus gros que l'autre (pigeon feral) et l'espace entre les barbes des plumes est également plus grand entre ces races de pigeon.

La mise en relation des informations des **docs 1 et 2** nous laisse penser que les poux de grande taille pourraient mieux survivre sur les pigeons de race Giant runt que sur les pigeons ferals. Pour tester cette hypothèse, les scientifiques ont transféré des poux sur ces 2 races de pigeon puis ont suivi l'évolution de la taille de ces poux pendant 4 ans (**doc 3**). Les résultats nous montrent que la taille relative des poux sur les pigeons Giant runt est plus importante que celles des poux sur les pigeons ferals au bout de 4 ans (**doc 4**).

Les poux de grande taille ont ainsi un avantage sélectif par rapport aux poux de taille plus petite lorsqu'ils se situent sur des pigeons plus gros : c'est un exemple de sélection naturelle. Cette sélection naturelle des poux de grande taille va avoir des conséquences sur la reproduction des poux. En effet, le **doc 5** nous montre que la différence de taille entre le mâle et la femelle est importante lors de l'accouplement : si le mâle est trop petit ou trop grand par rapport à la femelle alors le contact entre les abdomens nécessaire à la copulation est rendu difficile.

On voit d'ailleurs dans le **doc 6** que lorsque la différence de taille entre les mâles et les femelles est supérieure à 500 µm et inférieure à 250 µm alors le temps d'accouplement est beaucoup plus court que lorsque la différence est de 500 à 250 µm. On constate aussi dans le **doc 6** que le nombre de descendants est beaucoup plus faible lorsque l'on tente d'accoupler des poux provenant des 2 races de pigeons et présentant une trop grande ou trop faible différence de taille entre mâle et femelle.

Ainsi, les poux issus de ces races de pigeons ne peuvent plus se reproduire, il y a eu spéciation.

> Éléments scientifiques attendus (extraits des documents)

Les pigeons Giant runt sont plus gros et l'espace entre les barbes de leurs plumes est plus important que les pigeons férals (**doc 1**).

Les plus gros poux pondent plus d'œufs mais peuvent plus difficilement se cacher entre les barbes des plumes (**doc 2**).

Lorsque l'on transfère des poux de pigeons férals sur des pigeons Giant runt, au bout de 48 mois la taille relative des poux a augmenté (**docs 3 et 4**).

La copulation chez les poux est dépendante de la taille des poux : lorsque la différence de taille entre les mâles et les femelles est trop importante ou trop faible, la copulation est difficile (**docs 5 et 6**).

Les poux issus des pigeons férals et Giant runt peuvent difficilement avoir une descendance car les différences de taille entre mâles et femelles sont trop importantes ou trop faibles (**doc 6**).

> Mise en relation des éléments scientifiques

La taille des poux évolue par sélection naturelle selon l'espace entre les plumes des pigeons (**docs 1, 2, 3 et 4**).

La reproduction des poux dépend de la différence de taille entre mâle et femelle (**docs 5 et 6**).

Deux espèces de poux des pigeons pourraient voir le jour par sélection naturelle puis isolement reproducteur.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente mais maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Une partie seulement des éléments scientifiques sont extraits des documents et ils ne sont pas reliés entre eux.	Une partie seulement des éléments scientifiques sont présents (connaissances et/ou documents) mais sont dans l'ensemble correctement reliés entre eux	La plupart des éléments scientifiques sont présents (connaissances et documents) mais sont insuffisamment reliés entre eux	La plupart les éléments scientifiques sont présents (documents et connaissances) et correctement reliés entre eux
Communication Texte	Non conforme	Le texte reprend une partie des éléments des documents	Le texte inclut toutes les notions présentées par les documents en précisant les causes et les conséquences	Le texte est bien structuré, la syntaxe est correcte, sans faute d'orthographe, et fait explicitement référence aux documents

Unité 5

> Synopsis possible pour le diaporama

Introduction (une diapositive)	Le séquençage de l'ADN permet aujourd'hui de mieux connaître la biodiversité et notamment la biodiversité spécifique. La méthode du DNA barcoding est en plein essor (doc 2)
Le code barre génétique : intérêts et limites (une diapositive)	Il est nécessaire de choisir un gène indicateur qui doit être présent en de nombreuses copies et qui doit évoluer de manière rapide pour permettre de distinguer les différentes espèces (doc 1). La méthode présente cependant des inconvénients qu'il faut prendre en compte (doc 2)
Un exemple : la découverte d'une nouvelle espèce de brochet (une diapositive)	Malgré leur apparente similitude, il existe deux espèces de brochet dans les cours d'eau français (doc 4). Ces 2 espèces possèdent de nombreuses similitudes mais l'étude de leur ADN permet de distinguer 2 groupes de brochet distincts (doc 3).
L'ADN au service de la biodiversité (une diapositive)	Le DNA barcoding permet de mieux connaître la biodiversité des espèces, par exemple des espèces d'amphibiens dans l'île de Madagascar (doc 5).
Conclusion (une diapositive)	Les méthodes modernes de séquençage de l'ADN permettent de regrouper les individus qui possèdent des patrimoines génétiques proches. On peut ainsi découvrir des groupes d'individus génétiquement isolés les uns des autres, qui n'échangent plus de matériel génétique et donc potentiellement de nouvelles espèces.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente mais maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'informations extraites des documents	Complet ou suffisant	

Communication Diaporama accompagnant une présentation orale	Non conforme	Les éléments du diaporama respectent les demandes notionnelles de la consigne	Les éléments du diaporama sont conformes aux informations fournies dans la double page	Le diaporama est correctement structuré, un titre est présent sur chaque diapositive
---	--------------	---	--	--

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas »

Unité 1

Question 1

En considérant que $p = 0,7$ et qu'il y a panmixie, déterminer les fréquences génotypiques à la génération 2 (doc. 1 et 2).

Les fréquences génotypiques à la génération 2 seront, si $p=0,7$:

$$f(R//R) = p^2 = 0,7 \times 0,7 = 0,49$$

$$f(R//B) = 2pq = 2 \times 0,7 \times 0,3 = 0,42$$

$$f(B//B) = q^2 = 0,3 \times 0,3 = 0,09$$

Question 2

En considérant que les conditions de l'équilibre de Hardy-Weinberg sont réunies, modéliser l'évolution de la fréquence génotypique et allélique sur plusieurs générations en utilisant les valeurs de la question précédente (doc. 1 à 3).

> À la génération 2, les fréquences alléliques sont :

$$p = f(R//R) + \frac{1}{2} f(R//B) = 0,49 + 0,21 = 0,70$$

$$\text{Donc } q = 1 - p = 0,30$$

Donc les fréquences alléliques ne changent pas de génération en génération.

> Le travail sur tableur devrait donner le tableau suivant :

Génération	Fréquence génotypique			Fréquence allélique	
	R//R	R//B	B//B	p	q
1				0,7	0,3
2	0,49	0,42	0,09	0,7	0,3
3	0,49	0,42	0,09	0,7	0,3
4	0,49	0,42	0,09	0,7	0,3
5	0,49	0,42	0,09	0,7	0,3
6	0,49	0,42	0,09	0,7	0,3

> À noter que les fréquences génotypiques de la 1^{ère} génération ne peuvent être connues. Il y a en effet plusieurs possibilités pour une même fréquence allélique, notamment si la structure génétique de Hardy-Weinberg n'est pas atteinte, par exemple : $f(R//R) = 0,7$, $f(B//B) = 0,3$ et $f(R//B) = 0$.

Question 3

D'après vous, les conditions de l'équilibre de Hardy-Weinberg sont-elles fréquemment réunies dans la nature ? Justifiez.

L'équilibre de Hardy-Weinberg est rarement atteint car les populations ne sont jamais de taille infinie, les individus se déplacent, la sélection naturelle peut avoir lieu, etc.

Question 4

Montrer que la structure génétique de la population est en accord avec la loi de Hardy-Weinberg. Peut-on conclure quant à la stabilité des fréquences alléliques à la vue de ces seules données (doc. 4) ?

> On calcule la fréquence de chaque allèle dans la population :

$$f(M) = p = (406 + 744 / 2) / 1482 = 0,525$$

$$f(N) = q = 1 - p = 0,475$$

> Les effectifs attendus sont donc :

$$n[M//M] = p^2 \times N = 0,525 \times 0,525 \times 1482 = 408$$

$$n[M//N] = 2pq \times N = 2 \times 0,475 \times 0,525 \times 1482 = 739$$

$$n[N//N] = q^2 \times N = 0,475 \times 0,475 \times 1482 = 334$$

> Il n'y a pas de différence significative entre les effectifs théoriques et les effectifs observées, la population a une structure génétique en accord avec la loi de Hardy-Weinberg. On ne peut cependant pas déterminer si les fréquences alléliques sont stables à la seule vue de ces données.

Unité 2

Question 1

Montrez que l'équilibre de Hardy-Weinberg n'est pas atteint pour l'allèle Bar (doc. 1), pour l'allèle Ace^R (doc. 2) et pour l'allèle bw⁷⁵ (doc. 4). Dans chacun des trois cas, dans proposez une explication.

> Pour l'allèle Bar (doc 1) la fréquence de l'allèle diminue régulièrement, l'équilibre de Hardy-Weinberg n'est pas atteint. Puisque cet allèle perturbe la structure et la fonction de l'œil, on peut supposer que cette baisse de fréquence est liée à un processus de sélection naturelle.

> Pour l'allèle Ace^R (doc 2), la fréquence augmente régulièrement depuis les années 1980 dans les populations de moustiques du Languedoc-Roussillon. L'équilibre de Hardy-Weinberg n'est pas atteint et on peut penser que là aussi la sélection naturelle favorise les individus porteurs de cet allèle qui confère une résistance aux insecticides organophosphorés.

> Enfin, l'allèle bw⁷⁵ (doc 4) voit sa fréquence varier de manière aléatoire dans les populations pour finir au bout de 20 générations par disparaître dans une partie des populations ou par devenir le seul allèle dans d'autres populations. Sachant que les populations de départ sont de petite taille et que le hasard entre en jeu, on parle ici de dérive génétique, qui empêche d'atteindre l'équilibre de Hardy-Weinberg.

Question 2

Montrez par le calcul que les populations de moustiques (doc. 2) et la population de lamiers (doc. 3) ne possèdent pas la structure génotypique de Hardy-Weinberg. Dans les deux cas, proposez une explication.

> Chez les moustiques, la fréquence p de l'allèle Ace^R vaut :

$$f(Ace^R//Ace^R) = p = (66 + 130 / 2) / 416 = 0,31$$

Donc la fréquence de l'allèle Ace^S vaut :

$$f(Ace^S) = q = 1 - p = 0,69$$

> Les effectifs théoriques sont donc :

$$n[Ace^R//Ace^R] = p^2 \times N = 0,31 \times 0,31 \times 416 = 40$$

$$n[Ace^R//Ace^S] = 2pq \times N = 2 \times 0,31 \times 0,69 \times 416 = 178$$

$$n[Ace^S//Ace^S] = q^2 \times N = 0,69 \times 0,69 \times 416 = 198$$

> Il y a donc dans la population réelle un déficit d'individus sensibles de génotype [Ace^S//Ace^S] et un nombre plus important de moustiques [Ace^R//Ace^R] par rapport aux effectifs théoriques prévus par le modèle de Hardy-Weinberg. Cela confirme la sélection positive exercée par l'insecticide sur le phénotype résistant.

> Dans la population de lamier,

$$f(TriO2^{166}//TriO2^{166}) = p = (4 + 1 / 2) / 39 = 0,12$$

Donc la fréquence de l'allèle TriO2¹⁶⁹vaut :

$$f(TriO2^{169}) = q = 1 - p = 0,88$$

> Les effectifs théoriques sont donc :

$$n[TriO2^{166}//TriO2^{166}] = p^2 \times N = 0,12 \times 0,12 \times 39 = 1$$

$$n[TriO2^{166}//TriO2^{169}] = 2pq \times N = 2 \times 0,12 \times 0,88 \times 39 = 8$$

$$n[TriO2^{169}//TriO2^{169}] = q^2 \times N = 0,88 \times 0,88 \times 39 = 30$$

> On observe dans les effectifs réels un déficit d'individus hétérozygotes [TriO2¹⁶⁶//TriO2¹⁶⁹]. Certaines fleurs ne s'ouvrent pas à maturité, il n'y a pas panmixie donc la structure génétique de Hardy-Weinberg n'est pas atteinte.

Question 3

Récapitulez les résultats obtenus sous la forme d'un tableau montrant, dans chaque cas, quelle condition d'application de la structure ou de l'équilibre de Hardy-Weinberg n'est pas remplie.

Exemple	Observation(s)	Conditions d'applications non remplies
Mutation Bar chez les drosophiles (doc 1)	Baisse de la fréquence de l'allèle Bar	Sélection naturelle
Allèle de résistance aux insecticides chez le moustique (doc 2)	Hausse de la fréquence de l'allèle Ace ^R , structure génétique de Hardy-Weinberg non atteinte	Sélection naturelle
Allèle TriO2 ¹⁶⁶ chez le lamier (doc 3)	Structure génétique de Hardy-Weinberg non atteinte	Panmixie (reproduction au hasard)
Allèle bw ⁷⁵ chez la drosophile (doc 4)	Disparition ou fixation de l'allèle	Population de taille infinie

Unité 3

Question 1

Comparez les caryotypes des souris de Madère et des souris portugaises continentales et expliquez l'origine des différences observées. (docs 1 et 2)

Les souris portugaises possèdent 40 chromosomes organisés par paire. Les souris de l'île de Madère possèdent jusqu'à 2 fois moins de chromosomes (22 chromosomes pour la population 1 et 20 chromosomes pour la population 2). La différence s'explique par les possibles fusions des chromosomes qui peuvent avoir lieu comme expliqué dans le doc 2.

Question 2

Indiquez les conséquences de ces modifications caryotypiques sur la capacité de reproduction des populations de souris de Madère. (doc 3)

Les individus hybrides mâles provenant du croisement de souris possédant des caryotypes différents possèdent un nombre de cellules germinales mortes plus important et produisent des gamètes avec un nombre anormal de chromosomes. De ce fait, les capacités de reproduction entre ces populations sont limitées car les hybrides ont une fertilité diminuée de 50%.

Question 3

Expliquez à l'aide des informations du doc. 5 les parentés entre les souris de Madère et les autres populations de souris observées dans le doc 4.

Le doc. 4 nous montre que les souris de Madère sont plus proches des souris du nord de l'Europe que des souris portugaises. Cela peut s'expliquer par des événements de colonisation ayant eu lieu sur l'île de Madère au 9^e siècle par des vikings danois. Les vikings auraient apporté des souris sur leurs bateaux.

Question 4

Déterminez comment les différentes populations de Madère pourraient à terme être à l'origine d'espèces différentes et notamment ce qui limite les échanges génétiques entre ces populations et les autres populations de souris. (docs 1 à 6)

Les populations de souris de Madère sont isolées géographiquement car chaque population est séparée par des montagnes. Elles sont aussi isolées des souris du Portugal. Cet isolement empêche les reproductions et donc les échanges génétiques entre ces populations ce qui provoque une rupture de flux généalogique qui pourrait entraîner l'apparition de nouvelles espèces.

Unité 4

Question 1

Formulez une hypothèse sur la taille des poux pouvant vivre sur des pigeons de grande taille et de petite taille. (docs 1 et 2)

Les poux de grande taille peuvent se cacher dans les barbes des pigeons Giant runt dont l'espace entre les barbes est plus important. Comme ils se déplacent plus rapidement et pondent plus d'œufs que les poux de petite taille, ils possèdent sur cette espèce de pigeon un avantage. Cependant, les poux de grande taille sont désavantagés sur les pigeons férals car ils ne peuvent pas se cacher entre les barbes et sont éliminés par le pigeon : les poux de petite taille sont alors favorisés sur ces pigeons.

Question 2

Montrez que l'évolution de la taille des poux sur les pigeons Giant runt est due à un processus de sélection naturelle. (docs 3 et 4)

On constate dans le doc 4 que la taille moyenne des poux augmente lorsqu'ils se reproduisent sur les pigeons Giant runt : les poux les plus grands se reproduisent plus vite et sont donc sélectionnés (sélection naturelle). Cependant, pour les pigeons férals, la taille des poux ne change pas : les poux de grande taille sont désavantagés, la taille moyenne reste stable.

Question 3

Expliquez comment la taille des poux peut impacter leur reproduction et déterminez, à l'aide du doc 6 la différence de taille optimale entre le mâle et la femelle. (docs 5 et 6)

Lors de l'accouplement, l'abdomen du mâle doit entrer en contact avec la femelle. Si le mâle est trop grand ou trop petit, ce contact est rendu difficile. Le mâle doit idéalement être plus petit que la femelle de 250 à 500 µm d'après le doc 6.

Question 4

Indiquez comment la sélection naturelle pourraient aboutir à terme à la formation de 2 espèces de poux. (docs 4 et 6)

Les poux de grande taille ne peuvent pas se reproduire avec les poux de petite taille : il y a isolement reproducteur. De ce fait, les échanges génétiques pourraient cesser entre ces populations de poux et ainsi aboutir à la formation de 2 espèces.

Unité 5

Question 1

Indiquez l'intérêt et les limites de l'étude de l'ADN dans la découverte de nouvelles espèces. (docs 1 et 2)

L'ADN permet de détecter des espèces présentes dans l'environnement de manière non invasive et pour un coût réduit. Cependant, on ne connaît pas l'abondance ou la répartition des individus et on peut détecter de l'ADN d'une espèce ayant quitté le milieu.

Question 2

Déterminez les arguments qui ont permis aux scientifiques de mettre en évidence une nouvelle espèce de brochet en France. (docs 3 et 4)

Les données morphologiques du doc 4 montrent que les brochets juvéniles présentent des caractéristiques différentes selon l'espèce, notamment un « museau » plus long chez *E. aquitanicus*. De plus, les données moléculaires montrent que les brochets *E. aquitanicus* sont différents génétiquement des autres brochets, y compris des brochets italiens.

Question 3

Montrez que la méthode de DNA barcoding permet de détecter de nombreuses espèces qui n'avaient jusque-là pas été détectées. (doc 5)

L'utilisation du DNA barcoding en 2009 a permis de détecter quasiment le double d'espèces d'amphibiens par rapport aux méthodes antérieures. Environ 1/3 des espèces identifiées pourraient être de nouvelles espèces.

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

1. La fréquence fM^N de l'allèle M^N dans cette population de 1000 individus vaut :

$$fM^N = p = (n[\text{Normal}] + \frac{1}{2} n[\text{Frisé}]) / 1000 = (150 + 800/2) / 1000 = 0,55$$

donc fM^F de l'allèle M^F vaut : $fM^F = q = 1 - fM^N = 0,45$

2. Les effectifs théoriques sont :

$$N[\text{Frisé}]_{\text{théorique}} = 2pq = 0,45 \times 0,55 \times 2 \times 1000 = 495$$

$$N[\text{crépu}]_{\text{théorique}} = q^2 = 0,45^2 \times 1000 = 202,5$$

$$N[\text{normal}]_{\text{théorique}} = p^2 = 0,55^2 \times 1000 = 302,5$$

3. Les effectifs réels et théoriques ne sont pas équivalents donc la structure génétique de Hardy-Weinberg n'est pas respectée.

4. Si la structure génétique n'est pas respectée c'est que les reproductions ne s'effectuent pas au hasard, la panmixie n'est pas respectée. On peut supposer que les éleveurs favorisent certains accouplements pour obtenir certaines volailles et pas d'autres.

Exercice 3

Dans le document proposé, on constate que par rapport aux populations de référence (rurale, faible densité humaine ou milieu peu modifié), les populations étudiées (urbaine, haute densité humaine ou milieu très modifié) présentent des populations de petite taille, avec une plus faible diversité génétique et une plus faible richesse allélique. Sachant que la diversité génétique peut diminuer dans les populations de petite taille par dérive génétique, on peut imaginer que la fragmentation de l'habitat de par l'urbanisation diminue la taille des populations ce qui entraîne une diminution de la diversité génétique et de la richesse allélique.

Exercice 4

1. On peut constater que l'arbre de parenté regroupe les individus en 4 groupes : un groupe qui comporte les girafes d'Angola et les girafes du Cap, un groupe qui rassemble les girafes Masai et les girafes de Thornicroft, un groupe qui se compose des girafes du Niger, des girafes de Kordofan et des girafes de Nubie et un groupe des girafes réticulées. On constate que ces regroupements correspondent à une certaine proximité géographique de ces différentes populations de girafes, ce qui semble indiquer des échanges génétiques récents entre ces populations de girafes.

2. Les girafes du Niger, les girafes de Kordofan et les girafes de Nubie forment l'espèce de girafe ayant les effectifs les moins importants (3050 individus seulement). De plus leur aire de répartition est large et répartie sur plusieurs pays, sans continuité. Il y a un risque de dérive génétique et de perte de diversité génétique qui pourrait accélérer la disparition de cette espèce de girafe.

Exercice 5

Dans la plupart des populations naturelles, différents facteurs empêchent les populations d'atteindre l'équilibre théorique de Hardy-Weinberg.

La taille de la population n'est jamais infinie et dans les populations de petite taille, les fréquences alléliques varient par le simple effet du hasard : c'est la dérive génétique.

L'existence de préférences sexuelles ou de migration sont aussi des sources de variation des fréquences alléliques.

Un allèle, apparu par mutation d'un allèle existant, peut conférer un avantage aux individus le possédant. La sélection naturelle agit alors, ce qui entraîne des modifications des fréquences alléliques. C'est ce que l'on observe dans l'exemple proposé. En effet, on constate que les poux qui se reproduisent sur des pigeons noirs deviennent de plus en plus sombres alors que les poux qui se reproduisent sur des pigeons blancs sont de plus en plus clairs.

De plus, dans l'expérience 2 où les oiseaux ne peuvent se débarrasser des poux car leur bec est bloqué par un anneau en plastique, on constate que la couleur des poux ne change pas, quelle que soit la couleur du pigeon. On peut donc en conclure que les pigeons exercent une pression de sélection sur les poux dont la couleur diffère de leur plumage : ces poux sont plus facilement repérés et donc plus facilement éliminés. Ils ne pourront ainsi pas participer à la reproduction et leurs gènes seront perdus. Petit à petit, par sélection naturelle, la couleur des poux se modifie.

La structure génétique de la population peut aussi différer de la structure théorique si le régime de reproduction n'est pas aléatoire. Par exemple, l'autofécondation chez les plantes à fleurs produit un excès d'individus homozygotes au détriment des individus hétérozygotes.

Exercice 6

Les populations subissent continuellement les effets de la dérive génétique et de la sélection naturelle. Des populations placées dans des environnements différents d'un point de vue biotique (nature des espèces présentes) et abiotique (conditions physico-chimiques) évoluent ainsi de manière différente. Peu à peu, elles peuvent ne plus être capables de se reproduire entre elles, ce qui limite les échanges de gènes et accentue les différences. Cet isolement reproducteur a conduit à la formation de nouvelles espèces : il y a eu spéciation.

Dans le cas de cette nouvelle espèce de pinson au Galápagos, le doc 2 nous indique que les big birds proviennent tous du croisement entre un male *G. conirostris* et une femelle *G. fortis*. Les descendants de ce premier couple ont fini par se reproduire entre eux. On peut imaginer que cela provient de la modification de la forme du bec chez ces descendants.

En effet, le doc 1 nous montre que les oiseaux de type big bird possèdent un bec et un corps de taille intermédiaire par rapport aux parents de la 1^{ère} génération. On apprend aussi que la forme du bec modifie le chant des oiseaux, alors même que ce chant est indispensable à la reproduction. On peut donc imaginer que les descendants du 1^{er} croisement ne pouvaient se reproduire qu'entre eux car leurs chants n'étaient reconnus que par eux. Il y a donc eu isolement reproducteur.

Exercice 7

Nous allons dans un premier temps expliquer le fait que l'on observe peu de grenouilles hybrides entre les différentes populations de grenouilles *O. pumillio*, puis nous verrons comment cela pourrait aboutir à la formation de nouvelles espèces.

Le **doc 2** nous montre qu'il existe une grande variété de couleurs et de motifs chez les grenouilles. Pour comprendre l'absence de croisement entre ces différentes variétés, le **doc 3** nous explique le protocole retenu dont les résultats sont présentés dans le **doc 4**.

Dans l'**expérience a**, on place une grenouille femelle dont les 2 parents sont identiques en présence d'une grenouille mâle de même couleur ou de couleur différente. Dans ce cas, on constate que la grenouille femelle passe 75% de son temps du côté de la cage où se trouve le mâle possédant la même couleur qu'elle. On en déduit que la grenouille femelle est capable de reconnaître les grenouilles qui lui ressemblent.

Le **doc 1** nous apprend que le mâle et la femelle s'occupent des petits : le mâle s'occupe des œufs avant l'éclosion et la femelle s'occupe des têtards. On peut imaginer que c'est lors de ces contacts parentaux que les grenouilles apprennent à reconnaître leurs congénères. Cependant, on ne peut exclure à ce stade la transmission génétique d'un caractère.

L'**expérience b** propose d'observer le comportement d'une grenouille hybride. Cette grenouille femelle a tendance à rester 80% du temps du côté de la cage où se trouve une grenouille mâle ayant la même couleur que sa mère. On peut donc imaginer que l'apprentissage de la couleur se fait au stade têtard ou que la transmission génétique ne concerne que les grenouilles femelles (via les chromosomes sexuels ?).

Enfin la dernière expérience (**expérience c**) nous permet de trancher. Les œufs une fois fécondés sont échangés entre des grenouilles de couleurs différentes. Dans ce cas, la grenouille femelle passe la majeure partie de son temps du côté de la cage où se trouve un mâle possédant la couleur de ses

parents adoptifs, au détriment du mâle possédant la couleur de ses parents biologiques. L'hypothèse génétique est ainsi écartée et on peut conclure que l'attriance de la femelle pour des mâles de même couleur qu'elle est liée à un apprentissage lors du contact avec la mère.

La fait que les grenouilles de cette espèce soient attirées par des grenouilles de couleur similaire à la mère amène à un isolement reproducteur de ces différentes populations. A terme, cela pourrait conduire à une absence d'échanges génétiques et donc à l'apparition de nouvelles espèces. Cependant, aujourd'hui, l'isolement reproducteur n'est pas complet puisqu'un certain pourcentage d'hybridations est toujours réalisé.

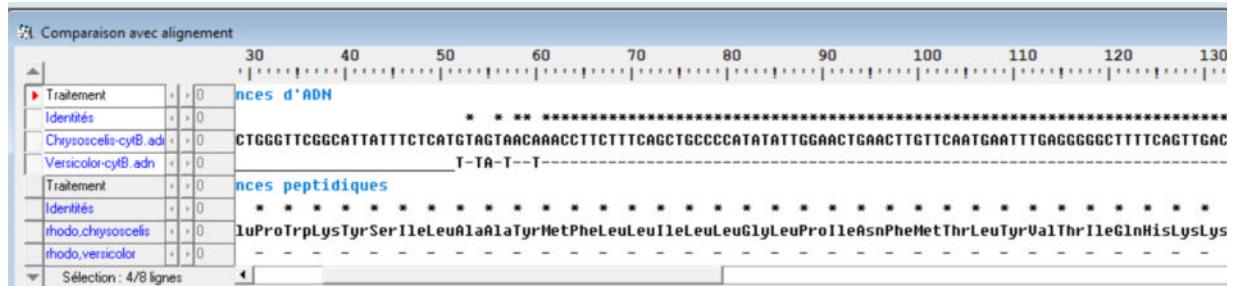
Exercice 8 (ECE)

> Stratégie de résolution

Pour résoudre le problème on va comparer les chants des rainettes mais aussi leurs séquences génétiques. Si les chants nuptiaux sont proches et si la proximité génétique est importante (>50%) alors la reproduction est possible. Dans le cas contraire, la reproduction est impossible.

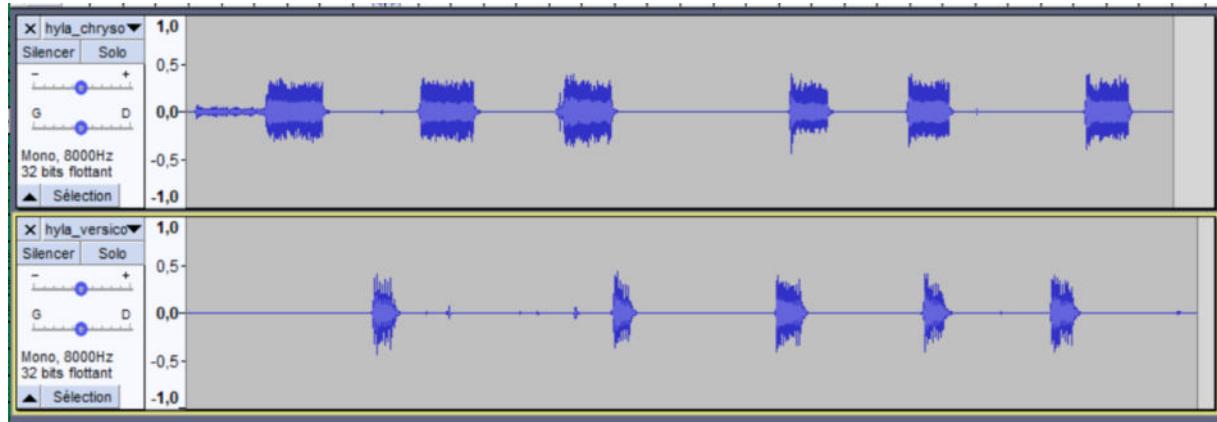
> Résultats

Comparaison des séquences moléculaires entre deux rainettes : *Hyla chrysoscelis* et *Hyla versicolor*



	% de similitude
Rhodopsine	98,7
Cytochrome c	90,6

Comparaison du chant des deux rainettes à l'aide du logiciel Audacity



	Durée du chant
<i>Hyla chrysoscelis</i>	897 ms
<i>Hyla versicolor</i>	367 ms

> Conclusion

Les résultats nous montrent que les deux espèces de rainettes possèdent une forte proximité génétique (>90%) quel que soit le gène considéré. Cependant, le chant de ces rainettes est très différent ce qui va empêcher la reproduction et donc l'hybridation.

Chapitre 4. La diversification non génétique du vivant

Dans le chapitre 2, les élèves ont découvert que la diversification du vivant peut s'opérer par des gènes qui ne sont pas hérités de la génération précédente, mais acquis par transfert horizontal. Dans ce chapitre 4, ils découvrir quelques modes de diversification non génétique du vivant ainsi que la notion de phénotype étendu. **L'unité 1** aborde la notion de phénotype étendu et montre comment les associations sont une source de diversité au sein du monde vivant. **L'unité 2** montre comment le recrutement de composants de l'environnement peut contribuer à la diversification du vivant. Elle discute également de la notion de phénotype étendu dans le cas de l'espèce humaine. **L'unité 3** est consacrée aux caractères culturels et à leur évolution.

Thème 1. La Terre, la vie et l'organisation du vivant : génétique et évolution	
Connaissances	Capacités, attitudes
<p>La diversification phénotypique des êtres vivants n'est pas uniquement due à la diversification génétique. D'autres mécanismes interviennent :</p> <ul style="list-style-type: none">• associations non héréditaires (pathogènes ou symbiotes ; cas du microbiote acquis) > Unité 1• recrutement de composants inertes du milieu qui modulent le phénotype (constructions, parures...). > Unité 2	<p>Chez certains animaux, les comportements acquis peuvent être transmis d'une génération à l'autre et constituer une source de diversité : ainsi du chant des oiseaux, de l'utilisation d'outils dans des populations animales, de la culture notamment dans les sociétés humaines. Ces traits sont transmis entre contemporains et de génération en génération, et subissent une évolution (apparition de nouveaux traits, qui peuvent être sélectionnés, contre-sélectionnés ou perdus par hasard). > Unité 3 et Objectifs Oral</p> <p>Étudier un exemple de diversification du vivant sans modification du génome. Extraire, organiser et exploiter des informations pour :</p> <ul style="list-style-type: none">• apprêhender la notion de phénotype étendu > Unités 1 et 2• apprêhender la notion d'évolution culturelle et ses liens avec celle d'évolution biologique. > Unité 3

Compétences travaillées et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
<p>Pratiquer des démarches scientifiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution. • Observer, questionner, formuler une hypothèse, en déduire ses conséquences testables ou vérifiables, expérimenter, raisonner avec rigueur, modéliser, argumenter. • Interpréter des résultats et en tirer des conclusions. • Discerner, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 3 • Unités 1 à 3 • Unités 1 à 3 • Unité 2
<p>Concevoir, créer, réaliser</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifier et choisir des notions, des outils et des techniques, ou des modèles simples pour mettre en œuvre une démarche scientifique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 1
<p>Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 3
<p>Pratiquer des langages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant. • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 et 2 • Unités 1 à 3

Choix pédagogiques

Unité 1

> Pour comprendre comment le recrutement de composants vivants de l'environnement peut diversifier le vivant, il est nécessaire d'élargir la définition de phénotype, résultat de l'expression du génome, à toutes les manifestations qui en résultent. C'est le concept de phénotype étendu, proposé par R. Dawkins en 1989, dans son ouvrage *The Extended Phenotype: The Long Reach of the Gene*. Dans le **document 1**, Marc-André Selosse apporte un éclairage sur ce concept et explique notamment que les associations, lorsqu'elles sont bénéfiques, additionnent les capacités des deux partenaires, créent de nouvelles fonctions métaboliques, permettent une protection des partenaires, une meilleure plasticité et/ou une installation durable dans l'environnement. Les documents suivants visent à illustrer des associations de nature pathogènes ou symbiotiques. Ce document sert de référence pour aider l'élève à identifier dans les exemples suivants, les différentes associations et la façon dont elle diversifie le vivant.

> Les **documents 2 et 3** traitent de la symbiose corail/zooxanthelles. Il s'agit d'un exemple d'addition des capacités des partenaires, qui permet une plasticité phénotypique et ainsi, une installation durable dans un milieu hostile. Le **document 2** définit le concept de symbiose, en montrant que dans cet exemple, les bénéfices réciproques résident dans l'échange de matières nutritives entre les deux partenaires.

> Le **document 3** démontre expérimentalement en quoi cette association contribue à modifier le phénotype étendu des deux partenaires. Il s'agit d'expériences de transfert de quatre espèces de coraux, à des profondeurs différentes de celles au niveau desquelles ils ont été récoltés. Les résultats révèlent que :

- La moitié des coraux vivant entre – 20 et – 23 m blanchit au bout de 8 semaines lorsqu'ils sont ramenés entre – 2 à – 4 m sous la surface. Or ce blanchissement témoigne de l'expulsion des zooxanthelles par les coraux. Au bout d'un an, tous ont survécu et l'on constate, contrairement aux coraux témoins (non déplacés), des communautés de zooxanthelles différentes de celles du départ, et plus similaires à celles des coraux situés entre – 2 à – 4 m de profondeur (diminution de l'espèce figurée en rouge et apparition de l'espèce en jaune et de celle en orange). Ces coraux se débarrassent des zooxanthelles « sous-optimales » et acquièrent de nouveaux partenaires plus adaptés au changement du milieu. Autrement dit, le changement de partenaires confère une capacité d'accommodation des coraux, et donc, leur plasticité phénotypique. Ces pourquoi ces associations sont source de diversification des individus.

- Concernant les coraux de surface, leur déplacement en profondeur n'entraîne pas de blanchissement au bout de 8 semaines et on retrouve les mêmes communautés que celles présentes initialement au bout d'un an. Si tous les coraux ont subsisté, chez les espèces 2, 3 et 4 de coraux, une partie des zooxanthelles est morte, en des proportions différentes. Il est possible que pour ces coraux, l'association établie plus en surface n'ait pas été aussi optimale une fois déplacés en profondeur. Mais la mise en évidence de la mort de zooxanthelles, dans les espèces 2 et 4 de coraux des profondeurs jamais déplacés montre aussi que ce processus se produit naturellement, sans perturbation.

> Les **documents 4 et 5** traitent de la symbiose fabacées/*Rhizobium*. Cet exemple illustre l'innovation métabolique qui peut naître de l'association de deux partenaires. Le document 4 localise les nodosités de racines d'un lupin et le document 5 montre que ces nodosités abritent des bactéries du genre *Rhizobium*, fixatrices de diazote atmosphérique, rendu utilisable par la plante sous forme d'ions ammonium, pour produire des protéines. Sans cette association, la capacité à exploiter le diazote atmosphérique par la plante est impossible.

> Le **document 6** illustre un exemple d'association pathogène entre les fourmis *Leptothorax nylanderi* et les vers plats parasites *Anomotaenia brevis*. Outre le changement d'aspect de la fourmi, ce parasite modifie le comportement de la fourmi la rendant plus exposée à ses prédateurs, dont l'un d'eux est le pic épeiche, hôte intermédiaire du ver permettant de boucler son cycle de vie.

> Le **document 7** aborde la symbiose avec notre microbiote intestinal. Il remobilise les acquis de SVT 2^{nde} sur son rôle bénéfique (digestion, immunité) et les conséquences de dysbioses, comme l'obésité ou des maladies chroniques.

Unité 2

> Cette unité aborde cette fois la diversification du vivant par le recrutement de composants inertes de l'environnement.

> Les **documents 1 et 2** abordent l'exemple de l'oiseau jardinier satiné, dont le mâle fabrique à chaque saison de reproduction un berceau devant lequel il parade pour attirer à lui les femelles (doc. 1). Des chercheurs ont montré que les décorations que le mâle dépose améliorent son succès copulateur. En particulier, les chercheurs ont mis en évidence une corrélation positive et forte entre son succès copulateur et le recrutement de feuilles jaunes, d'objets bleus et de mue de serpents (doc. 2). Il s'agit là d'un exemple de sélection sexuelle. La notion de phénotype étendu peut être remobilisée ici, en rappelant que les constructions en font partie et que leur diversité est source de diversification des individus.

> Le **document 3** illustre un autre exemple de constructions, cette fois protectrice : le fourreau des trichoptères. Ce fourreau est construit en recrutant des graviers ou des débris végétaux de l'environnement et permet la protection et le camouflage des larves, améliorant leur chance de survie. D'aspects très différents, les fourreaux sont sources de diversification des individus de la même espèce et d'espèces différentes.

> Les **documents 4 et 5** s'intéressent à l'être humain. Nos choix, qui contribuent à nous distinguer les uns des autres, sont-ils dictés par la sélection naturelle ? En sciences sociales, les comportements individuels sont analysés à travers le filtre socio-culturel. Il convient notamment de bien veiller à éviter, chez les élèves, une transposition simpliste du phénomène étudié chez l'oiseau jardinier : ce n'est pas parce que l'oiseau qui a le nid le plus coloré a le plus de succès que l'homme qui a la plus grosse montre est plus séduisant. Les développements fournis par Noémie Merleau-Ponty sont à cet égard très importants. Le podcast associé au document permet à celles et ceux qui le souhaitent de pousser plus loin la réflexion.

Unité 3

> Cette unité illustre la diversification des populations à travers leur culture. La page de gauche aborde l'innovation, la transmission et l'évolution des pratiques chez les primates. La page de droite montre que si les traits culturels subissent une évolution, ils influencent aussi l'évolution biologique.

> Le **document 1** traite de la transmission de traits culturels au sein d'une population. Des expérimentations ont montré que les jeunes chimpanzés apprennent d'abord en observant et en imitant leur mère, du fait de leur étroite relation. Il s'agit d'une transmission verticale. Après quelques années, les chimpanzés peuvent diversifier leurs pratiques en observant d'autres membres du groupe : il s'agit là d'une transmission horizontale.

> Le **document 2** montre le résultat d'une étude réalisée sur des chimpanzés de Côte-d'Ivoire. Des chercheurs ont suivi la technique de cassage de noix de trois communautés, distantes de moins de 10 km. L'intérêt tout particulier de l'étude est qu'ils ont choisi des communautés semblables génétiquement et vivant dans des milieux à ressources similaires, afin d'exclure une cause génétique ou environnementale à la diversité culturelle. Pour consommer une noix, les chimpanzés brisent la coquille à l'aide d'une pierre ou d'un morceau de bois qu'ils recherchent sur place. Les pierres sont plus rares que les morceaux de bois et nécessitent d'être recherchées. Au fil de la saison, les noix sèchent, ce qui les rend moins dures.

> On constate que dans les communautés représentées par une courbe rouge et verte, au fil de la saison, l'utilisation du bois remplace peu à peu celle de la pierre. Ce trait culturel s'explique par un avantage sélectif à utiliser préférentiellement la pierre en début de saison, dont le coût à rechercher la pierre est compensé par le succès de casser des noix dures. En fin de saison, l'utilisation préférentielle du bois est plus avantageuse, car la moindre résistance des coquilles rend inutile le coût

investi dans la recherche de pierre. Dans la communauté représentée par la courbe orange, il est intéressant de constater que l'utilisation de la pierre est constante et majoritaire : dans cette communauté il n'y a pas eu d'innovation dans l'adaptation des outils aux contraintes du milieu.

> Le **document 3** présente une pratique avantageuse apparue dans une population de macaques japonais en 1956 : une femelle lava des grains de blé dans l'eau, ce qui les sépara aisément du sable et permet de les manger. Cette pratique s'est répandue les années suivantes. Toutefois, l'étude de populations de primates a révélé qu'une pratique avantageuse introduite par l'arrivée d'une femelle dans une population peut être abandonnée par celle-ci, par conformisme, plutôt que de se répandre, et ainsi disparaître de la population (doc. 1).

> Le **document 4** présente le mode de vie de trois ethnies d'Asie intérieure, sujets d'une étude de recherche : les Kirghizes et les Kazakhs, qui en milieu rural sont éleveurs semi-nomades, et les Tadjiks, dont les ruraux sont agriculteurs sédentaires.

> Le **document 5** localise ces ethnies et mentionne leur groupe linguistique. Mis en relation avec le doc. 4, il permet constate que les Kirghizes et les Kazakhs (qui partagent le même mode de vie et dont les langues appartiennent au même groupe linguistique turco-mongol) sont aux antipodes de l'Asie intérieure, et les Tadjiks, de groupe linguistique indo-européen, se situent entre les deux. Le document précise par ailleurs que deux langues d'un même groupe se ressemblent plus entre elles que deux langues de deux groupes différents. Cette information est à mettre en relation avec les deux documents suivants.

> Le **document 6** montre que les Kirghizes et Kazakhs sont plus proches génétiquement entre eux que ne le sont chacun avec les Tadjiks.

> Le **document 7** indique que la distance génétique est généralement corrélée à la distance géographique entre les populations. Or dans le cas de ces trois ethnies, distances génétique et géographique sont décorrélées. Evelyne Heyer apporte une explication à cet apparent paradoxe : la langue constitue une « barrière » à la reproduction, si bien que deux populations proches géographiquement mais éloignées linguistiquement se reproduiront moins entre elles qu'avec une population plus proche linguistiquement, bien que plus éloignée. La limitation de ces échanges maintient, voire accentue les différences génétiques entre populations. La religion et le système de castes en Inde sont aussi des traits culturels, qui influencent notre évolution biologique.

Corrigé des parcours « tâche complexe »

Unité 1

> Éléments de correction

Un tableau n'est pas exigé mais présente l'intérêt d'organiser les éléments de façon synthétique.

Tableau présentant la nature, le fonctionnement et la source de diversification des associations entre êtres vivants

Associations	Nature de l'association	Fonctionnement de l'interaction	Source de diversification du vivant
Zooxanthelles et coraux (doc. 1, 2 et 3)	Interaction symbiotique	Le corail complète sa nourriture avec les photosynthétats des zooxanthelles qu'il héberge. Celles-ci bénéficient d'un gîte et du CO ₂ rejeté par le corail avec lequel elles réalisent la photosynthèse.	L'association modulable avec l'espèce de zooxanthelles permet une adaptation du corail aux conditions du milieu, donc une installation durable des deux partenaires dans un milieu hostile. Cette plasticité phénotypique dépend des espèces recrutées, c'est pourquoi cette association est source de diversification entre individus.
Fabacées et <i>Rhizobium</i> (doc. 1, 4 et 5)	Interaction symbiotique	La plante profite d'une source de nutriments azotés produits par les bactéries <i>Rhizobium</i> et ces derniers profitent d'un gîte et d'une source de carbone produite par la plante.	Cette association apporte aux plantes une nouvelle fonction métabolique, celle d'utiliser le N ₂ atmosphérique capté par les bactéries, pour la production de protéines. Cette association est source de diversification car elle est à l'origine d'une nouvelle fonction dans le vivant et distingue les individus entre eux (entre fabacées de la même espèce), selon qu'ils sont en symbiose ou non.
<i>Fourmis L. nylanderi</i> et leurs vers plats parasites <i>A. brevis</i> (doc. 1 et 6)	Interaction pathogène	Le parasite modifie l'aspect et le comportement de la fourmi, la rendant plus exposée à sa prédation, notamment par le pic épeiche. Ce dernier est le 2 ^e hôte obligatoire permettant au parasite de boucler son cycle de vie.	Le parasite modifiant l'aspect physique et le comportement de son hôte, cette association est source de diversification entre congénères de la même espèce, selon qu'ils sont ou non parasités.

Associations	Nature de l'association	Fonctionnement de l'interaction	Source de diversification du vivant
Être humain /microbiote (doc. 1 et 7)	Interaction symbiotique en cas de microbiote équilibré	Les bactéries intestinales profitent d'un gîte et d'un apport de matière nutritive. Celles-ci améliorent la digestion de l'hôte et stimulent son immunité	Selon les communautés microbiennes hébergées, le phénotype de l'hôte est modulé : capacité à mieux digérer, mieux se protéger.
	Interaction pathologique en cas d'un déséquilibre du microbiote	Un déséquilibre du microbiote intestinal peut engendrer l'obésité ou des maladies chroniques chez l'être humain.	Le microbiote intestinal, par la diversité des communautés microbiennes hébergées par les individus, contribue à diversifier leur phénotype comportemental (chez la souris) et pathologique (chez l'être humain).

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite ou partielle	Démarche pertinente <ul style="list-style-type: none"> La description de l'interaction permet de comprendre la nature pathogène ou bénéfique de l'interaction 	Démarche à la fois pertinente et cohérente <ul style="list-style-type: none"> La description de l'interaction permet de comprendre en quoi elle est source de diversification du vivant.
Contenu	Absent	Incomplet par manque d'extraction d'informations des documents. Ou présente des erreurs.		Ne présente pas d'erreur et est complet
Communication	Non conforme	Il y a un tableau ou un texte. <ul style="list-style-type: none"> L'organisation des éléments de réponse est maladroite Et/ou Les éléments de réponse reprennent une partie des éléments des documents, sans reformulation 	Si tableau : il est correctement renseigné, il y a des titres aux colonnes et/ou aux lignes Si texte : l'organisation des éléments de réponse est cohérente.	Si tableau : il est renseigné avec un titre Si texte : la réponse est bien structurée, la syntaxe est correcte, sans faute d'orthographe

Unité 2

> Éléments de correction

Au moment de la saison de la reproduction, les oiseaux mâles jardiniers satinés se distinguent les uns des autres par les berceaux qu'ils construisent à partir de brindilles, de fragments d'animaux et parfois d'objets humains. Ils peignent l'intérieur du berceau avec des poussières de charbon et des baies bleues-noires. Ils paraderont devant ces berceaux pour attirer les femelles qui accepteraient la copulation (doc. 1). Des chercheurs ont montré que les décorations que le mâle y dépose améliorent son succès copulateur. En particulier, les chercheurs ont mis en évidence une corrélation positive et forte entre son succès copulateur et le recrutement de feuilles jaunes, d'objets bleus et de mue de serpents. Ce comportement de construire et décorer un berceau, qui diversifie le phénotype étendu des mâles, résulte d'une sélection sexuelle (doc. 2).

Un second exemple de construction est donné par le fourreau des larves de trichoptères. Ce fourreau est construit en recrutant des graviers ou des débris végétaux de l'environnement. D'aspects très différents, ils sont sources de diversification du phénotype étendu entre individus de la même espèce (doc. 3). Ce fourreau permet la protection et le camouflage des larves, améliorant leur chance de survie.

Chez l'être humain, s'habiller ou se coiffer relève du phénotype étendu. La mode contribue à diversifier les individus. Adopter la mode punk peut signifier l'appartenance au mouvement et à l'idéologie punk (doc 4). Mais on peut aussi vouloir défier un système de valeurs raciales, comme le fit Rosa Parks, en recrutant pour elle un siège réservé aux « blancs » dans le bus (doc. 5).

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et/ou partielle La réponse ne répond pas à tous les éléments de la question et/ou n'est pas argumentée.	Démarche pertinente Presque tous les documents sont exploités pour répondre à la question	Démarche à la fois pertinente et cohérente Tous les documents sont exploités pour répondre à la question
Contenu	Absent	Incomplet par manque d'extraction d'informations des documents. Ou présente des erreurs.	Ne présente pas d'erreur et est complet	
Communication	Non conforme	<ul style="list-style-type: none">• L'organisation des éléments de réponse est maladroiteEt/ou• Les éléments de réponse reprennent une partie des éléments des documents, sans reformulation	L'organisation des éléments de réponse est cohérente.	La réponse est bien structurée, la syntaxe est correcte, sans faute d'orthographe

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas »

Unité 1

Question 1. Justifiez le terme de symbiose utilisé pour décrire l'interaction entre un corail et les zooxanthelles qu'il héberge (doc. 1 et 2).

Le corail héberge dans ses cellules des zooxanthelles photosynthétiques. Il complète sa nourriture avec les photosynthétats des zooxanthelles tandis que ces dernières bénéficient du CO₂ rejeté par le corail avec lequel elles réalisent la photosynthèse. Cette interaction étant durable et bénéfique aux partenaires, elle peut être qualifiée de symbiose.

Question 2. Présentez le principe de l'expérience du doc. 3 et comparez les communautés de zooxanthelles hébergées chez les coraux prélevés entre – 20 et – 23 m de profondeur et transférées vers – 2 à – 4 m de profondeur, à celles présentes chez les coraux de la même espèce :

- qui sont restés en profondeur ;
- qui se trouvent depuis 1 an entre – 2 et – 4 m de profondeur.

Proposez une explication à ces résultats et déduisez-en pourquoi l'association corail/zooxanthelles est source de diversité (doc. 1 et 3).

Le doc. 3 démontre expérimentalement en quoi cette association contribue à modifier le phénotype étendu des deux partenaires. Il s'agit d'expériences de transfert de quatre espèces de coraux, à des profondeurs différentes de celles au niveau desquelles elles ont été récoltées. Les résultats révèlent notamment que la moitié des coraux vivant entre – 20 m et – 23 m blanchit au bout de 8 semaines lorsque les coraux sont ramenés entre – 2 à – 4 m sous la surface. Or ce blanchissement témoigne de l'expulsion des zooxanthelles par les coraux. Au bout d'un an, tous ont survécu et on constate, contrairement aux coraux témoins (non déplacés), des communautés de zooxanthelles différentes de celles du départ, et plus similaires à celles des coraux situés entre – 2 et – 4 m de profondeur. Ces coraux se débarrassent donc de certaines espèces zooxanthelles et en acquièrent d'autres, sans doute plus adaptées au changement du milieu. L'association avec des espèces de zooxanthelles différentes permet une accommodation du corail aux conditions du milieu. Cette association est donc source de diversification entre individus.

Question 3. Justifiez le terme de symbiose utilisé pour décrire l'interaction entre une plante fabacée et les bactéries qu'elle héberge (doc. 4 et 5).

La plante profite d'une source supplémentaire de nutriments azotés produits par les bactéries *Rhizobium* et ces derniers profitent d'un gîte et d'une source de carbone produite par la plante. Cette association étant durable et bénéfique aux partenaires, elle peut être qualifiée de symbiose.

Question 4. Expliquez en quoi cette association est source de diversification entre plantes de la même espèce (doc. 1, 4 et 5).

Cette association apporte aux plantes une nouvelle fonction métabolique, celle d'utiliser le N₂ atmosphérique capté par les bactéries, pour la production de protéines. Cette association est source de diversification car elle innove une fonction dans le vivant et distingue les individus entre eux (entre fabacées de la même espèce), selon s'ils sont en symbiose ou non.

Question 5. Montrez que l'interaction entre les fourmis *L. nylanderi* et leurs vers plats parasites *A. brevis* est pathogène et justifiez que cette association est source de diversification entre fourmis (doc. 1 et 6).

Le parasite modifie l'aspect et le comportement de la fourmi, la rendant plus exposée à sa prédation, notamment par le pic épeiche. C'est pourquoi cette association est pathogène. Le pic épeiche étant le 2^e hôte obligatoire du ver parasite, la prédation de la fourmi lui permet de boucler son cycle de vie. Selon le parasitage ou non des fourmis, leur aspect et leur comportement changent. C'est pourquoi cette association est source de diversification entre congénères de la même espèce.

Question 6. Montrez que l'interaction entre humain/bactéries intestinales peut être symbiotique ou pathogène et justifiez que cette association est source de diversification entre êtres humains (doc. 1 et 7).

Les bactéries intestinales profitent d'un gîte et d'un apport de matière nutritive. Celles-ci améliorent en retour la digestion de l'hôte et stimulent son immunité. Cette interaction étant durable et bénéfique aux partenaires, elle peut être qualifiée de symbiose. Toutefois, des dysbioses peuvent engendrer chez l'être humain l'obésité ou des maladies chroniques. Cette interaction peut donc être pathogène. Selon les communautés microbiennes hébergées, le phénotype de l'hôte est modulé : meilleure digestion, meilleure immunité ou à l'inverse, phénotype pathologique. C'est pourquoi cette association est source de diversification entre êtres humains.

Unité 2

Question 1. Indiquez comment les mâles jardiniers satinés se distinguent les uns des autres, et dans quel but (doc. 1).

Au moment de la saison de la reproduction, les oiseaux mâles jardiniers satinés se distinguent les uns des autres par les berceaux qu'ils construisent à partir de brindilles, de fragments d'animaux et parfois d'objets humains. Ils paraderont devant ces berceaux pour attirer les femelles et copuler. Ce comportement de construire et décorer un berceau résulte d'une sélection sexuelle.

Question 2. Précisez, parmi les éléments recrutés, ceux qui augmentent le succès copulateur des mâles (doc. 2).

Des chercheurs ont montré que les décorations que le mâle dépose dans son berceau améliorent son succès copulateur. En particulier, les chercheurs ont mis en évidence une corrélation positive et forte entre son succès copulateur et le recrutement de feuilles jaunes, d'objets bleus et de mue de serpents.

Question 3. Montrez que le recrutement de composants de l'environnement par les larves de trichoptères contribue à les distinguer, et proposez un avantage de ce comportement à la sélection naturelle (doc. 3).

Les larves de trichoptères prélevent du milieu des graviers et débris végétaux afin de se construire un fourreau tout autour de leur corps. D'aspects très différents, ces fourreaux sont sources de diversification du phénotype étendu entre individus de la même espèce et entre espèces différentes. Ce fourreau, construit avec les composants de l'environnement, permet la protection et le camouflage des larves, améliorant leur chance de survie.

Question 4. Proposez deux exemples de recrutements d'éléments inertes chez l'être humain et expliquez ce comportement à la lumière des sciences sociales (doc. 4 et 5).

Chez l'être humain, s'habiller ou se coiffer relève du phénotype étendu. La mode contribue à diversifier le phénotype étendu des individus. Adopter la mode punk peut signifier l'appartenance au mouvement et à l'idéologie punk (doc. 4). Mais on peut aussi vouloir défier un système de valeurs raciales, comme le fit Rosa Parks, en recrutant pour elle un siège réservé aux « blancs » dans le bus (doc. 5).

Unité 3

1.

Chez les jeunes chimpanzés et macaques, l'observation puis l'imitation de la mère constitue la première phase d'apprentissage. Ensuite, l'observation et l'interaction avec les autres congénères enrichira leurs pratiques (doc. 1). Ces pratiques contribuent à diversifier les populations de plusieurs manières.

Tout d'abord, parce qu'une nouvelle pratique peut ou non apparaître dans une population. C'est le cas d'une communauté de macaques japonais, dans laquelle en 1956, une femelle jeta les grains de blés dans l'eau ce qui les sépara du sable et lui permit de les manger. Cette pratique s'est rapidement répandue dans la communauté : elle fut adoptée par 22 congénères 6 ans plus tard (doc. 3). À l'inverse, dans une communauté chimpanzés en Côte-d'Ivoire, l'avantage sélectif à utiliser préférentiellement du bois pour casser des coquilles de noix moins dures en fin de saison, plutôt que la pierre (matériau plus rare), n'est pas apparue, alors qu'elle est présente dans deux autres communautés voisines et avec des ressources similaires (doc. 2). Dans celles-ci, l'utilisation d'outils différents (pierre ou bois) pour une même fonction dépend des contraintes de l'environnement (noix plus résistantes en début de saison et pierre plus rares dans l'environnement). Ces traits culturels, qui apparaissent ou pas, et parfois combinés aux contraintes de l'environnement contribuent donc à diversifier les populations. Enfin, des innovations peuvent aussi disparaître. L'étude de populations de primates a révélé qu'une pratique avantageuse introduite par l'arrivée d'une femelle dans une population peut être abandonnée par celle-ci, par conformisme, plutôt que de se répandre, et ainsi disparaître de la population (doc. 1).

Ainsi l'apparition de pratiques culturelles diverses, leur maintien ou leur disparition dans les populations, créent une infinité de combinaisons de traits culturels, propres à chaque population.

2.

Les Kirghizes et les Kazakhs sont plus proches linguistiquement et génétiquement entre eux que chacun avec les Tadjiks dont ils sont pourtant chacun plus proches géographiquement qu'entre eux.

3.

Généralement, la distance génétique est corrélée à la distance géographique. Or, dans le cas des Kirghizes et Kazakhs, leur distance génétique est corrélée à leur distance linguistique. En effet, la langue constitue une « barrière » à la reproduction, si bien que deux populations proches géographiquement mais éloignées linguistiquement se reproduiront moins entre elles qu'avec une population plus proche d'elles linguistiquement, même si elle est plus éloignée géographiquement. La limitation de ces échanges maintient, voire accentue les différences génétiques entre populations.

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

1. Les Taï ont une seule pratique, celle de picorer les fourmis de la litière (technique 2), tandis que les Bossous attrapent les fourmis de la litière soit en raclant à la main la baguette où se trouvent les fourmis (technique 3), soit en mettant la baguette couverte de fourmis directement dans leur bouche (technique 1). Le fait que ces populations aient des techniques différentes d'utilisation d'un même outil, pour une même proie, alors qu'elles seraient capables de les utiliser selon les trois techniques, suggère fortement l'apparition de traits culturels (ici des pratiques), transmis de génération en génération.

2. Les fourmis épigées sont plus rapides et agressives que les autres. L'utilisation par les Bossous d'une baguette plus longue que celle utilisée pour récolter les fourmis de la litière permet d'avoir le temps d'attraper les fourmis les plus rapides avant que la main qui tient la baguette ne se fasse mordre. La longueur de la baguette est donc adaptée au comportement des fourmis.

3. Le choix des fourmis collectées semble aussi être une influence socio-culturelle. En effet, les fourmis épigées sont présentes dans le milieu de vie des deux populations. Elles sont comestibles puisque les Bossous s'en nourrissent, mais pas les Taï. Cela suggère l'existence d'un choix alimentaire chez les Taï. Or une habitude alimentaire est un trait culturel.

Exercice 3

On constate que moins de 20 % des larves hybrides survivent, tandis qu'environ 80 % des larves issues de croisements intra-spécifiques survivent. De plus, la suppression par antibiothérapie du microbiote des hybrides et des non-hybrides, entraîne des taux de survie qui ne sont plus significativement différents entre ces deux types de larves. Enfin, la ré-inoculation aux hybrides de bactéries caractéristiques des hybrides du dispositif contrôle, et la ré-inoculation aux non-hybrides de bactéries typiques de leur espèce, rétablit des différences significatives entre la survie des larves hybrides (25 à 30 %) et celles des non-hybrides (45 à 60 %).

La présence du microbiote est donc liée à la faible survie des hybrides : les symbiotes microbiens contribuent à l'isolement reproductif entre espèces.

Exercice 4

Les macropodes à rostre prélèvent des algues et les disposent sur eux. Cela modifie leur aspect : le recrutement de composants du milieu diversifie leur phénotype étendu. Ce comportement s'explique sûrement par son intérêt sélectif : celui de se protéger et de se camoufler. Dans la mesure où les algues recrutées ne sont pas les mêmes selon les individus, l'aspect des macropodes varie. Ce recrutement est donc source de diversification entre individus.

Exercice 5

Connaissances : **en gras**

Données issues des documents : *en italique*

Les filaments de champignons sont associés aux pins au niveau de leurs racines, autour desquelles ils forment un manchon. L'organe hybride se nomme « mycorhize » (doc. 1).

Le résultat de l'inoculation de pins montre que par rapport aux pins non mycorhizés, les pins mycorhizés croissent mieux (doc. 2 et 3). En effet, après 10 mois de culture de pins maritimes (doc. 3), ces derniers :

- ont une masse 2,5 fois plus importante ;*
- sont presque 2 fois plus riches en phosphore ;*
- sont 1,2 fois plus riches en azote.*

La corrélation positive de ces trois facteurs s'explique par le fait que les plantes ont besoin d'azote et de phosphore pour leur croissance.

La différence entre les pins mycorhizés et non mycorhizés résulte d'un transfert, du champignon à la plante, d'éléments azotés et phosphorés.

Ces essais d'inoculation permettent de vérifier que les pins envisagés pour le reboisement sont adaptés au milieu, c'est-à-dire capables de nouer une symbiose avec les champignons présents dans le milieu, favorisant leur croissance. C'est le cas pour le pin maritime, dans le milieu étudié.

Chapitre 5. La datation relative

> Ce chapitre introduit le thème 2, en abordant les méthodes de reconstitution d'une histoire géologique. L'objectif ici est de montrer que les objets géologiques témoignent d'une histoire jalonnée d'événements que l'on peut dater les uns par rapport aux autres, grâce à des principes de datation relative (**unités 1 et 2**). Par ailleurs, il s'agit aussi de montrer comment l'étude des successions d'association de fossiles stratigraphiques a rendu possible le découpage du temps en intervalles (**unité 3**) et l'établissement de l'échelle stratigraphique (**unité 4**).

> La succession des unités suit la démarche historique. En effet, dès le milieu du XVII^e siècle émerge le concept de datation relative, d'abord grâce à l'étude de la relation géométrique entre les roches (**unité 1**), puis aux associations de fossiles (**unité 2**). À partir de la fin du XVIII^e siècle, on découpe le temps en intervalles (**unité 3**) qui, se succédant les uns aux autres, permettront d'établir l'échelle stratigraphique, sans âge absolu (**unité 4**). L'apport de la datation absolue permettra de dater de façon absolue les limites d'intervalles (abordée dans le **chapitre 6**).

Thème 2 À la recherche du passé géologique de notre planète	
Connaissances	Capacités, attitudes
<p>Les relations géométriques (superposition, recouplement, inclusion) permettent de reconstituer la chronologie relative de structures ou d'événements géologiques de différentes natures et à différentes échelles d'observation. > Unité 1</p> <p>Les associations de fossiles stratigraphiques, fossiles ayant évolué rapidement et présentant une grande extension géographique, sont utilisées pour caractériser des intervalles de temps. > Unité 2</p> <p>L'identification d'associations fossiles identiques dans des régions géographiquement éloignées permet l'établissement de corrélations temporelles entre formations. > Unité 3</p> <p>Les coupures dans les temps géologiques sont établies sur des critères paléontologiques : l'apparition ou la disparition de groupes fossiles. > Unités 2 à 4</p> <p>La superposition des intervalles de temps, limités par des coupures d'ordres différents (ères, périodes, étages), aboutit à l'échelle stratigraphique. > Unité 4</p>	<p>Utiliser les relations géométriques pour établir une succession chronologique d'événements à partir d'observations à différentes échelles et sur différents objets (lames minces observées au microscope, affleurements, cartes géologiques). > Unité 1 et activité pratique</p> <p>Observer une succession d'associations fossiles différentes dans une formation géologique et comprendre comment est construite une coupure stratigraphique (par exemple par l'étude des successions d'ammonites, de trilobites ou de foraminifères). > Unités 2 et 3 ; activité pratique</p> <p>Comprendre les modalités de construction de l'échelle stratigraphique ; discuter les fondements et la validité des différents niveaux de coupures. > Unité 4</p>

Compétences travaillées et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
Pratiquer des langages <ul style="list-style-type: none"> • Communiquer à l'écrit sous forme d'un texte • Communiquer à l'écrit par un schéma • Utiliser un logiciel de simulation • Utiliser les SIG 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1, 3 et 4 • Unité 1 • Unités 4 et 6 • Unités 1, 3, 4 ; activités pratiques
Pratiquer des démarches scientifiques <ul style="list-style-type: none"> • Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution • Interpréter des résultats expérimentaux des données et en tirer des conclusions • Observer, expérimenter 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 1 • Unités 2 et 3 • Activités pratiques
Concevoir, créer, réaliser <ul style="list-style-type: none"> • Concevoir et mettre en œuvre un protocole 	<ul style="list-style-type: none"> • Activités pratiques
Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre <ul style="list-style-type: none"> • Identifier les techniques pour garder une trace : faire un tableau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 1

Choix pédagogiques

Unité 1

> L'objectif de cette unité est d'amener l'élève à reconstituer l'histoire géologique de la région de Flamanville, à partir d'observations d'affleurements pour lesquels il est possible d'appliquer des principes de datation relative. Il est demandé à l'élève d'expliquer sa démarche, c'est-à-dire de préciser les principes de datation qu'il a utilisé pour proposer son scenario.

> Le **document 1** propose une activité utilisant les SIG qui peut se réaliser en complément ou à la place d'une sortie de terrain (voir **activité pratique** page 132). Elle permet de visualiser l'ensemble de la région avec des images satellites et de localiser les affleurements, facilitant ainsi la reconstitution des différents événements géologiques. Les affleurements montrés dans les documents 2 à 5 sont par ailleurs situés sur la carte géologique simplifiée de la région, dans le **document 7**. Il peut être intéressant de résigner chaque affleurement sur cette carte, pour montrer que la datation relative s'applique à différentes échelles, comme mentionné dans le programme

> Le **document 2** est une photo de la granodiorite de Flamanville. Il rappelle qu'une telle roche s'est formée en profondeur et explique son affleurement aujourd'hui, sous l'effet de l'érosion dont témoignent les diaclases.

> Le **document 3** montre la granodiorite au contact de son encaissant métamorphisé dans le faciès des cornéennes. Ce faciès se réalise dans des conditions de basse pression et relative haute température, caractéristique d'intrusions platoniques. Il permet d'appliquer le principe de recouplement, par l'observation de l'aurore métamorphique.

> Le **document 4** présente des fragments de cornéennes, nommées « enclaves », dans la granodiorite. Ces enclaves témoignent de la fragmentation et de l'incorporation de roches encaissantes, lors de la mise en place du pluton. Cet objet permet d'illustrer le principe d'inclusion.

> Le **document 5**, montrant la formation des schistes et calcaires de Néhou métamorphisés et inclinés, permet d'illustrer la phase d'orogenèse. Il explique en effet que cette inclinaison résulte de plissements.

> À l'issue de ces observations, l'élève découvre dans le **document 6** trois principes de datation relative, qui lui permettront d'interpréter la disposition des différents objets et leurs relations. Celles-ci traduisent des événements géologiques, qui datés les uns par rapport aux autres, permettent de reconstituer l'histoire géologique de la région.

Unité 2

> Dans cette unité, l'élève découvre qu'il est possible d'établir des corrélations temporelles d'unités géographiquement éloignées, grâce à l'analyse du contenu fossile des roches. Cette unité suit une démarche scientifique, avec une dimension historique :

– on découvre dans la page de gauche deux fossiles d'unités géographiquement éloignées, dont l'un d'eux a marqué l'histoire des découvertes paléontologiques en Angleterre au début du XIX^e siècle ;
– on établit en page de droite des corrélations temporelles d'unités éloignées géographiquement, grâce à un nouveau principe de datation relative, énoncé quelques décennies plus tôt par l'un des pionniers de la datation paléontologique.

> Le **document 1** présente deux unités géographiquement éloignées en Angleterre et caractérisées par une superposition de strates non perturbées et au contenu fossile riche : Robin Hood's bay (région du Yorkshire) et Lyme Regis (région du Dorset).

> Les **documents 2 et 3** présentent deux exemples de fossiles retrouvés :

– un ichtyosaure découvert à Lyme Regis par Mary Fleming, alors âgée de 12 ans, qui deviendra l'unique femme parmi les pionniers de la paléontologie en Europe (doc. 2) ;

– une espèce d'ammonite (doc. 3) découverte à la fois à Lyme Regis et Robin Hood's bay. Les textes associés à ces deux documents donnent des informations qui, mises en relation avec le document 4, permettront à l'élève d'en déduire que seule l'ammonite peut être utilisée pour la datation relative (fossile stratigraphique).

> Le **document 4** présente l'émergence de deux principes de datation relative, grâce à l'observation par William Smith à la fin du XVIII^e siècle d'une succession d'associations de fossiles dans des strates superposées qu'il retrouve dans des affleurements éloignés : les principes de continuité et d'identité paléontologique. Ce document cite par ailleurs les critères que doivent présenter les fossiles pour être utilisés en datation relative et qualifiés de « fossiles stratigraphiques ». Ces critères permettront à l'élève d'identifier les fossiles grâce auxquelles il établira des corrélations temporelles entre Lyme Regis et Robin Hood's bay.

> Le **document 5** présente le log des deux affleurements avec leur contenu fossilifère.

Unité 3

> Cette unité s'inscrit dans la suite historique de la découverte des fossiles comme outils de datation relative (unité 2). On cherche désormais à établir une échelle des temps géologiques à valeur universelle, en identifiant une succession d'intervalles de temps. Les fossiles deviennent alors aussi des outils de découpage du temps. L'organisation de l'unité en page de gauche et page de droite suit aussi la démarche historique qui a abouti à ce découpage du temps. Le découpage fin en étages, initié au milieu du XIX^e siècle, s'appuie sur des associations de fossiles, dont les stratotypes dits « d'unité » sont robustes à l'échelle régionale (page de gauche). À partir du XX^e siècle, on s'accorde pour définir les limites d'étages sur l'apparition et/ou la disparition d'espèces ou de groupes, dans des stratotypes dits « de limite », à valeur internationale (page de droite).

> Le **document 1** présente la démarche d'Orbigny puis d'Oppel pour découper le temps. Le premier recherche des associations fossilifères dont les différences sont très marquées, pour diviser le temps en étage. Cette démarche traduit sa pensée fixiste : il considère qu'il existe des ruptures dans l'évolution des espèces. Or cette méthode est incompatible avec l'évolution graduelle des espèces que remarque Oppel. Ce dernier propose un découpage en zones et sous-zones, découpage plus fin, qui tient compte de l'évolution graduelle des espèces. Ainsi, une espèce peut se retrouver dans plusieurs sous-zones : ce qui distingue une sous-zone d'une autre est l'association unique des fossiles.

> Le **document 2** présente trois affleurements parmi d'autres qui ont permis de définir le stratotype d'unité du Sinémurien, en établissant une succession d'associations de fossiles grâce à des corrélations temporelles.

> Le **document 3** explique l'intérêt de choisir des stratotype de limite, désormais utilisés pour découper le temps et le **document 4** donne l'exemple du stratotype qui définit la base du Sinémurien. Le point stratotypique mondial, situé au niveau de cette limite, a été fixé au niveau de la première apparition de trois espèces d'ammonites.

Unité 4

> Cette unité « dézoomé » sur l'échelle stratigraphique, par rapport l'unité 3, dont le niveau d'étude est l'étage. Elle montre la succession des étages et quelques indices ayant permis un découpage du temps à différents niveaux.

> Le **document 1** est une interview de Patrick de Wever, qui explique les indices géologiques qui ont mené au découpage du temps à des niveaux différents et présente quelques limites.

> Le **document 2** illustre quelques exemples de découpage.

Corrigé des parcours « tâche complexe »

Unité 1

> Éléments de correction

On attend une synthèse chronologique des différents événements géologiques, sous la forme d'un tableau ou d'un texte. Cette synthèse doit être justifiée en s'appuyant sur les documents et en explicitant le principe utilisé. Voici les éléments de réponses attendus, dans un ordre chronologique.

Succession chronologique des événements géologiques survenus dans la région de Flamanville d'après les observations de terrain.

Observations	Interprétation
Superposition de roches sédimentaires cambro-siluriennes (doc. 7).	D'après le principe de superposition , il y a donc eu dépôts successifs des couches cambrienne, ordovicienne et silurienne.
Couches cambro-siluriennes (doc. 7) et formation dévonienne (doc. 5) inclinées et recoupées par le pluton qui n'est pas affecté par des plis.	D'après le principe de recouplement , la déformation en pli à l'origine de l'inclinaison des couches, qui témoigne d'une phase d'orogenèse, est postérieure au dépôt de la couche dévonienne et antérieure à la mise en place du pluton.
Les roches ordoviciennes (doc. 3) et dévonniennes (doc. 5), qui constituent l'encaissant du pluton, sont métamorphisées au contact du granite.	D'après le principe de recouplement , le pluton s'est mis en place postérieurement au dépôt de ces couches sédimentaires, et au sein de ces couches, ce qui les a métamorphisées. Il est donc post-dévonien.
Des fragments d'encaissant métamorphisé dans le faciès des cornéennes sont inclus dans la granodiorite (doc. 4)	D'après le principe d'inclusion , ces inclusions sont postérieures à la granodiorite. Elles résultent de la fragmentation de l'encaissant et de son incorporation au pluton, lors de la mise en place de ce dernier. Cet indice corrobore l'interprétation des doc. 3 et 5.
Sur la granodiorite, repose un petit lambeau d'une couche sénonienne non métamorphisée (doc. 7).	D'après le principe de superposition , la mise à l'affleurement du pluton, par érosion superficielle, est antérieure au dépôt du Sénonien.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée : • Les interprétations ne sont pas argumentées sur la base des observations et/ou les principes de datation ne sont pas évoqués	Démarche pertinente • Presque tous les documents sont exploités, et les interprétations sont argumentées	Démarche à la fois pertinente et cohérente • Tous les documents sont exploités et les interprétations sont argumentées
Contenu	Absent	Incomplet par manque d'extraction d'informations des documents. Ou présente des erreurs.		Ne présente pas d'erreur et est complet
Communication	Non conforme	Il y a un tableau ou un texte	<ul style="list-style-type: none"> • Si tableau : il est correctement renseigné, il y a des titres aux colonnes / lignes • Si texte : l'organisation des éléments de réponse est cohérente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Si tableau : il est renseigné avec un titre • Si texte : l'organisation des éléments de réponse est cohérente et fluide.

Unité 3

> Éléments de correction

Le découpage du temps s'est tout d'abord fondé sur la recherche d'affleurements se distinguant les uns des autres par leur faune fossile (d'Orbigny). Cette méthode consiste à identifier des renouvellements entiers de faunes, qui se succèdent suite à des disparitions totales. Cette première tentative amène d'Orbigny à définir l'unité de temps de base : l'étage. Il propose 27 étages. Cette unité est bientôt incrémentée par la détermination de zones, fondée sur l'identification d'associations de fossiles dans une suite continue (Oppel). Ces affleurements de références, nommés « stratotypes d'unité », ont pour vocation de définir le contenu entier d'un étage (doc. 1 et 2). Toutefois, ils n'ont qu'une valeur régionale. De plus, les enregistrements ne sont pas continus ou ont pu être effacés : ces stratotypes minimisent donc le temps qui s'est écoulé (doc. 3).

Aujourd'hui, les géologues délimitent les étages, en identifiant non pas des affleurements caractérisant leurs contenus, mais des affleurements caractérisant la limite entre deux étages. Ces stratotypes sont dits de limites (doc. 3). Sachant qu'un étage est défini le plus souvent par sa base, grâce à l'apparition d'un (ou plusieurs) fossile(s) stratigraphique(s), alors d'après le contenu fossilifère des strates autour de la limite Hettangien/Sinémurien, la base du Sinémurien est défini par l'apparition des espèces d'ammonites *V. Quantoxense*, *V. palmeri* et *Metophioceras sp.*

En définissant la base des étages, situés au-dessus de ceux qui les précèdent, on établit une succession d'étages découplant le temps.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et/ou partielle La réponse ne répond pas à tous les éléments de la question et/ou n'est pas argumentée.	Démarche pertinente • Presque tous les documents sont exploités pour répondre à la question	Démarche à la fois pertinente et cohérente • L'évolution historique des idées est apparente
Contenu	Absent	Incomplet par manque d'extraction d'informations des documents. Ou présente des erreurs.		Ne présente pas d'erreur et est complet
Communication	Non conforme	L'organisation des idées est maladroite	L'organisation des éléments de réponse est cohérente.	L'organisation des éléments de réponse est cohérente, la rédaction est de qualité et respecte les règles de grammaire et d'orthographe

Unité 4

> Éléments de correction

L'échelle des temps géologiques est organisée en ères, scindées en périodes, elles-mêmes scindées en étages.

Les événements biologiques majeurs permettent de délimiter la base des ères sont :

- diversification rapide du vivant à la base du primaire ;
- crises biologiques au début du secondaire et du tertiaire, comme en témoigne, pour cette dernière, un changement brutal d'espèces de foraminifères planctoniques et la disparition des ammonites.

Trois autres crises délimitent la base de trois périodes : celles du Silurien, du Carbonifère et du Jurassique. Toutefois, toutes les périodes ne sont pas délimitées par des crises. Par exemple, la fin du Permien est caractérisée par la disparition des trilobites et la fin du Trias est caractérisée par la disparition des conodontes.

À une échelle plus fine, celle de l'étage, il faut rechercher des indices plus discrets. Notre connaissance du registre fossile est incomplète, car ce registre n'a pas été en totalité découvert, ou a pu être effacé. De plus, l'absence d'un fossile stratigraphique dans une roche n'est pas considérée comme l'absence de l'espèce : les conditions au moment du dépôt n'étaient peut-être pas localement réunies pour le développement de l'espèce ou la fossilisation des individus. Pour délimiter l'étage, on a donc seulement choisi l'apparition d'une ou plusieurs espèces de fossiles stratigraphiques, plutôt que de rechercher des événements majeurs ou des événements de disparition. On le constate au Cambrien, où l'évolution graduelle des trilobites permet ce découpage fin.

Ainsi, l'étude d'associations de fossiles stratigraphiques, se modifiant au cours du temps, a permis d'établir des corrélations temporelles entre formations. Toutefois, ces corrélations ne permettent pas seules de dater ces formations. La mise au point de techniques de datation absolue a permis d'attribuer des âges absolu à ces dernières.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et/ou partielle • La réponse ne répond pas à tous les éléments de la question et/ou n'est pas argumentée.	Démarche pertinente • Les différents niveaux de coupure sont justifiés avec des indices géologiques	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Des erreurs ou incomplet par manque d'extraction d'informations des documents. Par exemple : – ne traite pas des différents niveaux de coupures – ne discute pas des fondements de ces niveaux – ne présente pas l'apport de la datation absolue dans l'échelle chronostratigraphique.	Ne présente pas d'erreur et est complet	
Communication	Non conforme	L'organisation des idées est maladroite	L'organisation des éléments de réponse est cohérente.	L'organisation des éléments de réponse est cohérente, la rédaction est de qualité et respecte les règles de grammaire et d'orthographe

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas »

Unité 1

Ce parcours pas à pas propose une question unique, dans laquelle les événements géologiques sont précisés. L'élève doit retrouver les observations de terrain et le principe de datation utilisé pour chaque événement.

Question. Le tableau ci-dessous présente la succession des événements géologiques qui se sont produits dans la région de Flamanville. Complétez ce tableau en indiquant les observations de terrain et le principe de datation utilisé ayant permis de reconstituer cette histoire géologique.

Succession des événements géologiques	Observation de terrain	Principe de datation relative
1. Dépôts successifs des couches cambrienne, ordovicienne et silurienne		
2. Phase d'orogenèse postérieure au dépôt de la couche dévonienne et antérieure à la mise en place du platon.		
3. Intrusion du platon granodioritique dans l'encaissant cambro-dévonien		
4. Mise à l'affleurement du platon, par érosion superficielle, anté-sénonienne		

Corrigé

Succession des événements géologiques	Observation de terrain	Principe de datation relative
1. Dépôts successifs des couches cambrienne, ordovicienne et silurienne	Superposition de couches sédimentaires, de bas en haut, cambrienne, ordovicienne et silurienne (doc. 7)	Principe de superposition
2. Phase d'orogenèse postérieure au dépôt de la couche dévonienne et antérieure à la mise en place du platon.	Couches cambro-siluriennes (doc. 7) et formation dévonienne (doc. 5) inclinées et recoupées par le platon qui n'est pas affecté par des plis.	Principe de recouplement
3. Intrusion du platon granodioritique dans l'encaissant cambro-dévonien, métamorphisant son encaissant	Les roches ordoviciennes (doc. 3) et dévonniennes (doc. 5), qui constituent l'encaissant du platon (doc. 7), sont métamorphosées au contact du granite. Des fragments d'encaissant métamorphisé dans le faciès des cornéennes sont inclus dans la granodiorite (doc. 4)	Principe de recouplement Principe d'inclusion
4. Mise à l'affleurement du platon, par érosion superficielle, anté-sénonienne	Sur la granodiorite repose un petit lambeau d'une couche sénonienne non métamorphosée (doc. 7).	Principe de superposition

Unité 2

Question 1. Identifiez les fossiles stratigraphiques à exploiter pour dater relativement les roches, en justifiant votre réponse (doc. 2 à 5).

Les espèces d'ammonites sont exploitables car elles présentent les trois critères d'un fossile stratigraphique (doc .3, 4 et 5) :

- espèces avec une grande extension géographique qui permet de corrélérer des strates en des endroits éloignés du globe ;
- espèces à courte durée à l'échelle des temps géologiques car elles évoluent rapidement, ce qui permet d'avoir une précision fine dans le temps ;
- individus abondants.

En revanche, les grands vertébrés ne sont pas des fossiles stratigraphiques car ils sont peu abondants dans le registre fossilifère et ont une faible répartition géographique (doc. 2, 4 et 5).

Question 2. Déterminer l'ordre d'apparition des fossiles stratigraphiques, en appliquant le principe de superposition (doc. 5).

D'après le principe de superposition, une strate est plus jeune que celle qu'elle recouvre. On en déduit l'ordre d'apparition des espèces d'ammonites :

- *Arnioceras pseudokriodor*
- *Arnioceras semicostatum*
- *Promicroceras capricornoid*
- *Angulaticeras simpsoni*
- *Bificeras donovani*
- *Liparoceras heptangular*
- *Aegoceras sinuosiforme*
- *Hysteroceras orbignyi*

Question 3. Pour chaque fossile, identifier les formations sédimentaires contemporaines à Lyme Regis et Robin Hood's bay.

D'après le principe d'identité paléontologique, voici la succession chronologique des formations à Lyme Regis et Robin Hood's bay. Celles situées sur la même ligne du tableau sont synchrones :

Succession des dépôts des formations à Lyme Regis et Robin Hood's bay

Lyme Regis	Robin Hood's bay
Lias bleu	
Schistes à calcite	Schistes calcaieux
Marnes noires	Schistes limoneux
Base des Marnes à bélémnites	Schistes pyriteux
Milieu des Marnes à bélémnites	Schistes à nodules ferrugineux
Sommet des Marnes à bélémnites	Grès de staïthes
Grès de Greensand	

Unité 3

Question 1. Indiquez les indices sur lesquels s'appuient d'Orbigny pour découper le temps en étages (doc. 1).

D'Orbigny recherche des affleurements se distinguant entièrement les uns des autres par leur faune fossile. Il considère en effet que l'évolution des espèces est marquée par des disparitions totales, et des renouvellement entiers.

Question 2. Expliquez pourquoi la démarche d'Oppel est plus pertinente que celle de d'Orbigny (doc. 1 et 2).

Oppel cherche, lui, à caractériser des associations de fossiles qu'il observe dans une suite continue. Il ne recherche donc pas de renouvellements entiers, d'un intervalle à l'autre. Cette démarche est plus pertinente car elle est en accord avec l'évolution continue des espèces.

Question 3. Précisez la différence entre un stratotype d'unité et un stratotype de limite (doc. 1 à 3).

Un stratotype d'unité caractérise le contenu fossilifère d'un étage, tandis que le stratotype de limite définit la limite entre deux étages, le plus souvent par l'apparition d'une ou plusieurs espèces fossiles.

Question 4. Exposez les limites et/ou les avantages de ces deux stratotypes (doc. 3).

Le stratotype d'unité est intéressant pour caractériser un étage, à l'échelle d'une région. Toutefois, les conditions environnementales étant, au même moment, variées sur la planète, le contenu fossilifère témoignant d'un environnement de dépôt dans une région donnée, n'est pas transposable à l'échelle mondiale.

De plus, les géologues cherchent à établir une *délimitation d'étages*. Or, entre deux stratotypes d'unité, qui plus est éloignés géographiquement, il y a des lacunes d'enregistrements, soit parce que le temps n'a pas été enregistré, soit parce qu'il a été effacé par érosion. Le stratotype de limite permet lui de positionner précisément dans un enregistrement sédimentaire non perturbé, la limite entre deux étages. On est donc certain qu'avant et après cette limite (de l'ordre du millier d'années), le temps a été enregistré et préservé.

Question 5. Déterminez les indices géologiques ayant amené les géologues à situer le point stratotypique mondial Hettangien/Sinémurien (doc. 4).

Un étage étant défini le plus souvent par sa base et par l'apparition d'un (ou plusieurs) fossile(s) stratigraphiques, on en déduit que la première apparition des espèces *Vermiceras quantoxense*, *Vermiceras palmeri* et *Metaphioceras sp.* a servi à établir le point stratotypique mondial Hettangien/Sinémurien.

Unité 4

Question 1. Nommez les différentes ères citées dans le document et précisez sur quel fondement s'appuie ce niveau de coupure.

Un premier découpage en ères segmente le temps : le Précambrien, le Primaire, le Secondaire, le Tertiaire et le Quaternaire. Ces coupures ont été placées à des moments où des changements majeurs dans la composition de la faune et de la flore terrestre sont survenus :

- diversification rapide du vivant à la base du Primaire ;
- crises biologiques au début du Secondaire et du Tertiaire, comme en témoigne, pour cette dernière, un changement brutal d'espèces de foraminifères planctoniques et la disparition des ammonites.

Question 2. Montrez que le découpage en périodes s'appuie sur des indices géologiques de différentes ampleurs.

La base du Silurien, du Carbonifère et du Jurassique est calée sur d'autres crises biologiques :

- l'extinction de 85 % des espèces délimite l'Ordovicien du Silurien ;
- l'extinction de 75 % des espèces délimite le dévonien du Carbonifère, et le trias du jurassique.

Toutefois, toutes les périodes ne sont pas délimitées par des crises, comme la fin du Permien ou du Trias, caractérisés respectivement par la disparition des trilobites et des conodontes.

Question 3. Montrez que le découpage en étages s'appuie sur des indices géologiques discrets et expliquez pourquoi.

Au sein de la période du Cambrien, le découpage en 10 étages est établi sur l'apparition d'espèces de trilobites. Les géologues s'appuient sur ces indices pour opérer un découpage en étage car notre connaissance du registre fossile est incomplète (soit parce qu'il n'a pas été en totalité découvert, soit parce qu'il a été effacé). De plus, l'absence d'un fossile stratigraphique dans une roche n'est pas considérée comme l'absence de l'espèce (ou sa disparition) : les conditions au moment du dépôt n'étaient peut-être pas localement réunies pour le développement de l'espèce ou la fossilisation des individus. Identifier l'apparition d'une ou plusieurs espèces est donc plus pertinent pour un découpage fin du temps, plutôt que de rechercher des événements majeurs ou des évènements de disparition.

Question 4. Précisez l'apport de la datation absolue à l'échelle stratigraphique.

L'étude d'associations de fossiles stratigraphiques, se modifiant au cours du temps, a permis d'établir des corrélations temporelles et d'aboutir à l'échelle stratigraphique sans toutefois pouvoir attribuer des âges absolu aux limites d'étages. La mise au point de techniques de datation absolue a permis d'attribuer des âges absolu à ces dernières.

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

1. Sur le socle, on retrouve empilées les unes sur les autres les unités suivantes : conglomérats grès et marnes, graviers intercalés dans de l'argile, graviers et sables, limons et argiles. D'après le principe de superposition, selon lequel une strate est postérieure à celle qu'elle recouvre et antérieure à celle qui la recouvre, j'en déduis que sur le socle se sont déposées au fil du temps les unités dans l'ordre où elles ont été citées. La datation des graviers, situés au NO, est plus incertaine par rapport à cette succession : elle repose sur les graviers intercalés dans de l'argile. On peut seulement affirmer qu'ils leur sont postérieurs.

2. Les 5 failles au NO affectent le socle et seulement la base de l'unité de conglomérats graviers et marnes. D'après le principe de recouplement, elles sont donc postérieures au socle et au dépôt initial de cette unité. Celle-ci s'est poursuivie après cet événement tectonique.

La faille à l'aplomb de Rio Segura affecte les conglomérats grès et marnes, les graviers intercalés dans de l'argile et les graviers et sables, et non les limons et argiles, qui la recouvrent. Elle est donc survenue après le dépôt des unités qu'elle affecte et avant le dépôt des limons et argiles.

Cette faille étant postérieure au dépôt des graviers et sables, eux-mêmes postérieurs aux 5 failles situées au NO, on en déduit qu'elle est postérieure aux 5 failles également.

Exercice 3

On constate que le nodule de péridotite est inclus dans le basalte. Or, d'après le principe d'inclusion, toute *inclusion* est plus ancienne que la structure qui la contient. On en déduit que la péridotite est antérieure au basalte.

On peut supposer que ces nodules de manteau ont été arrachés par le basalte en ascension entre la zone de fusion partielle du manteau (vers – 70 km) et le Moho (vers – 30 km), puis amenés en surface, lors de l'éruption.

Exercice 4

On constate la présence d'actinote, recoupant le pyroxène résiduel (doc. 1). Ces minéraux sont caractéristiques du domaine des schistes verts (doc. 2), où la déstabilisation du pyroxène notamment, suivie de réarrangements des éléments chimiques, aboutissent à la formation de l'actinote.

Ce pyroxène est aussi entouré d'une auréole de glaucophane (doc. 1). Or ce dernier est stable à partir de 500 MPa, dans le domaine des schistes bleus (doc. 2). Il est également issu de la déstabilisation du pyroxène résiduel notamment, suivie de réarrangements des éléments chimiques.

La nature et la disposition de ces minéraux témoigne du passage d'un métagabbro dans le domaine des schistes verts puis des schistes bleus, ce qui est caractéristique d'un géotherme de subduction (doc. 2).

La présence à l'affleurement de cette roche témoigne de son exhumation postérieure à son enfouissement par subduction.

Exercice 5

Connaissances : **en gras**

Données issues des documents : *en italique*

Nous allons nous appuyer sur l'étude de l'affleurement de State Circle pour montrer comment l'étude de la disposition des couches au niveau d'un affleurement peut permettre de reconstituer certaines étapes de l'histoire géologique d'une région.

Dans cet affleurement, *on observe des strates plissées, fracturées et décalées par le jeu de failles normales. Par ailleurs, les plis sont aussi affectés par les failles.* **D'après le principe de recouplement**, les strates ont donc été d'abord plissées, puis fracturées.

Or les plis se forment par compression et les failles normales en contexte d'extension [note pour le professeur : les failles normales syn-collisionnelles existent aussi, dans la zone interne d'un orogène. Ici, nous simplifions]. On en déduit la survenue d'un événement de collision ayant engendré des contraintes compressives sur les strates horizontales déjà en place. Cet évènement a plissé les strates. Postérieurement à leur plissement, des contraintes extensives ont entraîné la formation de failles normales affectant les roches plissées.

Exercice 6

Connaissances : **en gras**

Données issues des documents : *en italique*

On constate que la coésite est incluse dans le grenat. D'après le principe d'inclusion, elle préexistait donc à son inclusion dans le grenat. *On trouve par ailleurs des craquelures dans le grenat. D'après le principe de recouplement*, ces craquelures sont postérieures au grenat. Ces craquelures peuvent s'expliquer par *la transformation de la coésite en quartz*, qui a augmenté le volume de l'inclusion puisque *le volume molaire du quartz est supérieur à celui de la coésite*. Ainsi, la coésite a été incluse dans les cristaux de grenat en croissance. Puis les bords de la coésite se sont transformés en quartz, ce qui a craqué le grenat.

L'ordre de ces événements permet de reconstituer une partie de l'histoire géologique de l'échantillon : la roche à l'origine de cet échantillon a été enfouie par subduction (chemin prograde), ce qui a notamment entraîné *la transformation du quartz en coésite, à partir de 100 km de profondeur*. A cette profondeur, les grenats ont cru en englobant les cristaux de coésite. Lors de l'exhumation de cet échantillon, *la coésite est devenue instable à moins de 100 km de profondeur et a commencé à se rétromorphoser en quartz*, sur ses bords, craquant ainsi le grenat.

Exercice 7

Connaissances : **en gras**

Données issues des documents : *en italique*

Cet affleurement a été *bien préservé et contient en abondance des fossiles d'ammonites, notamment du genre Hyperlioceras* (doc. 2). Or, **ces fossiles présentent les trois critères de fossiles stratigraphiques** : *abondance, large répartition et espèces à évolution rapide, si bien qu'ils ont été utilisés pour délimiter les étages du Jurassique* (doc. 1). Cet affleurement a donc les qualités requises pour un stratotype.

Par ailleurs, **les coupures des étages de l'échelle stratigraphique se fondent sur l'apparition d'espèces fossiles**. *Dans cet affleurement, on y trouve, au niveau de la couche AB11, la première apparition synchrone de quatre espèces du genre Hyperlioceras (H. mundum, H. incisum, H. furcatum/arcuatum et H. curvum)* (doc. 2).

De ce fait, il est pertinent de définir la base du Bajocien comme correspondant à la première apparition de ces quatre espèces d'ammonites au niveau de la strate AB11, qui constitue le point stratotypique mondial.

Aide à la résolution

1. D'après le doc. 1 et vos connaissances, indiquez l'intérêt du contenu fossile du stratotype de limite de la base du Bajocien.
2. D'après le doc. 2 et vos connaissances, indiquez une qualité de cet affleurement, requise pour choisir un stratotype de limite.
3. Repérez l'apparition synchrone de quatre espèces de fossiles stratigraphiques, utilisée pour délimiter l'Aalénien du Bajocien. Déduisez-en la couche qui constitue le point stratotypique mondial.

Exercice 8

Connaissances : **en gras**

Données issues des documents : *en italique*

La formation des masses et marnes du gypse repose sur le calcaire de Saint-Ouen et est recouvert par les marnes supra-gypseuses (doc. 1). D'après le principe de superposition, j'en déduis qu'elle est postérieure au calcaire de Saint-Ouen et antérieure aux marnes supra-gypseuses. Par ailleurs, le calcaire de Champigny, comme pour la formation des masses et marnes du gypse, repose sur le calcaire de Saint-Ouen et est recouvert par les marnes supra-gypseuses. De plus, il est situé à même altitude que la formation des masses et marnes du gypse, entre + 37m et + 78 m, et aucune faille ne perturbe ces couches (doc. 1). D'après le principe de continuité, j'en déduis que le calcaire de Champigny est synchrone de la formation des masses et marnes du gypse.

Le gypse, roche constituée de sulfates de calcium, peut s'être formé dans deux contextes, qui ont existé au Cénozoïque : dans une lagune alimentée par la mer, riches en ions minéraux, ou un lac d'eau douce alimenté par les eaux de ruissellement, riches en ions minéraux (doc. 2).

D'après le doc. 3, la composition isotopique en soufre d'une roche est identique à celle de l'eau dans laquelle elle s'est formée. Or, nous connaissons la composition isotopique de la mer au Cénozoïque : elle avoisinait + 19 ‰ ($\pm 0,8$). La composition des gypses étant d'environ + 15 ‰, on peut donc exclure l'origine marine de ces roches (doc. 3).

Ces roches se sont donc formées dans un contexte lacustre, alimenté par les eaux de ruissellement riches en ions carbonates, calcium et sulfates (doc. 2). Du calcaire (donnant le calcaire de Champigny) aurait précipité près du rivage au sud d'un ancien lac, tandis que du gypse aurait précipité plus au centre du lac, vers le nord (donnant les masses et marnes du gypse).

Chapitre 6. La datation absolue

Ce chapitre succède à la datation relative. Ce dernier s'achève en mentionnant que les limites d'intervalles de temps établies grâce à l'étude des fossiles stratigraphique ont pu être datées de façon absolue grâce à la datation absolue. L'élève découvre ici trois méthodes radiochronométriques ayant contribué à l'échelle stratigraphique. L'**unité 1** expose les principes de la datation absolue et les unités suivantes présentent trois méthodes de datation radiochronométrique mentionnées dans le programme : la méthode Rb/Sr dans l'**unité 2**, la méthode K/Ar dans l'**unité 3**, puis la méthode U/Pb dans l'**unité 4**.

Thème 2. À la recherche du passé géologique de notre planète	
Connaissances	Capacités, attitudes
<p>La désintégration radioactive est un phénomène continu et irréversible ; la demi-vie d'un élément radioactif est caractéristique de cet élément. > Unité 1</p> <p>La quantification de l'élément père radioactif et de l'élément fils radiogénique permet de déterminer l'âge des minéraux constitutifs d'une roche. > Unité 1</p> <p>Différents chronomètres sont classiquement utilisés en géologie. Ils se distinguent par la période de l'élément père. > Unités 2 à 4</p> <p>Le choix du chronomètre dépend de l'âge supposé de l'objet à dater, qui peut être appréhendé par chronologie relative. Les datations sont effectuées sur des roches magmatiques ou métamorphiques, en utilisant les roches totales ou leurs minéraux isolés. L'âge obtenu est celui de la fermeture du système considéré (minéral ou roche). Cette fermeture correspond à l'arrêt de tout échange entre le système considéré et l'environnement (par exemple quand un cristal solide se forme à partir d'un magma liquide). > Unité 1</p> <p>Des températures de fermeture différentes pour différents minéraux expliquent que des mesures effectuées sur un même objet tel qu'une roche, avec différents chronomètres, puissent fournir des valeurs différentes. > Unités 1 et 4</p>	<p>Observer les auréoles liées à la désintégration de l'uranium dans les zircons au sein des biotites. > Unité 4</p> <p>Mobiliser les bases physiques de la désintégration radioactive. > Unités 1 à 3</p> <p>Identifier les caractéristiques (demi-vie ; distribution) de quelques chronomètres reposant sur la décroissance radioactive, couramment utilisés dans la datation absolue : Rb/Sr, K/Ar, U/Pb. > Unités 2 à 4</p> <p>Comprendre le lien, à partir d'un exemple, entre les conditions de fermeture du système (cristallisation d'un magma, ou mort d'un organisme vivant) et l'utilisation de chronomètres différents. > Unités 1 et 4</p> <p>Extraire des informations à partir de cartes géologiques ; utiliser les apports complémentaires de la chronologie relative et de la chronologie absolue pour reconstituer une histoire géologique. > Unité 1</p>

Compétences travaillées et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
<p>Pratiquer des démarches scientifiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution. • Raisonner avec rigueur, modéliser, argumenter. • Interpréter des résultats et en tirer des conclusions. • Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 2 à 4 • Unités 1 à 4 • Unités 1 à 4 • Unités 1 à 4
<p>Concevoir, créer, réaliser</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifier et choisir des notions, des outils et des techniques, ou des modèles simples pour mettre en œuvre une démarche scientifique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 4
<p>Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 4
<p>Pratiquer des langages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant. • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique. • Utiliser des logiciels de traitement de données 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 2 à 4 • Unités 2 à 4 • Unités 2 et 4

Choix pédagogiques

Unité 1

> Cette unité débute par une réflexion sur l'apport de la datation absolue à la datation relative en s'appuyant sur une carte géologique. Puis elle présente les propriétés radioactives des isotopes et explique en quoi ces dernières permettent la datation d'un objet géologique. Chaque radiochronomètre présentant des particularités, son utilisation sera expliquée dans les unités suivantes.

> Pour montrer l'intérêt de la datation absolue par rapport à la datation relative, nous avons choisi la zone nord-armoricaine (**document 1**). En effet, l'application de la datation relative à des intrusions de plutons d'âge très différents dans le socle précambrien à primaire donne une interprétation très limitée. Concernant le granite marqué d'une étoile bleue, il affecte un socle carbonifère. D'après le principe de recouplement, on peut seulement affirmer qu'il est post-Carbonifère. Sa datation absolue donne un âge précis : il s'est mis en place il y a un peu plus de 300 Ma. L'âge absolu des autres plutons collisionnels révèle deux événements de collision : l'orogenèse cadomienne et l'orogenèse hercynienne. La datation relative n'aurait pas permis de le mettre en évidence.

> Le **document 2** explique les propriétés d'un isotope radioactif, il présente la loi de décroissance radioactive (le développement de cette loi est proposé comme ressource dans le manuel numérique) et les notions de constante de désintégration et demi-vie (ou période). Ce document permet à l'élève de comprendre en quoi la radioactivité des roches permet de dater un échantillon : c'est la régularité connue de la désintégration radioactive des roches qui permet d'utiliser les isotopes radioactifs comme des radiochronomètres.

> Le **document 3** a pour but de permettre à l'élève de modéliser ce phénomène pour mieux le comprendre, de façon analogique, en utilisant des billes et en représentant le résultat graphiquement. L'intérêt de cette modélisation est aussi de réfléchir à ce qui se produit si le système laisse s'échapper des isotopes. Après mise en relation avec le **document 4**, l'élève comprend que la réouverture d'un système remet les compteurs à zéro et qu'un radiochronomètre permet de calculer le temps qui s'est écoulé depuis la fermeture du système. Le logiciel Radiochrono peut aussi servir d'illustration de ce phénomène. Dans ce dernier, le premier onglet montre, par des points de deux couleurs différentes et un graphique, l'évolution d'une population d'isotopes pères et fils au cours du temps.

> L'interview du **document 4** précise le facteur qui contrôle la température du système : la température. Celle-ci dépend du minéral analysé (le système) et du radiochronomètre étudié. C'est pourquoi une même roche peut donner plusieurs âges, selon les minéraux et les isotopes analysés. Ces âges sont interprétés différemment : âge de cristallisation ou de refroidissement, dans le cas de roches magmatiques non perturbées par d'autres événements. Le **document 5** illustre cette notion : on constate que, pour un même radiochronomètre, la température de fermeture change selon le minéral et pour un même minéral, la température de fermeture change selon le radiochronomètre.

> Concernant le choix du radiochronomètre, la gamme d'âges qu'il peut dater dépend de ce que l'on mesure (isotope fils ou père) et de la sensibilité des instruments : dans tous les cas, la quantité d'isotopes fils produite ou la quantité d'isotopes pères restante doit être supérieure au seuil de détection de ces derniers. Si c'est le dosage de l'isotope fils qui permet de donner l'âge, alors on peut dater des roches de plus en plus jeunes et théoriquement aussi vieilles que l'univers. Pour le ^{14}C , on mesure l'isotope père : dans la mesure où l'on est capable de mesurer des teneurs en ^{14}C 1000 fois inférieures à la normale, alors on peut dater un âge maximum de 10 demi-vies.

Unité 2

- > Dans cette unité, l'élève découvre les particularités de la méthode Rb/Sr. Cette unité est organisée selon un apprentissage progressif : l'élève doit dater le grand dyke du Zimbabwe à partir d'une isochrone déjà fournie, puis dater les gneiss d'Amitsoq, en construisant une isochrone sur un tableau.
- > Le **document 1** présente une vue aérienne du grand dyke du Zimbabwe. Nous avons choisi cet exemple car il a été utilisé pour délimiter l'Archéen du Protérozoïque. En effet, il n'a pas été perturbé depuis sa mise en place : l'âge obtenu correspond donc à celui de sa mise en place. Cet exemple s'inscrit donc dans la suite du chapitre sur la datation relative, dans lequel on précise que la datation absolue a permis d'apporter des âges absous aux limites d'intervalles de temps de l'échelle stratigraphique.
- > Le **document 2** montre un spectromètre de masse utilisé pour mesurer des rapports isotopiques.
- > Le **document 3** explique l'origine de l'équation $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = f(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})$. Il s'agit d'une fonction affine que les élèves connaissent. La fonction est représentée par une droite, dont le coefficient directeur *a* est déterminable graphiquement et permet de calculer le temps qui s'est écoulé depuis la fermeture de l'échantillon analysé.
- > Le **document 4** montre cette droite nommée isochrone et explique comment évolue la pente de la droite en fonction de l'âge de l'échantillon.
- > Le **document 5** présente l'isochrone obtenue pour le grand dyke du Zimbabwe. La valeur du coefficient directeur figure en rouge. En appliquant la formule $t = \ln(a+1) / \lambda$, l'élève en déduit l'âge du dyke. Les données sont fournies dans une ressource numérique. Celle-ci peut servir de support pour montrer aux élèves comment construire une isochrone et afficher son coefficient directeur, sur un tableau. Cette capacité est en effet exigible en ECE. Un exercice sur ce sujet est d'ailleurs proposé en fin de chapitre (**exercice 8 p. 163**).
- > Après avoir compris le principe de la datation Rb/Sr avec une isochrone fournie, on demande à l'élève dans le **document 6** de construire lui-même une isochrone et d'afficher le coefficient directeur de la droite, à partir des rapports isotopiques des gneiss d'Amitsoq, figurant parmi les plus vieux de la Terre. Dans la ressource numérique proposée, les rapports isotopiques ont déjà été saisis, ce qui est souvent le cas dans les épreuves d'ECE de ce type. L'élève doit sélectionner ces données pour construire la courbe de tendance (isochrone) et afficher le coefficient directeur, qui lui permettra de calculer l'âge de ces gneiss.

Unité 3

- > Cette unité s'intéresse à la méthode K/Ar. La page de gauche explique son principe ; la page droite présente ses inconvénients et la méthode qui la supplante désormais : la méthode Ar/Ar.
- > Le **document 1** présente l'objet d'étude : des pas d'*Homo heidelbergensis* fossilisés dans des cendres d'un volcan en Italie. Ces empreintes sont exceptionnelles car il s'agit des plus anciennes connues à ce jour pour le genre *Homo*. Ce document donne les valeurs de ^{40}K et de ^{40}Ar mesurées dans les cendres. L'objectif est de faire calculer l'âge de ces pas par la méthode K/Ar, de comparer le résultat avec l'âge obtenu par la méthode Ar/Ar et de discuter de la fiabilité de ces deux méthodes.
- > Le **document 2** explique la particularité de la méthode K/Ar : l'isotope père se désintègre en deux isotopes fils. L'équation d'âge qui en découle est plus complexe que la méthode Rb/Sr. Le développement mathématique n'est pas exigible de l'élève.
- > Le **document 3** présente les inconvénients de cette méthode et explique les intérêts de la méthode Ar/Ar, notamment celui d'éviter le biais de mesure induit par l'utilisation de deux échantillons différents et de deux spectromètres différents avec la méthode K/Ar.
- > Le **document 4** montre un résultat obtenu par l'analyse Ar/Ar d'un seul minéral, sachant que le spectromètre de masse en phase gazeuse, utilisé pour la méthode Ar/Ar, mesure simultanément ^{40}Ar et ^{39}Ar dans trois minéraux. Pour chaque minéral, on obtient un âge apparent. Des dizaines de minéraux sont analysés, dont les âges varient. Ceci est représenté dans le graphique du haut du

document 5. Une analyse statistique de l'ensemble des mesures permet d'en déduire un âge probable de la roche (graphique du bas du **document 6**).

Unité 4

- > L'objectif de cette dernière unité est double : aborder la méthode de datation U/Pb et terminer le chapitre en abordant la complémentarité de la datation relative et absolue. Si, dans le précédent chapitre, nous mentionnions l'apport de la datation absolue à l'échelle stratigraphique, nous expliquons ici comment des âges absolu peuvent être proposés aux limites d'intervalles, ces dernières étant déterminées par l'étude de roches sédimentaires qui ne peuvent être datées de façon absolue.
- > Le **document 1** est une vue aérienne de la zone d'étude, l'Anse de Culeron, et de l'objet d'étude : les gneiss. Cette zone a été choisie car elle présente de rares gneiss parmi les plus vieux de France, hérités de l'orogenèse icartienne. Il est précisé que ces gneiss proviennent de la transformation de granites par métamorphisme. Cette donnée est importante pour interpréter les deux âges obtenus par la datation U/Pb (**document 3**).
- > Le **document 2** présente une photo d'une biotite du gneiss en LPNA. Cette biotite contient des inclusions de zircons. La radioactivité de l'uranium que ces zircons contiennent provoque une auréole caractéristique dans la biotite. L'élève doit être capable d'interpréter une telle photo.
- > Le **document 3** présente le couple U/Pb et le principe de la détermination de l'âge d'un échantillon sur une courbe Concordia. Cette méthode utilise la propriété radioactive de deux isotopes de l'uranium, ^{238}U et ^{235}U , qui se désintègrent en deux isotopes du plomb, respectivement ^{206}Pb et ^{207}Pb . Toutes les combinaisons possibles des rapports isotopiques $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ et $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ d'échantillons jamais perturbés depuis leur formation se situent sur une courbe nommée Concordia. Si une roche n'a pas été perturbée depuis sa formation, tous ses échantillons analysés, correspondant chacun à un couple de coordonnées (x,y) dans le graphique, sont situés au même endroit sur la courbe Concordia, ce qui permet de déterminer graphiquement l'âge de la roche.
- > Il arrive que tous les échantillons d'une même roche ne se situent pas sur la courbe Concordia. C'est ce qu'illustre le **document 4** : les rapports isotopiques des gneiss de l'Anse de Culeron s'alignent selon une droite qui recoupe la Concordia en deux points. Cette droite, nommée Discordia, révèle deux âges : un âge de formation, celui du granite, et un âge de perturbation, qui est l'événement métamorphique à l'origine de la transformation du granite en gneiss (information donnée dans le document 1).
- > Enfin, les **documents 5 et 6** rappellent l'apport de la datation absolue à l'échelle stratigraphique établie grâce à l'étude de fossiles stratigraphiques. Si les roches sédimentaires ne peuvent être datées de façon absolue, leur intercalation entre deux roches magmatiques pouvant être datées de façon absolue permet d'attribuer un âge à ces roches (document 5). Un cas pratique est proposé dans le document 6 : la datation de la limite Trias/Jurassique mentionnée dans le document 5.
- > La ressource numérique associée est nécessaire pour déterminer l'âge des cendres qui calent la limite Trias/Jurassique. Celle-ci contient le tracé d'une portion de la Concordia, pour augmenter la précision de la lecture de l'âge des échantillons. Cette courbe est liée au tableau de gauche dans le fichier. Si les données de ce tableau sont effacées, la courbe disparaît. Dans cette ressource, figure aussi le tableau vierge des rapports isotopiques des deux couches de cendres, que l'élève doit compléter. Ce fichier est déjà programmé pour que la saisie dans le tableau d'un couple de coordonnées (correspondant aux deux rapports isotopiques d'un échantillon) entraîne automatiquement l'affichage de l'échantillon sur le graphique. On constate après saisie des échantillons dans le tableau qu'ils se situent tous autour de 200 Ma.

Corrigé des parcours « tâche complexe »

Unité 2

> Éléments de correction

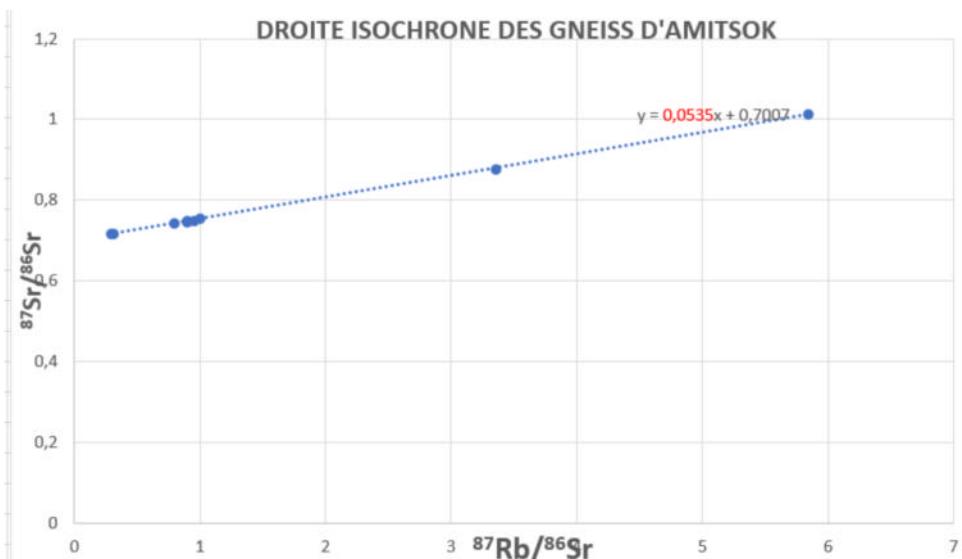
On attend une explication synthétique de la méthode Rb/Sr et la détermination de l'âge du grand dyke du Zimbabwe et des gneiss d'Amitsoq.

Dans cette méthode, le ^{87}Rb est l'isotope père et le ^{87}Sr l'isotope fils. Le spectromètre de masse effectue des mesures de ces isotopes par rapport à l'isotope stable ^{86}Sr (doc. 2 et 3). Les mesures de plusieurs échantillons d'une même roche permettent de tracer une droite de régression, nommée « isochrone », dans le graphique $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = f(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})$. Son coefficient directeur a permet de calculer un âge, grâce à l'équation : $t = \ln(a+1) / \lambda$ (doc. 4).

Grâce la pente de l'isochrone obtenue avec les rapports isotopiques du grand dyke du Zimbabwe (doc. 5), on a la formule : $t = \ln(0,0535 + 1) / (1,397 \cdot 10^{-11})$.

Ce dyke, qui délimite l'Archéen du Protérozoïque est donc âgé de 2,48 milliards d'années.

Concernant les gneiss d'Amitsoq, on trace la droite de régression ci-dessous sur un tableau à partir des valeurs des rapports isotopiques (doc. 6).



On extrait le coefficient directeur de la droite : 0,0535.

On applique la formule $\ln(a+1) / \lambda$, ce qui donne : $\ln(0,0535 + 1) / (1,397 \cdot 10^{-11}) = 3,73 \cdot 10^9$.

Ces gneiss sont donc âgés de 3,73 milliards d'années.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée : Par exemple, <ul style="list-style-type: none">• Les âges sont données, sans le calcul• Le calcul est donné mais sans expliquer la démarche	Démarche pertinente <ul style="list-style-type: none">• Le principe de la démarche est expliqué et illustré d'un exemple. Pour cela, presque tous les documents sont exploités	Démarche à la fois pertinente et cohérente <ul style="list-style-type: none">• Tous les documents sont exploités
Contenu	Absent	Incomplet par manque d'extraction d'informations des documents. Ou présente des erreurs.		Ne présente pas d'erreur et est complet
Communication	Non conforme	L'organisation des idées et/ou la syntaxe est maladroite	L'organisation des éléments de réponse est cohérente. Quelques erreurs dans l'orthographe et/ou la grammaire	L'organisation des éléments de réponse est cohérente et fluide. Le texte est correctement rédigé.

Unité 3

> Éléments de correction

Ici, l'élève doit calculer l'âge de cendres avec la méthode K/Ar, en appliquant la formule du doc. 2. Il doit comparer son résultat à celui obtenu par la méthode Ar/Ar et expliquer pourquoi cette dernière est plus fiable. Le calcul de l'âge des cendres avec la méthode K/Ar est le suivant :

$$T = \ln [(5,543 \cdot 10^{-10} \cdot 4,95 \cdot 10^{-12}) / (5,8 \cdot 10^{-11} \cdot 2,22 \cdot 10^{-7}) + 1] / 5,543 \cdot 10^{-10} = 3,88 \cdot 10^5.$$

Les cendres ont donc 388 000 ans selon cette méthode (doc. 1 et 2). Celui obtenu par la méthode Ar/Ar est de 340 000 ans (doc. 4 et 5).

La méthode K/Ar n'est pas suffisamment fiable. En effet, contrairement à la méthode Ar/Ar, elle ne permet pas de s'assurer qu'il n'y avait pas d'isotope fils initialement présent dans les minéraux analysés (ce qui conduirait à surestimer l'âge) et elle ne permet pas non plus de s'assurer que les échantillons n'ont pas été perturbés, et donc réouverts, entraînant une perte d'isotopes fils (ce qui conduirait à sous-estimer l'âge). En outre, cette méthode nécessite l'utilisation de deux instruments de mesures, l'un pour ^{40}K et l'autre pour ^{40}Ar (qui est un gaz), ce qui introduit un biais de mesure. En revanche, la méthode Ar/Ar utilise le même appareil pour mesurer ^{40}Ar et ^{39}Ar . Enfin, la méthode K/Ar nécessite deux échantillons différents, utilisés chacun pour la mesure d'un isotope. Or rien ne prouve que les compositions des échantillons, même s'ils sont issus d'une même roche, soient identiques. En revanche, la méthode Ar/Ar permet d'effectuer des mesures des deux isotopes dans le même échantillon (doc. 3).

Les résultats avec les deux méthodes diffèrent d'environ 50 000 ans. L'âge obtenu avec la méthode K/Ar est surestimé. Outre un biais de mesure possible, on peut supposer que des isotopes fils étaient présents initialement dans les échantillons, avant leur fermeture (doc. 3).

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et/ou partielle La réponse ne répond pas à tous les éléments de la question et/ou n'est pas argumentée. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Pas de démarche comparative entre les deux méthodes	Démarche pertinente <ul style="list-style-type: none">• Les documents sont exploités pour répondre à la question• Les deux âges sont comparés• Les deux méthodes sont comparées	Démarche à la fois pertinente et particulièrement réfléchie <ul style="list-style-type: none">• La réponse propose une hypothèse à la surestimation de l'âge par la méthode K/Ar
Contenu	Absent	Incomplet par manque d'extraction d'informations des documents. Ou présente des erreurs. Par exemple <ul style="list-style-type: none">• Il manque l'âge donné par une méthode• La méthode K/Ar est critiquée mais l'intérêt de la méthode Ar/Ar n'est pas présenté.		Ne présente pas d'erreur et est complet
Communication	Non conforme	L'organisation des idées est maladroite	L'organisation des éléments de réponse est cohérente.	L'organisation des éléments de réponse est cohérente, la rédaction est de qualité et respecte les règles de grammaire et d'orthographe

Unité 4

> Éléments de correction

La méthode U/Pb utilise la propriété radioactive de deux isotopes de l'uranium situés dans des zircons (doc. 2), ^{238}U et ^{235}U , qui se désintègrent en deux isotopes du plomb, respectivement ^{206}Pb et ^{207}Pb . Toutes les combinaisons possibles des rapports isotopiques $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ et $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ d'échantillons non perturbés depuis leur formation sont représentées par la courbe nommée Concordia. Une coordonnée (x,y) située sur la courbe Concordia permet de déterminer graphiquement un âge. Si une roche n'a jamais été perturbée, alors tous ses échantillons analysés se situent au même endroit sur la courbe (doc. 3).

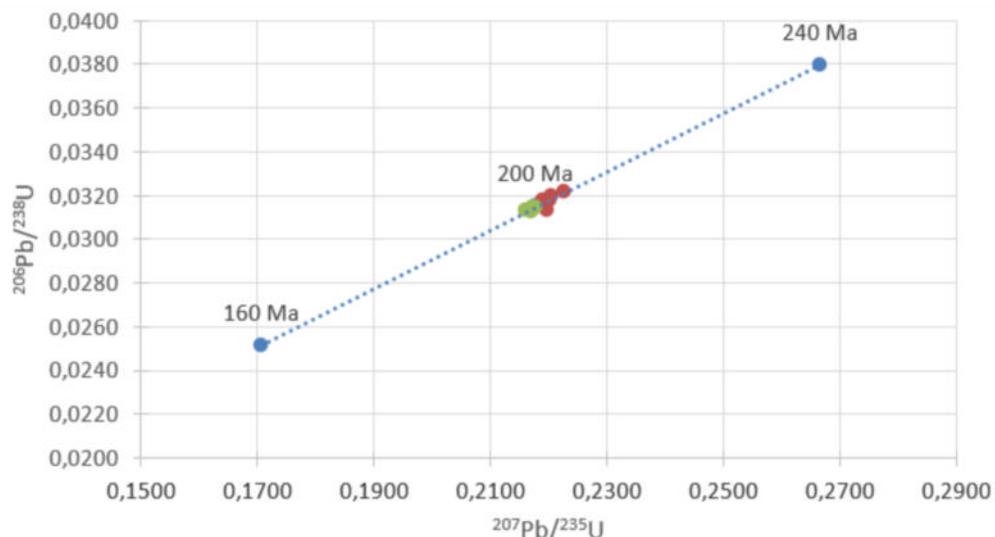
Le gneiss de l'anse de Culeron a été daté par cette méthode. Les valeurs des rapports isotopiques U/Pb de ce gneiss ne sont pas toutes situées au même endroit sur la courbe Concordia. Elles s'alignent sur une droite Discordia (doc. 4). Cela signifie que certains zircons dans lesquels ont été mesurés les rapports $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ et $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ se sont réouverts (doc. 4). Or ce gneiss était initialement un granite, qui a ensuite subi un métamorphisme (doc. 1). On en déduit que l'intercept supérieur nous indique l'âge de formation du granite, d'environ 2 Ga, et l'intercept inférieur date l'événement de métamorphisme, autour de 550 Ma (doc. 4).

L'étude de fossiles stratigraphiques a permis de découper le temps en intervalles qui se succèdent les uns à la suite des autres et constituent l'échelle stratigraphique. Toutefois, cette méthode de datation relative ne permet pas de donner des âges absolus aux intervalles.

La datation de roches magmatiques ou métamorphiques, situées de part et d'autre de roches sédimentaires dont le contenu fossilifère délimite deux intervalles de temps, permet de donner un âge absolu à cette limite (doc. 5). C'est le cas de la limite Trias/Jurassique, caractérisée par l'apparition d'un fossile d'ammonite, qui est encadrée par deux couches de cendres t à -4 m et +55 m. Les rapports

isotopiques U/Pb de ces couches de cendres (doc. 6) ont été placées sur la courbe Concordia ci-dessous :

Graphique présentant les rapports isotopiques de deux couches de cendres sur la Concordia
 Les points rouges représentent les rapports isotopiques de la couche de cendres située à – 4 m de la limite Trias/Jurassique et les points verts représentent les rapports isotopiques de la couche de cendres située à + 55 m. Seule la portion entre 160 Ma et 240 Ma de la Concordia est représentée.



Les rapports isotopiques sont très proches et situés sur la courbe Concordia : ils permettent de dater la limite Trias/Jurassique à environ 200 Ma d'après ce graphique. Ce résultat est cohérent avec celui figurant sur l'échelle chronostratigraphique : $199,6 \pm 0,6$ Ma

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et/ou partielle • La réponse est partielle et/ou n'est pas argumentée.	Démarche pertinente • Les interprétations s'appuient sur les données des documents • Presque tous les documents sont exploités	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Des erreurs ou incomplet par manque d'extraction d'informations des documents. Par exemple : • Les deux âges des gneiss de l'anse de Culeron ne sont pas identifiés ou interprétés • La limite Trias/Jurassique n'est pas datée • la réponse ne présente pas l'apport de la datation absolue dans l'échelle chronostratigraphique.	Ne présente pas d'erreur et est complet	
Communication	Non conforme	L'organisation des idées est maladroite	L'organisation des éléments de réponse est cohérente.	L'organisation des éléments de réponse est cohérente, la rédaction est de qualité et respecte les règles de grammaire et d'orthographe

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas »

Unité 1

1. Le granite recoupe des terrains datés du Carbonifère. Il est donc post-Carbonifère. Mais on ne peut le contraindre dans sa limite supérieure par datation relative, car il n'est ni recouvert par d'autres couches, ni recoupé par d'autres structures. De nature magmatique, il ne contient pas non plus de fossiles. Sa datation absolue permet de connaître plus précisément son âge : il s'est mis en place il y a entre 305 et 285 Ma.

2. Les plutons sont d'âges très variés, allant de 600 Ma à 300 Ma. Là encore, l'application de la datation relative n'aurait pas permis de situer aussi précisément dans le temps ces plutons. L'intérêt de la datation absolue est donc de donner accès à l'âge précis des roches.

3. On mesure les isotopes radioactifs père restant dans le système, et les isotopes fils radiogéniques. On calcule grâce à cela la durée depuis laquelle le système s'est fermé.

4. Il est possible de dater un objet compris entre environ un centième et dix fois la demi-vie de l'isotope radioactif. La demi-vie du ^{14}C est de $5,73 \cdot 10^3$ ans. Il est donc possible de dater avec cet isotope un objet compris d'âge entre 57,3 et 57 300 ans. La demi-vie de l' ^{238}U est de $4,47 \cdot 10^9$. Il est possible de dater un objet compris entre $4,47 \cdot 10^7$ et $4,47 \cdot 10^{10}$, soit un objet de 300 millions d'années par exemple.

Remarque

Deux autres questions permettent de faire réfléchir l'élève sur la fermeture du système, en exploitant les documents :

- *Indiquez la propriété des isotopes radioactifs permettant de les utiliser comme des chronomètres et expliquez pourquoi la réouverture du système remet à zéro le chronomètre (doc. 2 et 3).*

Les isotopes radioactifs se désintègrent de façon régulière, selon une constante de désintégration connue. Si l'on connaît la quantité d'isotopes pères initiale et la quantité d'isotopes pères restant dans le système, on peut en déduire la durée depuis laquelle le système est clos. Si le système s'ouvre, des échanges d'isotopes entre le système et l'extérieur se produisent : les quantités d'isotopes pères initiale et restante sont modifiées. Le chronomètre est alors réinitialisé.

- *Indiquez le facteur contrôlant la fermeture du système dans les roches magmatiques (doc. 4 et 5).*
C'est la température, qui en dessous d'un certain seuil, rend la diffusion entre grains négligeable si bien que le gain d'isotopes fils et la perte d'isotopes pères ne sont dus qu'à la désintégration radioactive.

Unité 2

Question 1. Expliquez comment est obtenue la droite isochrone Rb/Sr (doc. 2 à 4).

La droite isochrone est une droite de régression, tracée à partir des valeurs des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, obtenues par l'analyse d'échantillons d'une même roche grâce à un spectromètre de masse.

Question 2. Indiquez l'information que cette droite permet d'obtenir et en quoi elle permet de calculer l'âge d'une roche (doc. 4).

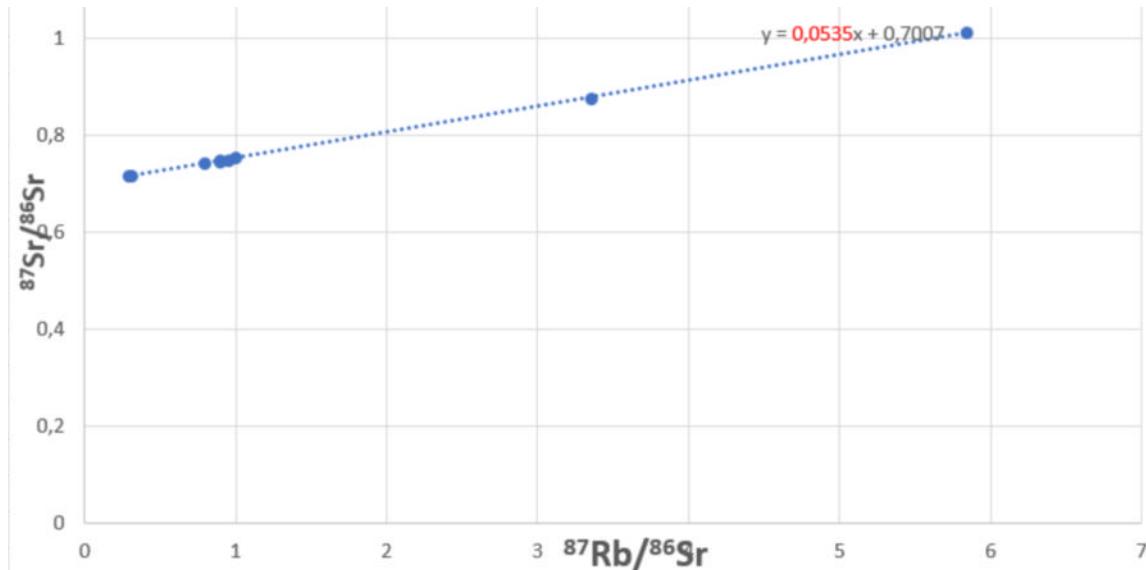
Grâce à cette droite, on obtient le coefficient directeur a , qui permet de calculer l'âge d'une roche grâce à la formule : $\ln(a+1) / \lambda$.

Question 3. Déduisez-en l'âge du grand dyke du Zimbabwe en précisant votre calcul (doc. 1 et 5).

Le doc. 5 nous donne la valeur du coefficient directeur de la droite isochrone : 0,0353. On applique la formule : $\ln(0,0353 + 1) / (1,397 \cdot 10^{-11}) = 2,48 \cdot 10^9$.

Ce dyke, qui délimite l'Archéen du Protérozoïque est donc âgé de $2,48 \cdot 10^9$ ans.

Question 4. Construisez sur un tableau une isochrone à partir des rapports isotopiques d'échantillons du gneiss d'Amitsoq (doc. 6).



Question 5. Déduisez-en leur âge en précisant votre calcul (doc 3, 4 et 6).

On extrait le coefficient directeur de la droite : 0,0535. On applique la formule $\ln(a+1) / \lambda$, ce qui donne : $\ln(0,0535 + 1) / (1,397 \cdot 10^{-11}) = 3,73 \cdot 10^9$

Ces gneiss sont donc âgés de $3,73 \cdot 10^9$ ans.

Unité 3

Question 1. Calculez l'âge des cendres du volcan avec la méthode K/Ar, en utilisant les valeurs de ^{40}K et ^{40}Ar (doc. 1 et 2).

Le calcul est le suivant :

$$T = \ln [(5,543 \cdot 10^{-10} \cdot 4,95 \cdot 10^{-12}) / (5,8 \cdot 10^{-11} \cdot 2,22 \cdot 10^{-7}) + 1] / (5,543 \cdot 10^{-10}) = 3,88 \cdot 10^5$$

Les cendres sont donc datées de 388 000 ans.

Question 2. Comparez cet âge à celui estimé par la méthode Ar/Ar (doc. 4 et 5).

L'âge obtenu par la méthode Ar/Ar est de 340 000 ans. Le résultat des deux méthodes diffère d'environ 50 000 ans.

Question 3. Expliquez le problème de fiabilité que pose la méthode K/Ar et expliquez en quoi la méthode Ar/Ar y pallie (doc. 3).

La méthode K/Ar n'est pas suffisamment fiable. En effet, contrairement à la méthode Ar/Ar, elle ne permet pas de s'assurer qu'il n'y avait pas d'isotope fils initialement présent dans les minéraux

analysés (ce qui conduirait à surestimer l'âge) et elle ne permet pas non plus de s'assurer que les échantillons n'ont pas été perturbés, et donc ré-ouverts, entraînant par exemple une perte d'isotopes fils (ce qui conduirait à sous-estimer l'âge). En outre, cette méthode nécessite l'utilisation de deux instruments de mesures, l'un pour ^{40}K et l'autre pour ^{40}Ar (qui est un gaz), ce qui introduit un biais de mesure. La méthode Ar/Ar utilise, elle, le même appareil pour mesurer ^{40}Ar et ^{39}Ar . Enfin, la méthode K/Ar nécessite deux échantillons différents, l'un pour mesurer le ^{40}K , l'autre pour l' ^{40}Ar . Or rien ne prouve que les compositions des échantillons, même s'ils sont issus d'une même roche, soient identiques. En revanche, la méthode Ar/Ar permet d'effectuer des mesures des deux isotopes dans le même échantillon.

Question 4. Proposez une hypothèse à la différence d'âges obtenus par la méthode K/Ar et Ar/Ar (doc. 3).

L'âge avec la méthode K/Ar est surestimé. Outre un biais de mesure possible, on peut supposer que des isotopes fils étaient présents initialement dans les échantillons, avant leur fermeture.

Unité 4

Question 1. Expliquez le principe du radiochronomètre U/Pb (doc. 2 et 3).

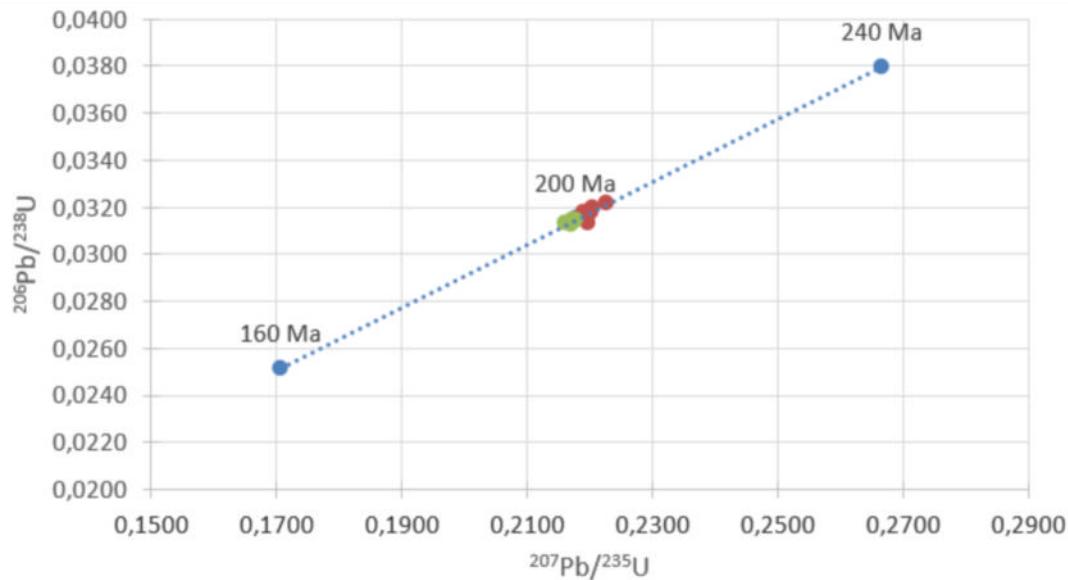
La méthode U/Pb utilise les propriétés radioactives de deux isotopes de l'uranium présents dans des zircons (doc. 2), ^{238}U et ^{235}U , qui se désintègrent en deux isotopes du plomb, respectivement ^{206}Pb et ^{207}Pb . Toutes les combinaisons possibles des rapports isotopiques $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ et $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ d'échantillons non perturbés depuis leur formation sont représentées par la courbe nommée Concordia. Une coordonnée (x,y) située sur la courbe Concordia permet de déterminer graphiquement un âge. Si une roche n'a jamais été perturbée, alors tous ses échantillons analysés se situent au même endroit sur la courbe (doc. 3).

Question 2. Interprétez les âges obtenus par la datation U/Pb des gneiss de l'anse de Culeron (doc 3 et 4).

Les mesures isotopiques U/Pb de ces gneiss ne se situent pas au même endroit sur la courbe Concordia. Ils s'alignent sur une droite Discordia. Cela signifie que certains zircons dans lesquels ont été mesurés les rapports $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ et $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ se sont réouverts. Or, nous savons d'après le doc. 1 que ces gneiss sont des granites métamorphisés. Cela nous permet d'en déduire que l'intercept supérieur situé à environ 2 Ga indique l'âge de formation du granite. L'intercept inférieur donne l'âge de son métamorphisme, vers 550 Ma.

Question 3. Datez l'âge des deux couches de cendres de la vallée de l'Utcubamba, en complétant le fichier excel fourni (doc 6).

Graphique présentant les rapports isotopiques de deux couches de cendres sur la Concordia. Les points rouges représentent les rapports isotopiques de la couche de cendres située à – 4 m de la limite Trias/Jurassique et les points verts représentent les rapports isotopiques de la couche de cendres située à + 55 m. Seule la portion entre 160 Ma et 240 Ma de la Concordia est représentée.



Les rapports isotopiques des deux couches de cendres sont très proches et situés sur la Concordia : ils permettent de les dater à environ 200 Ma.

Question 4. Utilisez cet exemple pour montrer l'apport de la datation absolue à l'échelle stratigraphique.

Ces deux couches de cendres encadrent une couche de roches sédimentaires contenant notamment un fossile stratigraphique, dont l'apparition a été utilisée pour délimiter le Trias du Jurassique. L'âge des deux couches de cendres est très proche et la roche sédimentaire a un âge compris entre celui de ces deux couches de cendres (d'après le principe de superposition), cela permet d'en déduire l'âge du fossile et donc de caler dans le temps la limite Trias/Jurassique à environ 200 Ma d'après la courbe. Ce résultat est cohérent avec celui figurant sur l'échelle chronostratigraphique : $199,6 \pm 0,6$ Ma.

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

1. En choisissant les valeurs extrêmes, on a :

$$\alpha = (0,82-0,7) / (1,8-0)$$

$$2. T = \ln[(0,82 - 0,7) / (1,8-0)+1)] / (1,397 \cdot 10^{-11}) = 4,62 \text{ Ga.}$$

D'après l'âge des chondrites, identique à celui de la Terre, la Terre a 4,62 milliards d'années.

Exercice 3

Si elles ne sont pas fondées sur des faits observables, les propositions de dates s'appuyant sur des affirmations trouvées dans des textes ne peuvent être considérées comme scientifiques. Les démarches de Buffon, Darwin et Kelvin sont des démarches scientifiques : elles s'appuient sur des observations et des expérimentations reproductibles. Cela ne signifie pas qu'elles fournissent une information juste, mais la validité de cette information peut être discutée sur la base des protocoles utilisés, de la pertinence des modèles (les sphères métalliques de Buffon par exemple), des mesures et calculs réalisés (précision des mesures de températures à l'époque de Buffon), des approximations choisies, etc.

L'approche de Darwin date avant tout les plus anciens fossiles connus à son époque et non pas l'âge de la Terre, elle permet de fournir une approximation en minorant l'âge de la Terre.

Les radiochronomètres sont des éléments dont la désintégration au cours du temps, selon une constante connue, permet de dater précisément un objet.

Clair Patterson, en s'appuyant sur les modèles expliquant la formation du système solaire qui stipulent que la Terre s'est formée en même temps que les autres objets du système solaire, a pu estimer l'âge de la Terre (et du reste du système solaire) en datant par radiochronométrie les objets du système solaire les plus vieux connus : les météorites chondritiques.

Exercice 4

Les feldspaths potassiques, les biotites et les muscovites se trouvant entre autres dans les granites contiennent potassium (doc. 1). Or le ^{87}Rb peut se substituer au potassium (doc. 2). Les minéraux précédemment cités peuvent donc contenir du ^{87}Rb , c'est pourquoi le couple Rb/Sr est un bon candidat à la datation des granites. Mais tous les granites ne peuvent être datés par ce couple. La gamme d'âge doit être comprise entre environ 10^6 et 10^9 ans.

Exercice 5

Le pyroxène et le fragment de roche ne permettent pas d'identifier un plateau : ils ont été probablement perturbés. Le plagioclase quant à lui, révèle un plateau, sur plus de 75 % de ^{39}Ar libéré par chauffe successive. Ce plateau correspond à un âge d'environ 3,3 Ga, qui correspond à l'âge du basalte lunaire.

Exercice 6

Connaissances : **en gras**

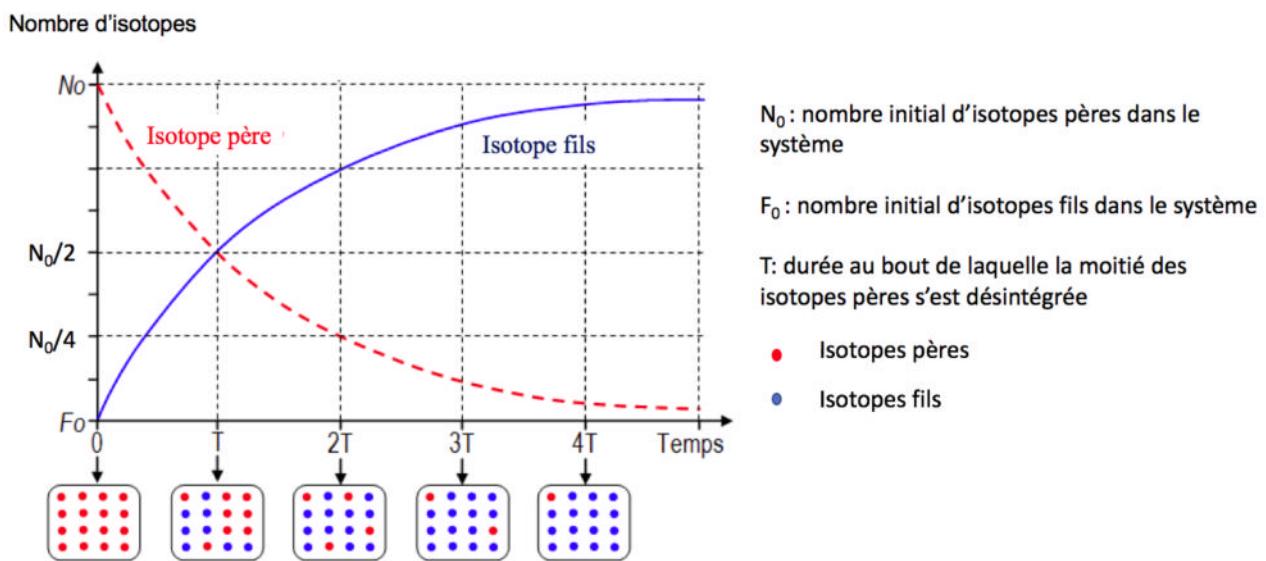
Données issues des documents : *en italique*

Voici les idées-clés :

> Un isotope père radioactif est instable et se désintègre, de façon continue et irréversible, en un isotope fils, radiogénique, selon une constante de désintégration λ déterminée expérimentalement. C'est cette régularité permet d'utiliser les isotopes radioactifs comme des chronomètres.

> Le déclenchement du chronomètre est contrôlé par la température : en deçà d'une certaine « température de fermeture », qui dépend du système (d'un minéral par exemple), la diffusion des isotopes est négligeable, le gain en isotope fils et la perte en isotope père dans le système ne sont dus qu'à la désintégration radioactive, des mesures des isotopes permettent alors d'en déduire depuis combien de temps le système s'est fermé.

> L'évolution au cours du temps du nombre d'isotopes pères et fils dans un système fermé peut-être illustrée par le graphique suivant :



> En pratique, on mesure les rapports isotopiques dans différents échantillons de l'objet à dater. Ces échantillons ayant le même âge, alors s'ils n'ont pas été perturbés, ils permettent de tracer une droite de régression, dite « isochrone », à partir de laquelle on détermine le coefficient directeur a . Grâce à la formule $t = \ln(a+1) / \lambda$, on calcule l'âge t de la roche.

> En utilisant des minéraux dont la température de fermeture est proche de la température de cristallisation des magmas, on peut dater la formation d'une roche magmatique. Ici, ce sont les échantillons de fragments de roche et de feldspaths qui donnent l'âge de la roche : 375 Ma.

> Dans le cas de roches métamorphiques, l'augmentation de la température qu'a subie la roche peut dépasser la température de fermeture de certains minéraux, comme la biotite et la muscovite, d'après le document. Le chronomètre de ces minéraux est alors remis à zéro et ne se fermera que lorsque la température passera en dessous de celle de leur fermeture. L'âge obtenu est alors celui du métamorphisme : ici, l'âge du métamorphisme est donné par la muscovite, environ 27 Ma ; la biotite s'est fermée environ 7 à 8 Ma d'années après la muscovite, cela peut s'expliquer par une température de fermeture plus basse que celle de la muscovite.

Exercice 7

Connaissances : **en gras**

Données issues des documents : *en italique*

Voici les idées-clés :

> Un isotope père radioactif est instable et se désintègre, de façon continue et irréversible, en un isotope fils, radiogénique, selon une constante de désintégration λ déterminée expérimentalement.

Pour le ^{87}Rb , il se désintègre en ^{87}Sr selon une constante $\lambda = 1,397 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$. C'est cette régularité qui permet d'utiliser les isotopes radioactifs comme des chronomètres.

> D'autres couples radiochronométriques peuvent être utilisés pour dater des roches : K/Ar, U/Pb.
> En pratique, on mesure les rapports isotopiques dans différents échantillons de l'objet à dater. Ces échantillons ayant le même âge, alors s'ils n'ont pas été perturbés, ils permettent de tracer une droite de régression, dite « isochrone », à partir de laquelle on détermine le coefficient directeur a . Dans le cas des micaschistes, $a = 0,0049$.

> À partir de ce coefficient directeur a , on calcule un âge t grâce à la formule $t = \ln(a+1) / \lambda$. Ici, $t = \ln(0,0049 + 1) / (1,397 \cdot 10^{-11})$. D'après le document l'âge est de 349,9 Ma.

> Cette valeur correspond à la durée écoulée depuis que les échantillons analysés sont fermés, c'est-à-dire que la diffusion des isotopes est négligeable et que le gain en isotope fils et la perte en isotope père ne sont dus qu'à la désintégration radioactive.

> C'est la température qui contrôle la diffusion des isotopes dans les minéraux et donc la fermeture du système ; t est donc le temps écoulé depuis que les échantillons sont passés sous cette température de fermeture. Nous savons que les micaschistes sont des roches métamorphiques, dont la roche initiale a un âge estimé entre 560 et 480 Ma. L'âge de 349,9 Ma obtenu par datation Rb/Sr est donc celui de leur transformation en micaschiste, par métamorphisme.

> La composition minéralogique d'une roche peut apporter des informations complémentaires, notamment sur l'événement métamorphique qu'elle a subi : dans le cas des micaschistes de l'île de Groix par exemple, on constate la présence de phengite. Or, ce minéral n'est stable qu'à partir d'une pression de 1,6 GPa minimum, ce qui correspond à une profondeur d'environ 50 km. Cela signifie que les micaschistes ont été enfouis à au moins 50 km, par subduction, il y a environ 350 Ma, et qu'ils ont ensuite été exhumés.

Exercice 8

Connaissances : **en gras**

Données issues des documents : *en italique*

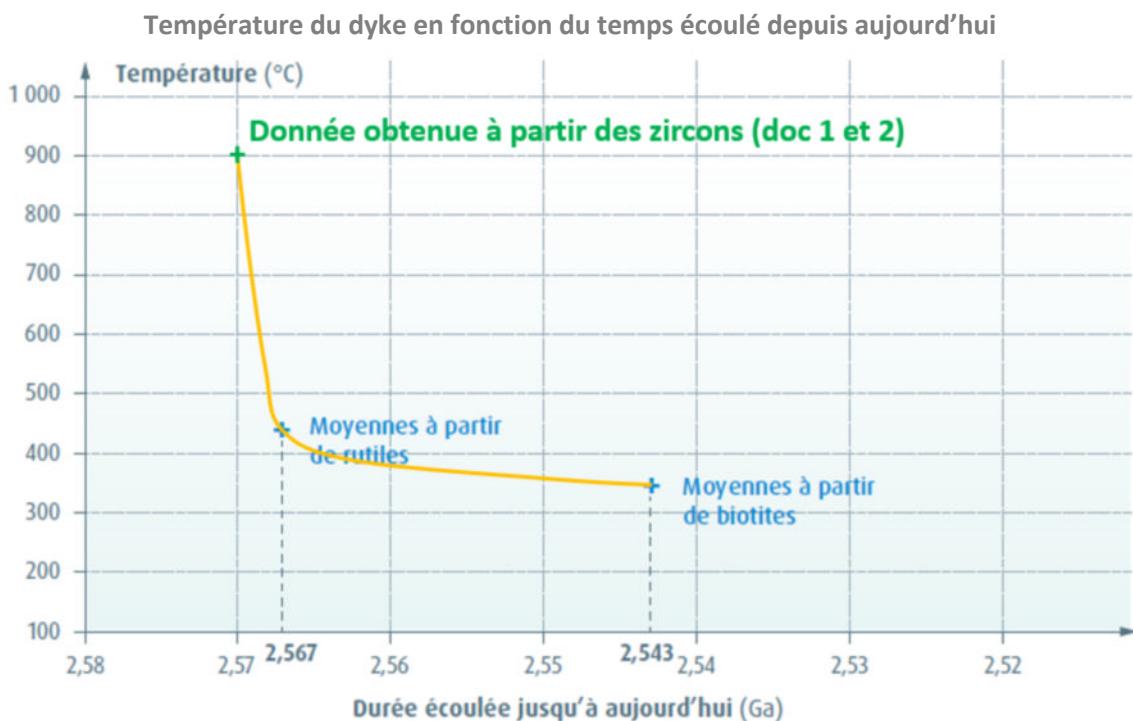
Présentation de la démarche

Pour déterminer l'âge du grand dyke, les zircons sont adaptés car leur température de fermeture est proche de celle de la cristallisation du dyke : environ 900 °C (doc. 1). Les valeurs des rapports isotopiques obtenus par l'analyse de ces zircons (doc. 1) positionnées sur la courbe Concordia permettront de connaître l'âge de mise en place du dyke (doc. 2). Par ailleurs, la durée depuis laquelle le dyke est passé sous la température de fermeture des biotites et des rutiles permettra de connaître l'évolution de la vitesse de refroidissement du dyke, depuis sa formation (doc. 3).

Mise en œuvre de la démarche

Les rapports isotopiques mesurés dans les zircons donnent un âge de 2,57 Ga environ (doc. 2). Or, cet âge correspond à la durée écoulée depuis que le dyke est passé sous la température 900 °C, correspondant à la température de fermeture des zircons (doc. 1). Cet âge correspond donc à sa mise en place.

En plaçant cette valeur dans le graphique présentant l'évolution de la température du dyke en fonction du temps (doc. 3 complété ci-dessous), on constate que sa vitesse de refroidissement n'a pas été constante.



Il s'est refroidit de 150 °C/Ma entre 2,57 Ga et 2,567 Ga [(900-450) / (2570-2567)], puis de 4,2 °C/Ma entre 2,567 Ga et 2,543 Ga [(450-350)/(2567-2543)].

Exercice 9

On demande à l'élève de proposer une date de début et de fin de la formation de l'océan Liguro-Piémontais. Pour cela, il doit dater l'ophiolite du Chenaillet, à partir des données isotopiques fournies (doc. 2 et 3). L'utilisation du tableur lui permettra de tracer la courbe de tendance et d'afficher le coefficient directeur de la droite pour calculer l'âge de l'ophiolite. Il devra ensuite comparer cet âge à ceux des autres ophiolites (doc. 1). L'ophiolite la plus âgée permet d'affirmer que la mise en place de l'océan à au moins débuté depuis la formation des roches de l'ophiolite. L'ophiolite la plus récente permet de caler la fermeture de cet océan.

Deux aides majeures sont proposées chacune dans un onglet du fichier tableur numérique. Ces aides sont à extraire selon le point de blocage du candidat :

- **Fiche secours 1** : courbe de tendance sans l'équation de la droite, si l'élève ne parvient pas à afficher l'isochrone.

- **Fiche secours 2** : courbe de tendance avec l'équation de la droite, si l'élève ne parvient pas à afficher l'équation de la droite pour obtenir le coefficient directeur.

La « fiche procédure détaillée pour calculer l'âge absolu d'une roche est aussi une aide majeure qui peut être extraite de la base de données nationale.

> Éléments d'évaluation :

Proposer une stratégie de résolution

On acceptera et valorisera ces idées :

- datation du gabbro du Chenaillet à partir des données isotopiques (doc. 2 et 3)
- identification de la plus récente et la plus ancienne ophiolite (doc. 1)
- ces âges définissent l'étendue temporelle *minimum* de formation de l'océan

Mettre en œuvre un protocole

Seules aides majeures :

- fiche procédure détaillée pour calculer l'âge absolu d'une roche ;
- l'examinateur réalise le geste à la place du candidat : affichage de la courbe de tendance sur le tableau, affichage de l'équation de la droite.

Présenter les résultats

La production doit montrer l'isochrone de l'ophiolite du Chenaillet, son coefficient directeur et le calcul de l'âge absolu de l'ophiolite.

Exploiter les résultats

Le gabbro du Chenaillet est âgé de $183,4 \text{ Ma} \pm 22 \text{ Ma}$. D'après le doc. 1, c'est la plus vieille ophiolite alpine. De plus, la plus jeune ophiolite est datée de $148 \pm 2 \text{ Ma}$ d'après le doc 1.

On en déduit qu'entre $183,4 \pm 22 \text{ Ma}$ et $148 \pm 2 \text{ Ma}$, l'océan était en formation.

L'étendue temporelle de sa formation est peut-être plus grande, mais aucun échantillon découvert à ce jour ne permet de l'attester.

Chapitre 7 Les traces du passé mouvementé de la Terre.

Ce chapitre s'inscrit dans la foulée du chapitre de géodynamique de la classe de première (chapitre 11 « Les zones de collision » dans le manuel Belin). Il s'appuie aussi sur l'ensemble des phénomènes géologiques (nature des lithosphères, phénomènes de divergence et de convergence, transformation des roches) et des techniques (sismique, pétrologie, datation) étudiées en première et dans les chapitres précédents de terminale. Ce chapitre fournit également certaines bases indispensables dans la compréhension des climats du globe qui seront l'objet du thème 4.

Le chapitre débute par une sortie de terrain où des notions de premières sont ré-exploitées afin de compléter la notion de ceinture orogénique et de constater que ces dernières sont constituées d'une grande diversité de roches (**unité 1**). Dans l'**unité 2**, on explicite la notion d'ophiolite et on découvre les régions où ces roches affleurent en France métropolitaine. L'**unité 3** fait un gros plan sur deux types d'ophiolites alpines et aborde les mécanismes de leur exhumation. Dans l'**unité 4**, on développe la notion de marge passive, évoquée en première (pp. 124-125 du manuel Belin) et on explique un des grands modes de fracturation de la lithosphère continentale. L'**unité 5** permet d'illustrer ce type de fracturation dans le cadre du rifting avorté des fossés oligocènes, qui traversent une grande partie du territoire. La conclusion de ce chapitre, mais aussi de l'ensemble du programme de géodynamique interne et externe évoqué de la seconde à la terminale, trouve son aboutissement dans l'**unité 6** où l'on découvre la notion de cycles orogéniques successifs développés par Wilson et de l'importance des sutures orogéniques.

Thème 2 À la recherche du passé géologique de notre planète	
Connaissances	Capacités, attitudes
Des domaines continentaux révélant des âges variés Les continents associent des domaines d'âges différents. Ils portent des reliquats d'anciennes chaînes de montagnes (ou ceintures orogéniques) issues de cycles orogéniques successifs. > Unité 1	Observer la carte géologique mondiale afin d'identifier quelques ceintures orogéniques. > Objectif oral Recenser et organiser les informations chronologiques sur les formations magmatiques et métamorphiques, figurant sur une carte de France au 10^6 . > Chapitre 6, unité 1
La recherche d'océans disparus Les ophiolites sont des roches de la lithosphère océanique. La présence de complexes ophiolitiques formant des sutures au sein des chaînes de montagnes témoigne de la fermeture de domaines océaniques, suivie de la collision de blocs continentaux par convergence de plaques lithosphériques. > Unités 2 et 3 L'émergence d'ophiolites résulte de phénomènes d'obduction ou de subduction, suivis d'une exhumation. > Unités 2 et 3	Recenser, extraire et organiser des données de terrain ou cartographiques pour argumenter : <ul style="list-style-type: none">– sur l'origine océanique d'un complexe ophiolitique (données pétrographiques et minéralogiques) ; > Unité 2 et 3– sur l'idée de suture (données cartographiques : par exemple, les Alpes ou l'Himalaya). > Unité 2 et 3 Établir des corrélations entre la composition minéralogique d'une roche et les différentes conditions de pression et de température, déterminées par les contextes de subduction. > Unité 2 et Activité expérimentale
Les marques de la fragmentation continentale et de l'ouverture océanique Les marges passives bordant un océan portent des marques de distension (failles normales et blocs basculés) qui témoignent de la fragmentation initiale avant l'accrétion océanique. > Unité 4	Recenser, organiser et exploiter des données (sismiques, tectoniques, sédimentaires) : <ul style="list-style-type: none">– relatives à des marges passives divergentes > Unité 4 et Objectif Oral– relatives à un rift continental > Unité 5 et Activité expérimentale

<p>Les stades initiaux de la fragmentation continentale correspondent aux rifts continentaux. > Unité 5</p> <p>La dynamique de la lithosphère détermine ainsi différentes périodes paléogéographiques, avec des périodes de réunion de blocs continentaux, liées à des collisions orogéniques, et des périodes de fragmentation conduisant à la mise en place de nouvelles dorsales. > Unité 6</p>	
--	--

Quelques compétences et quelques capacités travaillées	Place dans le chapitre
Pratiquer des langages <ul style="list-style-type: none"> Utiliser un logiciel de traitement de données. Communiquer à l'écrit sous forme d'un texte Communiquer à l'écrit par un schéma Utiliser les SIG 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 2, 4 • Unité 3 • Unité 3 • Unités 1, 5 et 6
Pratiquer des démarches scientifiques <ul style="list-style-type: none"> Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution Observer, expérimenter, calculer 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 2, 4 • Unité 4
Concevoir, créer, réaliser <ul style="list-style-type: none"> Concevoir et mettre en œuvre un protocole 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 5
Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre <ul style="list-style-type: none"> Identifier les techniques pour garder une trace : faire un tableau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 5
Adopter un comportement éthique et responsable <ul style="list-style-type: none"> Appliquer des règles de sécurité au laboratoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 5

Choix pédagogiques

Unité 1

Cette unité permet aux élèves de rassembler leurs connaissances de seconde (en sédimentologie) et de première (magmatisme, tectonique) ainsi que celles qu'ils viennent d'acquérir dans les chapitres précédents (datation relative et absolue) pour montrer qu'une chaîne de montagnes contient des roches très différentes en âge et en composition. On en déduit que cette dernière ne peut être le résultat que d'une collision de plaques d'histoire différente.

La carte géologique des Vosges (**document 1**) localise les sites d'étude. Avec le complément apporté par le SIG en ligne EGDI, il est possible de situer la zone d'étude dans son ensemble et notamment d'observer qu'elle se trouve à la périphérie du Bassin parisien, caractérisé par ces auréoles sédimentaires de couches plus ou moins concentriques, et en bordure du bassin sédimentaire de la plaine d'Alsace dont la structure géométrique est très différente. Ce SIG permet de plus d'étudier la géologie de l'Europe et il présente aussi de nombreuses fonctionnalités, notamment pour l'étude des marges, des littoraux et des zones à risques. Un simple clic sur la couche permet de connaître sa composition. Bien qu'il soit en anglais, ce SIG est très compréhensibles et à la portée des élèves.

Le document 1 montre clairement qu'il existe deux grands ensembles tectoniques limités par l'accident crustal de la faille Lalaye-Lubine. Au Nord, on distingue des roches sédimentaires anciennes (paléozoïques **documents 1 et 3**) et des formations magmatiques de type subduction (granodiorites, granites, diorites ; **documents 1 et 3**). Au Sud, on trouve à la fois des roches de la lithosphère continentale profonde (**document 4**) et des restes de lithosphère océanique (**document 2**).

Des informations complémentaires sur ces formations sont disponibles sur le site « Géologie de la Lorraine » mis en ligne par l'académie de Metz-Nancy à l'adresse suivante : <https://www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/>

Unité 2

Cette unité permet de définir la notion d'ophiolite. À l'origine, le terme « ophiolite » désignait une roche verte riche en serpentine dont l'aspect rappelait la peau d'un serpent (ophis = serpent ; **document 1**). Il était employé pour qualifier toute une panoplie de roches associées à des roches ultramafiques serpentiniées. Il a fallu attendre Steinmann G. en 1926 pour qu'une définition plus précise apparaisse : une ophiolite est une association de roches essentiellement ultrabasiques composées majoritairement de périclases (souvent serpentiniées) de gabbros, diabases, spilites, norites et roches associées. Ce n'est qu'après les années 1970 que les ophiolites ont été interprétées comme des fragments de lithosphère océanique. La définition de la succession verticale des roches qui composent cette lithosphère a été énoncée en 1972 à la conférence de Penrose Field. Elles correspondent à une lithosphère de type accrétion rapide : périclase / gabbros / filons (dolérites) / pillow lavas (basaltes).

Cependant, depuis quelques dizaines d'années la multiplication des forages profonds et la meilleure qualité des données sismiques ont montré qu'il existait plusieurs types de lithosphère océaniques et qu'elles n'étaient pas toutes recouvertes d'une croûte magmatique, comme cela a été expliqué dans le programme de première (voir chapitre 9 du manuel Belin). Ces avancées scientifiques ont imposé de préciser la définition des ophiolites. Nous avons donc demandé à Michel Ballèvre qu'il définisse précisément les éléments géologiques qui permettent de dire « à coup sûr » qu'une roche verte est une ophiolite (**document 2**). Selon ce géologue de renom, une ophiolite est une périclase

serpentinisée ayant subi une fusion partielle plus ou moins importante, associée à des formations magmatiques basiques – mais pas obligatoirement le triplet gabbros, dolérite, basaltes – transformées par hydratation ou par déshydratation. Pour finir l'ensemble doit être associé à des sédiments marins (potentiellement métamorphisés eux-aussi).

Cette définition moderne permet d'exclure de nombreuses formations magmatiques subaquatiques dont les laves prennent généralement la forme de pillows. C'est le cas notamment des pillows de la presqu'île du Crozon (pointe du Finisterre) ou d'Ogeu-les-Bains dans les Pyrénées atlantiques, qui sont des formations magmatiques mises en place dans des bassins en extension (« pull appart ») mais n'ayant pas été océanisées.

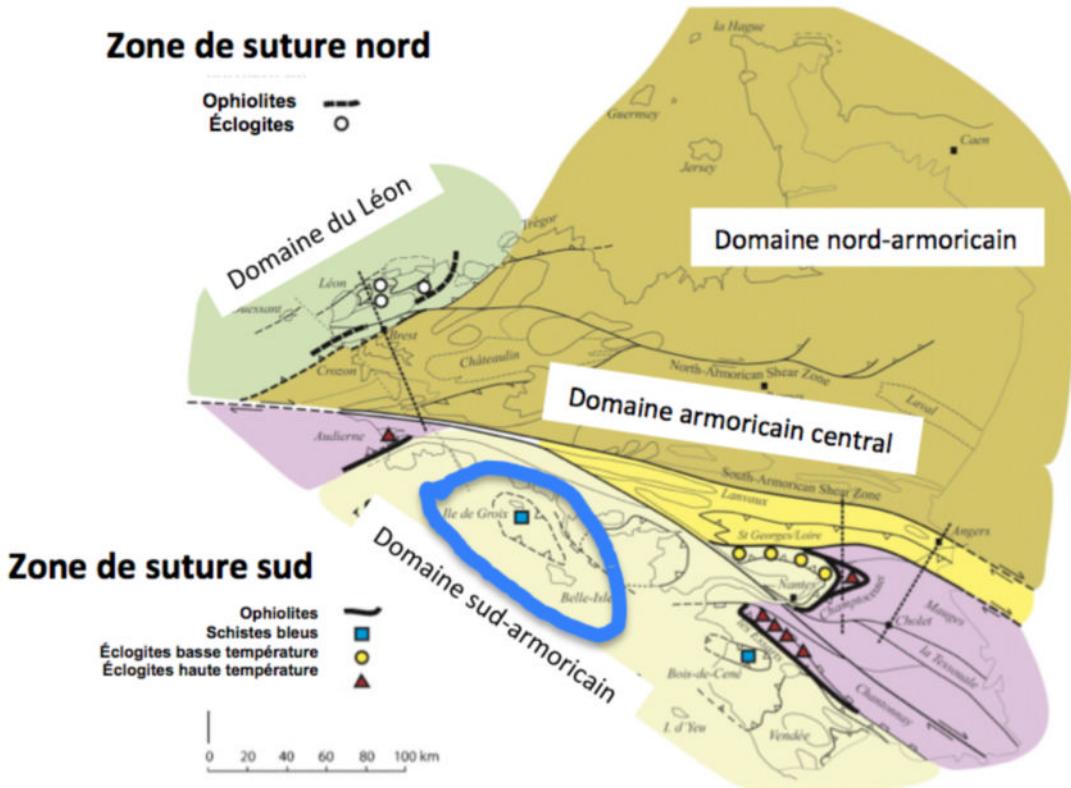
Le **document 3** montre les domaines du métamorphisme des roches basiques dans lesquels sont susceptibles de se retrouver les gabbros, les basaltes et les sédiments (notamment ceux issus de la fragmentation de la lave au contact de l'eau). Il s'agit d'un rappel du programme de première. Le diagramme précise les domaines de stabilité des minéraux clefs dans la détermination de la profondeur atteinte par ces roches lors de la subduction. Il sera utilisé dans le chapitre suivant et dans les exercices pour expliquer la mise en place des ophiolites.

La lithothèque nationale est présentée **document 4**. Elle rassemble les travaux des différentes lithothèques académiques et le considérable travail que font certains de nos collègues. Il est possible par cet accès d'avoir une vision de la répartition des sites où affleurent en France des ophiolites et de nombreuses informations (photos, cartes, explications, etc.) permettant aux élèves de construire la notion de suture orogénique soulignée par ces assemblages de roches. Soulignons que la lithothèque est un site évolutif qui s'enrichit au cours du temps. Dans ce même document, on fait référence aux ophiolites de Najac, au sud-ouest du Massif central qui sont présentes dans la lithothèque avec de nombreuses photos et documents et sont l'objet de l'activité numérique que nous proposons.

Les exemples d'ophiolites abordés ensuite correspondent à des affleurements métropolitains continentaux car ils permettent de comprendre la construction progressive de l'hexagone. Rappelons néanmoins qu'il existe des ophiolites en Nouvelle-Calédonie.

L'île de Groix (**document 5**) est un prisme sédimentaire entraîné dans le domaine des schistes bleus et des éclogites. Ce n'est donc pas à proprement parler une ophiolite, même si l'on retrouve de la serpentine à l'affleurement au nord-ouest de l'île. Cependant, cet affleurement remarquable est en continuité avec les schistes bleus du Bois-de-Céné et les éclogites de Champtoceaux et des Essarts (voir carte ci-dessous). Il fait donc partie des traces de la subduction de l'océan – dont la taille et la lithologie de la lithosphère sont encore débattus – qui sépare le bloc sud armoricain des blocs nord-centre Armorican et nord Erdre. Pour plus d'informations sur les sutures varisques armoricaines, on peut consulter l'article suivant :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071308002770?via%3Dihub#aep-abstract-id17>



Le second exemple traité dans le **document 5** correspond à la séquence ophiolithiques des Monts du Lyonnais-La Brévenne où affleurent de très beaux pillows lavas hydratés et associés à des sédiments marins ainsi que des gabbros et des périclites.

Le **document 6** propose une carte des principaux blocs crustaux constituant le socle de l'Hexagone. Il a pour but de faire correspondre une partie des sutures entre les blocs avec les affleurements d'ophiolites. Par ailleurs, ce document qui a déjà été utilisé pour la klippe du Thalhorn dans l'unité 1 sera remobilisé plus loin dans le chapitre.

Pour plus de données concernant les ophiolites, voir <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/terre/les-lithospheres-oceaniques/les-lithospheres-fossiles>

Unité 3

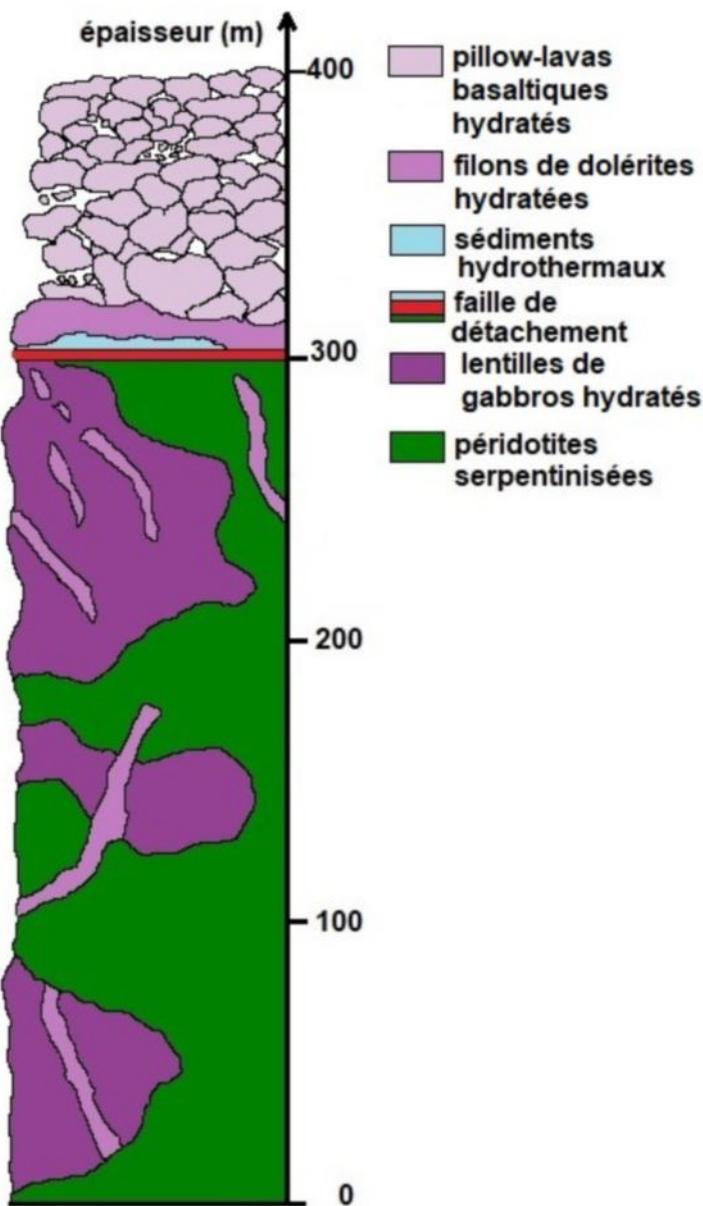
Cette unité aborde les mécanismes d'exhumation des ophiolites grâce à deux types d'ophiolites que l'on trouve dans les Alpes. Le Chenaillet sert d'exemple à l'obduction, celle du Viso à la succession d'une subduction et d'une exhumation.

Le **document 1** permet de localiser les ophiolites alpines, coincées entre les deux blocs crustaux que sont l'ensemble marge passive de la plaque européenne et haut topographique de Briançon, et la marge passive de la plaque Apulienne. On observe sur les deux cartes géologiques que les ophiolites affleurent avec des sédiments océaniques contemporains de l'ouverture océanique, et qu'elles contiennent de la péridotite serpentinitisée injectée de gabbros, dolérite et associées à des basaltes. On signale la présence de failles de détachement.

Le **document 2** est consacré au site du Chenaillet. Les gabbros, basaltes et filon sont métamorphisés dans le domaine des schistes verts à chlorite et actinote (on peut faire un retour sur le document 3 de l'unité précédente et les situer sur le diagramme pression/température). On signale que les gabbros

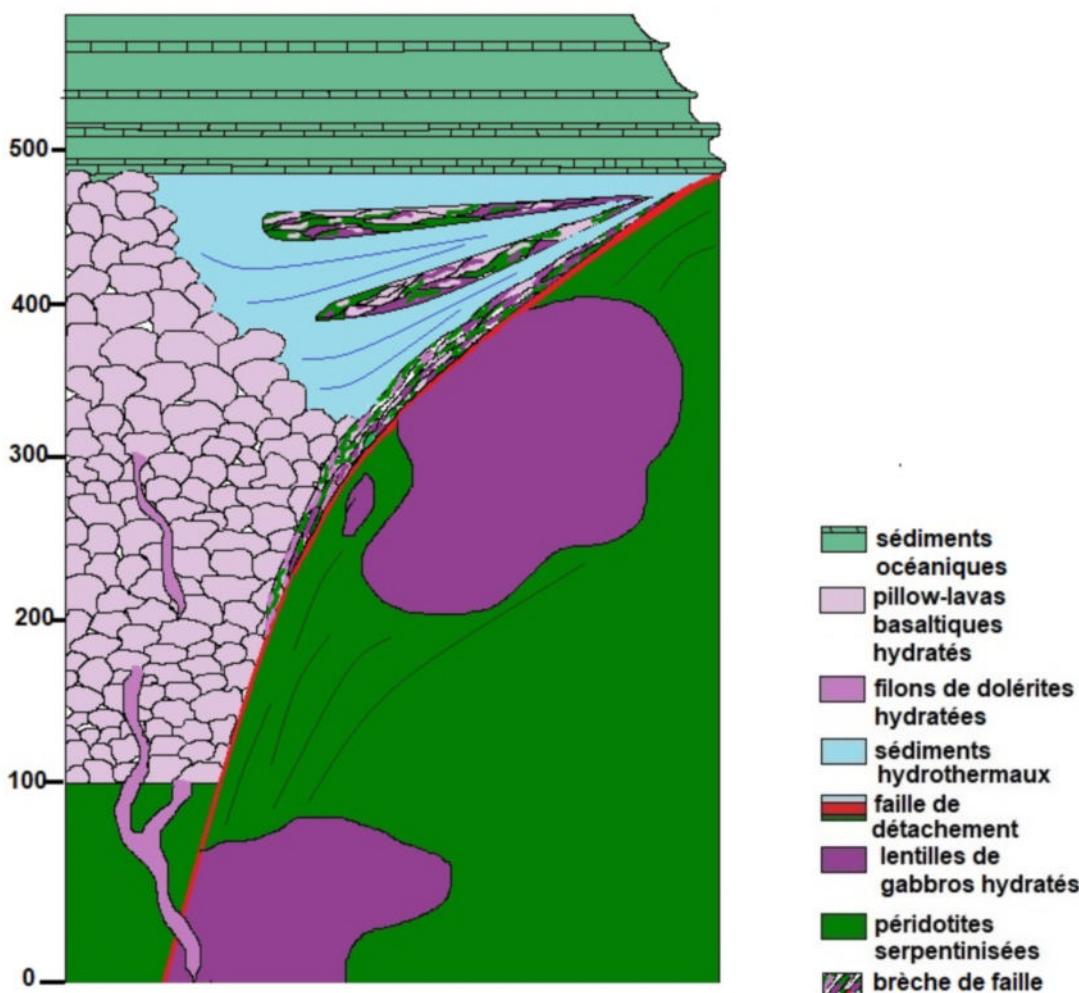
correspondent à des lentilles associées aux péridotites serpentinisées ; ils sont peu imposants. L'affleurement de pillows lavas associés aux gabbros est une signature d'une légère fusion partielle de la péridotite. Ces roches sont associées aux radiolarites et aux ophicalcites. Ces ophiolites sont donc un reste de lithosphère océanique à accrétion lente du type de l'océan Atlantique actuel (voir manuel de première p. 154). Le domaine métamorphique des schistes verts montre que la lithosphère était hydratée et qu'elle n'est pas entrée en subduction. Le Chenaillet est donc un fragment de lithosphère océanique à accrétion lente qui a été obducté.

Le log du Chenaillet ci-dessous (disponible en téléchargement) permet de localiser la surface de la faille de détachement entre le manteau de péridotite serpentinisée injecté de roches magmatiques et la surface de corrugation (surface striée) de l'OCC (Oceanic Core Complex, voir manuel de première p. 158) recouverte par des sédiments liés à l'hydrothermalisme et des formations volcaniques.



Le **document 3** décrit l'affleurement du Viso, plus complexe que celui du Chenaillet. On y retrouve toutes les roches d'une lithosphère océanique, mais elles ne sont pas superposées de manière «conventionnelle ». On observe, de bas en haut, l'association péridotite serpentinisée (1) et appauvrie par fusion partielle associées à des gabbros (2), puis l'association basaltes (3) et sédiments (4), enfin une nouvelle couche de péridotite/gabbro. Cette succession chaotique permet d'illustrer la notion d'écailles avec contacts anormaux de matériaux désolidarisés lors de la collision.

Cependant les scientifiques ont reconstitué une superposition correspondant au log ci-dessous (disponible dans les compléments numériques), où l'on distingue clairement la surface de détachement (rouge), les formations magmatiques et la mise en place de brèches de failles constituées du rabotage d'éléments du manteau, de gabbros, de basaltes et de dolérites hydratées. La couverture sédimentaire recouvrant le fond océanisé correspond aux formations du Queyras avant la subduction.



Certaines formations sont métamorphisées dans le domaine des schistes bleus à glaucophane et d'autres dans le domaine des éclogites. Rappelons que certains gabbros du Viso portés dans le domaine des éclogites ne contiennent pas forcément de grenat ou de jadéite car, malgré les conditions de pression et de températures, la chimie initiale des gabbros Mg-Al ne leur permet pas d'en produire autant, contrairement à des gabbros Fe-Ti.

En revanche, on observe des éclogites rétromorphosés dans le domaine des schistes bleus avec l'apparition de glaucophane. Il faut donc abandonner l'idée que le mont Viso correspond à une série

continue de gabbros portés en subduction à des profondeurs différentes. Ce que l'on observe sur ce site, c'est un écaillage de la portion superficielle d'une lithosphère plongeante ayant subducté à des profondeurs différentes. Ces écailles sont remontées et sont venues « se stocker » à une vingtaine de kilomètre de profondeur environ dans le domaine des conditions P-T des schistes bleus.

Le Viso est donc un complexe d'accrétion de morceaux de lithosphère contemporain de la subduction qui permet de conserver des roches haute pression et basse température. Le zoom (3) dans le **document 4** montre le mécanisme de cet écaillage, qui est matérialisé par un découplage tectonique entre la plaque plongeante et la plaque chevauchante.

Le **document 4** est une proposition simplifiée et synthétique compilant à la fois l'obduction du Chenaillet et la subduction et exhumation du Viso (qui dans la réalité ne sont pas exactement à la même latitude). Il replace par ailleurs le haut topographique de Briançon, qui s'isole de la marge européenne hyper-étirée (voir unité 4). La lithosphère océanique est représentée sans dorsale ni chambre magmatique car l'océan liguro-piémontais était petit (actuellement, on envisage une largeur maximale de 300 km) et constitué d'ophiolites de type accrétion lente. Les auteurs s'accordent pour une mise en place par détachement mantellique de périclases serpentinisées.

Lors de la convergence, la mise en place d'ophiolites obductées à côté d'ophiolites subductées s'explique facilement avec l'existence de marges conjuguées potentiellement découplées par une faille transversale (voir unité 4, **document 4 p. 173**). Chaque compartiment ayant une dynamique propre, il est facilement envisageable qu'un fragment lithosphérique puisse être obducté. Certains travaux suggèrent que le Chenaillet avait une localisation proche de l'extrémité de la marge (voir schéma de l'**exercice 5 p. 187**).

L'exhumation ultérieure des matériaux portés en subduction puis stockés dans la zone d'accumulation s'explique actuellement par les mécanismes liés au retrait de la plaque plongeante. En effet, le pendage de cette dernière n'est pas fixe : on observe qu'il se verticalise en induisant le recul de la fosse par rapport à la plaque chevauchante. Ce recul de la fosse à des conséquences notamment sur les contraintes dans cette zone de convergence, ce qui peut faciliter l'exhumation rapide de ces formations profondes.

Pour plus d'informations concernant les ophiolites alpines, voir : <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/terre/les-lithospheres-oceaniques/les-lithospheres-fossiles>

Unité 4

Cette unité s'appuie sur l'exemple des marges passives de l'Atlantique afin d'amener les élèves à comprendre la structure et les étapes de formation de ce type de marges. On expose ici une nouvelle vision des marges passives dont il va falloir tenir compte. En effet, depuis les années 1970, la géodynamique enseignée, notamment en ce qui concerne les marges passives, n'avait pas beaucoup évolué. Depuis une dizaine d'année, les progrès des études sismiques et l'augmentation du nombre de sites forés ont permis de mettre en évidence une plus vaste diversité de forme et de mécanismes d'ouverture que ce que nous avions l'habitude d'enseigner.

Dans cette unité et la suivante, nous avons décidé de ne traiter en détail qu'un seul type de marge : les marges amagmatique (exemple : marge Terre-Neuve-Galice, doc. 1 A-A') qui se forment grâce une mise sous tension de la croûte continentale, notamment suite à la traction exercée par la plaque plongeante dans les zones de subduction.

Un deuxième type de marge est qualifié de magmatique. Une marge magmatique présente, associée à un amincissement crustal, des formations crustales fracturées d'épaisses coulées de laves qui se dirigent vers la future zone de rupture et la base d'un sous-placage magmatique issus de la fusion

partielle du manteau sous continental. On trouve des marges de ce type au niveau de la marge conjuguée Groenland-Norvège (doc. 1, B-B'). Ces marges sont le résultat fragilisation de la lithosphère au niveau de la remontée d'un panache mantellique (point chaud). Ce panache va distendre la lithosphère et provoquer la mise en place d'un rift. C'est ce que l'on observe aux Afars, avec le point chaud qui se déplace actuellement vers le sud.

Le troisième type de marge correspond aux marges transformantes qui sont générées en bordure des continents par les failles lithosphériques coulissantes. Elles mettent en contact une lithosphère continentale épaisse avec une lithosphère océanique par une dénivellation brutale de plusieurs kilomètres. Ces marges sont très abondantes et on en trouve au large de la Guyane.

L'expression « marges conjuguées » est importante car elle montre que les deux portions à présent séparées par un océan ont été produit par un événement identique malgré les différences que l'on peut observer lors d'une analyse plus fine.

Dans le **document 2**, qui correspond au profil sismique de la marge conjuguée Terre-Neuve–Galice, on constate que les deux marges sont très dissymétriques. C'est le cas de tous les types de marges. Au niveau de la marge de Galice, on observe un domaine aminci très vaste (200 km de long) avec de nombreux haut fonds. Dans cette portion de marge, l'épaisseur de la croûte passe de 30 à 10 km, de petits bassins sédimentaires se forment et certains peuvent devenir assez profonds pour enregistrer les événements syn-tectoniques et post-tectoniques. À l'extrémité du domaine hyper-étiré, des blocs de croûte continentale basculent sur le manteau sous-continentale, qui est exhumé par les tensions divergentes. Le manteau est serpentiniisé et constitue le fond de l'océan, donc la lithosphère. À ce niveau, il est impossible de parler de Moho au sens où on le qualifie habituellement par la différence de composition entre la croûte et les péridotites mantelliques (Moho pétrographique). Le « Moho » enregistré par les études sismiques est ici un « Moho sismique » qui correspond à base du front de serpentisation.

La marge conjuguée de Terre-Neuve est très différente. Le domaine aminci est très court – une cinquantaine de kilomètres – et on passe brutalement au domaine hyper-étiré où affleurent du manteau sous-continent serpentiniisé et des blocs de croûte continentale. On distingue dans certains cas la mise en place de hauts topographiques qui peuvent être isolés de la bordure continentale par l'exhumation de manteau sous continental (voir **p. 187** schéma de la marge européenne de l'océan liguro-piémontais, avec le haut topographique correspondant à Briançon). La sédimentation enregistrée sur ce type de marge correspond à des grands bassins sédimentaires perchés entre les blocs basculés. Elle est peu profonde mais continue des étapes pré et syn tectonique.

En résumé, les deux marges conjuguées sont totalement asymétriques au niveau structural et sédimentaire.

Un autre élément bien visible sur ces profils est la façon dont la totalité de la croûte continentale s'amincit. On distingue que des failles listriques (qui s'incurvent en profondeur) affectent la croûte inférieure et la croûte supérieure de manière différente. La croûte inférieure, bien que plus ductile, est amincie par l'écaillage de ses portions basales et la croûte supérieur par l'écaillage de ses parties superficielles. L'amincissement crustal est donc très différent de ce qui pouvait être représenté dans nos anciens manuels.

La dernière remarque concernant ce profil sera pour souligner la zone de rupture entre les deux portions de la marge conjuguée. Le trait vert correspond à la faille de détachement qui sépare les deux compartiments. Son aspect est très différent des failles normales subverticales dessinées par nos soins. Il est tout à fait comparable à ce que l'on observe au niveau des failles de détachement mantelliques des lithosphères océaniques à accrétion lente. C'est une longue zone de faiblesse qui, à l'échelle d'une marge en formation, est subhorizontale et va lentement étirer le manteau sous-continentale et la croûte. Cette faille désolidarise donc une portion « surface de plaque » et une portion « plaque inférieure » (voir document 4).

Le **document 3** présente un schéma simplifié et synthétique des différentes étapes conduisant la rupture entre les deux marges. Notez que, même dans le dernier schéma, l'accrétion océanique magmatique n'a pas débuté ; ceci a des conséquences importantes sur l'âge des fonds océaniques comme nous le verrons dans l'unité 6. Ce document montre comment l'écaillage de la croûte inférieure et du manteau sous-continentale permet l'amincissement basal de la lithosphère continentale conjointement avec l'amincissement superficiel. Que ce soit au niveau du manteau ou au niveau de la croûte, l'hydratation joue un rôle majeur dans la mise en place de couches savon (mylonites continentales, serpentine) permettant le coulissemement des éléments désolidarisés. Au niveau des continents, l'eau météorique pénètre les failles listriques et hydrate la croûte basale formant des mylonites hydratées. L'amincissement crustal et l'hydratation favorisent la migmatitisation de la croûte basale et la mise en place de dômes de gneiss qui vont ramollir la croûte superficielle. Lorsque le manteau sous-continentale affleure à la surface (généralement sous l'eau), il est hydraté et la serpentisation favorise l'hyper-étirement des péridotites. La phase de rupture aura lieu uniquement lorsque les deux portions de manteau sous continental seront séparées. C'est à ce stade que débutent les phénomènes d'accrétion.

On notera que l'on peut sismiquement observer plusieurs failles de détachement au niveau d'une marge en formation. En général, une d'entre elles finit par dominer et sera à l'origine de la rupture lithosphérique.

Pour finir ce n'est pas par ce que la marge est amagmatique dans son processus d'ouverture qu'elle ne poursuivra pas son océanisation par la mise en place d'une lithosphère magmatique type Pacifique. L'inverse est également vrai : une marge magmatique produite au niveau d'un point chaud peut poursuivre son évolution par une accrétion lente. La différence entre les deux phénomènes d'accrétions est essentiellement liée à la vitesse de divergence des plaques.

Le **document 4** fournit la représentation moderne d'une phase de rifting. On notera que, si l'on prend le bord gauche du bloc, on voit une succession d'une portion base de plaque et d'une portion surface de plaque. Ce schéma a été construit à partir des profils sismiques et des forages réalisés au large de la marge conjuguée Brésil- Angola (profil C-C'). Il montre que sur la même bordure d'un continent on peut avoir une succession de détachements en sens inverse et l'alternance de marges supérieures et inférieures. On note ici le rôle majeur des marges transformantes. À ce schéma, il est aussi possible d'ajouter la mise en place d'un plaquage magmatique lié à une remontée mantellique qui produirait à coté une marge magmatique.

Pour plus de renseignement concernant les nouveautés sur les marges conjuguées <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/terre/les-lithospheres-oceaniques/de-la-marge-passive-a-laccretion-oceanique>

Unité 5

Cette unité a pour objectif de retrouver des traces de distension à l'intérieur des continents. Nous avons choisi de traiter de l'étirement oligocène, qui a découpé l'Europe de la Méditerranée à la Mer du Nord consécutivement au poinçonnement Alpin. Ce choix a été préféré à l'exemple des Afars (traité dans les exercices) car il est susceptible, pour de nombreuses académies, d'être l'occasion de sorties et d'exploitation d'éléments de terrain concrets. En effet, ce que nous avons proposé sur le Grand Est peut être adapté à l'ensemble des fossés oligocènes. Des données, des spots d'affleurement et des documents pédagogiques adaptés à l'environnement géologique des différentes académies peuvent être récupérés sur la lithothèque nationale, dans la thématique « programme de terminale Spé : voir <https://lithothèque.ac-montpellier.fr/geoduc>.

Le **document 1** permet de mettre en évidence, au sein d'un continent, l'existence d'une dépression entre les reliefs des Vosges et de la Forêt noire : c'est le fossé alsacien. À l'aide de Google Earth, il est

possible d'en faire une étude topographique et de mettre en évidence des failles étudiées dans le **document 3** ainsi que la juxtaposition à l'affleurement de roches d'âge et de nature très différente. On comprend qu'entre la faille vosgienne et la faille rhénane, on a une mosaïque de compartiments à enfoncement différentiels qui sont autant de blocs basculés (**document 4**). On distingue aussi sur le **document 5**, au centre du fossé, le volcan Kaiserstuhl, qui permet d'illustrer l'amincissement crustal et la fusion partielle du manteau par décompression.

Le **document 2** est une photographie de l'une des failles de la région, à Bergheim. Sont juxtaposés de part et d'autre d'une faille, un conglomérat Eocène-Oligocène sur une oolithe d'âge Jurassique. Elle permet de re-exploiter les principes de datation relative afin de montrer que le contact est anormal et qu'on est bien dans un contexte faillé. Pour des informations complémentaires, voir : <http://www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=48&p=5annexe1>
<http://www.lithotheque.site.ac-strasbourg.fr/pres-de chez-vous>

Le bloc diagramme du **document 3** montre l'aspect en touches de piano des collines sous-vosgiennes pincées entre la faille Vosgienne et la faille rhénane. La référence aux grès triasiques permet de montrer qu'ils affleurent dans les Vosges alors qu'ailleurs, ils sont en profondeur (ils ne sont accessibles que par sondage).

Le **document 4** renseigne sur l'organisation géométrique des blocs basculés des collines sous-Vosgiennes et le remplissage par les produits d'érosion (conglomérat notamment) du fossé.

Le **document 5** montre l'interprétation moderne des profils Ecors où a été souligné la faille de détachement qui a permis la distension. On note de plus que cette faille a des orientations différentes au nord (doc. 5A) et au sud (doc. 5B), ce qui permet de relier ces deux profils au schéma du doc. 4 de l'unité 4. On observe sur ces deux profils la remontée du manteau qui, par décompression, favorise la fusion partielle et la mise en place d'un volcanisme abondant à cette période (en orange sur la carte de droite). Cette carte montre le cisaillement sénestre qu'a subi la lithosphère européenne de la Méditerranée à la mer du Nord ouvrant ainsi de nombreux fossés Bresse, Limagne, Vallée du Rhône, Languedoc. Le dernier profil correspond à la marge passive languedocienne où l'amincissement crustal et la présence de failles de détachement sont bien visibles ; ce profil ressemble à celui de la marge de Terre-Neuve (document 2 de l'unité 4), ce qui permet de montrer qu'on est en présence d'une ancienne marge de type « surface de plaque ».

Unité 6

Cette dernière unité va permettre de faire le bilan de tout ce qui a été enseigné en géologie en première et en terminale. Avec les cycles de Wilson, tous les événements géodynamiques seront replacés dans un contexte global. Un cycle de Wilson correspond aux épisodes conduisant à la mise en place d'un supercontinent Pangée puis à sa fracturation.

Sur le **document 1** – que l'on peut étudier avec le fichier kmz téléchargeable sur Google Earth afin d'avoir accès aux données qui ne sont pas visibles sur cette projection – on distingue clairement la différence entre le mode de mise en place de la lithosphère océanique, qui est globalement symétrique par rapport à l'axe de la zone d'accrétion, et le mode d'accrétion continentale qui apparaît concentrique par rapport aux différents cratons datant de l'Hadéen (avant 4 Ga). On voit clairement que les cratons se constituent par leur périphérie et, si l'on prend l'exemple de l'Afrique de l'Ouest, on distingue que le rassemblement du craton Ouest africain et du craton du Congo (à l'époque attaché au Craton brésilien) s'est réalisé par la collision de ces deux blocs, par la suture océanique d'Adamastor à la fin du Précambrien.

Pour trouver des données complémentaires sur la géologie du continent africain, un fascicule très pédagogique, intitulé *Visages du continent africain*, et les cartes associées sont disponibles sur le site

de la CCGM (Commission de la carte géologique du monde) : <https://ccgm.org/fr/accueil/145-visages-du-continent-africain-9782917310021.html>

En ce qui concerne la chaîne varisque, on distingue fort bien l'accolement de croûte paléozoïque gondwanienne contre l'extrême nord-est de la France matérialisant la Laurasia. On peut développer la suture méditerranéenne en cours avec la collision de l'Afrique et de la plaque Eurasienne.

Dans le **document 2**, nous traitons le Phanérozoïque grâce à dix cartes paléogéographiques sur lesquelles les frontières de la France métropolitaine ont été soulignées d'une croix ou d'un contour rouge pour faciliter la lecture. Ce document permet de montrer la mise en place de la Pangée et son démantèlement. Il montre l'évolution de la latitude du territoire français et les périodes où ce dernier se situait sous l'eau (plateforme ou bassin océanique) ou au sein d'une ceinture orogénique. Ces notions seront remobilisées dans les chapitres 12 et 13 qui concernent le climat passé. Des liens vers les cartes animées sont disponibles dans ces chapitres ainsi qu'avec l'**objectif oral p. 181**.

Dans le document 2, on observe qu'une petite portion du territoire français se situe près du Pôle sud à la fin du Précambrien et que pendant le début de l'ère Primaire (jusqu'au Dévonien), cette portion constituant le socle Rhéno-hercynien (voir **document 6 p. 169**) va remonter vers le Nord puis entrer en collision avec la Laurasia (au Nord). On distingue que le centre du territoire français, constituant les blocs Moldanubien, Armorique et Aquitain, remonte aussi vers le nord. Ces blocs sont des microcontinents et, selon de nombreux travaux récents, des hauts topographiques associés à la marge gondwanienne et séparés d'elle par des petits bassins à fond océanisé, pas forcément très larges (voir **exercice 3 p. 186**). Autrement dit, ces blocs sont ré-analysés au crible de la vision moderne de la structure des marges (que nous avons esquissée dans les unités 4 et 5) et de la genèse des fonds océanisés (développée dans le manuel de première). La largeur du domaine océanisé a un impact important sur la capacité à devenir, après la collision, une zone de fragmentation (voir **document 3** et **exercice pp. 190-191**).

On observe clairement sur le document 2 que le Dévonien est la période d'intense subduction du fond océanisé que l'on peut relier au magmatisme de subduction des Vosges (**unité 1**), qui aboutit au Carbonifère à l'orogenèse varisque pinçant de nombreux lambeaux ophiolitiques (**unités 1, 2 et 3**) au sein de roches crustales (**unité 1**).

Les cartes du Dévonien au Trias seront de nouveau exploitables dans le **chapitre 13**, à propos du climat à la fin du Paléozoïque (**unités 4 et 5 pp. 326-329**). Il est donc important de développer ici la mise en place et le démantèlement de la chaîne varisque. Du Jurassique au Miocène, on peut étudier la fragmentation de la Pangée et l'ouverture de l'Atlantique. Les cartes du Mésozoïque et du Cénozoïque qui seront respectivement utilisées dans le **chapitre 13 unités 1 et 2 (pp. 320-323)**, et dans le **chapitre 12 unités 5 et 6 (pp. 302-305)**. Associées au document 1, ces cartes montrent que l'océanisation atlantique se fait selon une direction NE/SE qui correspond à la ligne de suture calédonienne (voir **exercice p. 190-191**) et pas selon la direction varisque (E/O). Il existe donc des zones où la lithosphère produite lors des phases orogéniques présente une structure et une composition qui est favorable à une fragmentation ultérieure. Ce point est développé dans le **document 3** : des travaux récents montrent que les caractéristiques de la subduction jouent un rôle fondamental dans la capacité qu'à une suture à se rouvrir ou non lors d'un nouveau cycle orogénique.

Le schéma du **document 3** montre que, lorsque la subduction concerne un océan vaste (supérieur à 500 km) le manteau est appauvri par l'intense fusion partielle qui s'y déroule. Le manteau lithosphérique perd de sa ductilité et devient cassant et devient un lieu particulièrement favorable à une nouvelle ouverture. Alors qu'en revanche, lorsque l'océan qui disparaît par subduction est de petite taille (comme l'océan rhéique ou liguro-piémontais), la fusion partielle est beaucoup plus limitée (peu de magmatisme de subduction dans les Alpes), le manteau n'est donc pas appauvri, il reste fertile et ductile, moins fracturable par distension.

Corrigé des parcours « Tâche complexe »

Unité 1

> Éléments de correction

Le format attendu n'étant pas imposé, il peut prendre différentes formes, mais celle qui paraît la plus pertinente ici semble être celle d'un texte structuré en plusieurs paragraphes. On peut attendre une introduction et une conclusion.

Les élèves vont devoir faire preuve de pertinence et aller retrouver dans leurs connaissances antérieures la signification géologique des formations étudiées (mise en place d'un pluton, relations entre les roches dans les différentes lithosphères) et être capable de les placer de manière chronologique dans le temps.

Comme le texte introductif du document 1 et de l'arrêt 2 indique la localisation du découpage géographique des deux compartiments accolés (bloc nord au niveau de l'accident tectonique de Lalaye-Lubine), on s'attend juste ici à ce que les élèves cherchent à corrélérer les indices trouvés de part et d'autre de la faille afin de rechercher une histoire propre à chaque compartiment.

Les indices disponibles pour la région septentrionale sont les suivants. Au Nord de la faille, on trouve des formations sédimentaires s'étalant du Précambrien (doc. 1) au Mississipien (Carbonifère inférieur 326 Ma, doc. 3). Des formations magmatiques traversent ces sédiments, leur âge allant jusqu'à 325 Ma (pluton de Senones, doc. 1) à 312 Ma (granite et rhyolith de Natzwiller, doc. 3). Ces formations magmatiques sont des roches caractéristiques d'une zone de subduction (granodiorite, diorites, doc. 1) et de collision (granites, rhyolithes doc. 1 et 3). Les sédiments sont superposés stratigraphiquement « à l'envers » (doc. 1) ce qui laisse penser qu'ils ont été retournés ou que les plus anciens chevauchent les plus récents. L'une ou l'autre de ces hypothèses soulignent une activité tectonique antérieure à la mise en place des formations magmatiques (doc. 1 et 3). Dans cette zone septentrionale, il semble donc y avoir eu une subduction et une collision au Carbonifère supérieur dont les restes sont représentés par les magmas intercalés dans des sédiments de marge d'âges différents.

Au Sud, l'ensemble des formations correspond à des roches de la croûte continentale profonde (granites, gneiss, plutons, granulites, doc. 1 et 4), parfois écaillée jusqu'au manteau (doc. 4). Il n'y a pas de sédiments antérieurs à ceux de l'Ordovicien (doc. 1). La présence de la klippe montre le chevauchement d'un fond océanisé puisque du manteau serpentiniisé injecté de gabbros hydratés affleure avec des sédiments marins (doc. 2). L'absence d'autres traces d'océan peut permettre d'envisager qu'il existait une autre zone de subduction dans cette région, dont n'ont été préservés que les éléments des Klippes. Cette subduction est confirmée par l'existence d'un volcanisme au Carbonifère inférieur (Viséen, doc. 1). Ce bloc n'a pas eu la même histoire que l'autre.

Il est donc envisageable que ces deux entités se soient retrouvées accolées par le jeu de l'accident lithosphérique de Lalaye Lubine.

> Support pour l'autoévaluation

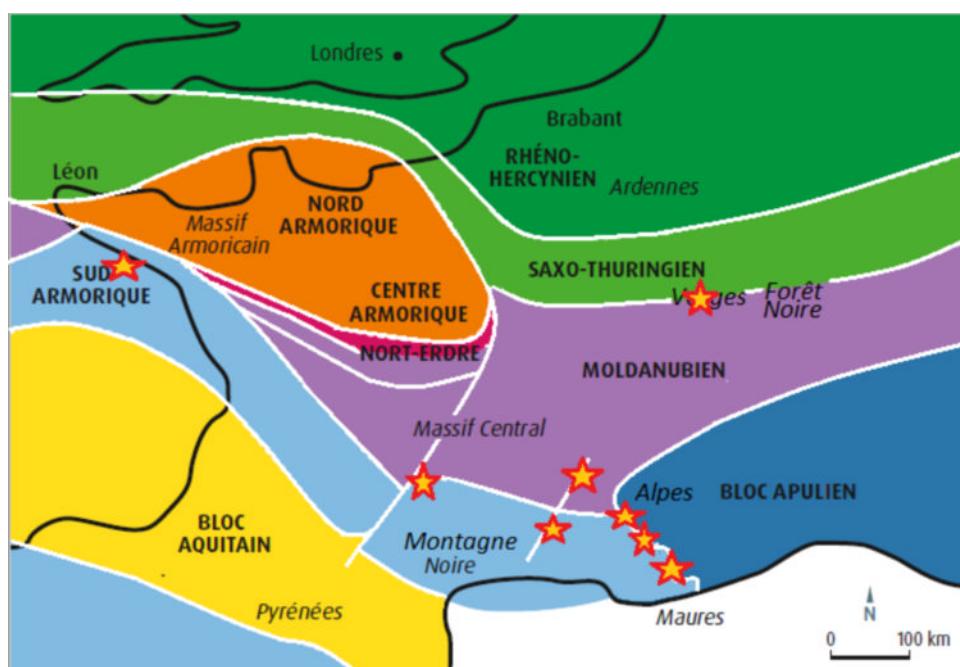
Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet soit du point de vue des connaissances, soit de point de vue de l'extraction d'informations des documents	Complet ou suffisant	
Communication	Non conforme	Le texte reprend une partie des éléments des documents	Le texte inclut toutes les notions présentées dans les documents en précisant les causes et les conséquences	Le texte est bien structuré, la syntaxe correcte, sans faute d'orthographe et fait référence aux documents explicitement

Unité 2

> Éléments de correction

Il est demandé ici de faire le bilan de la localisation des ophiolites présentes dans l'Hexagone à l'aide des informations (non exhaustives) des unités 1 et 2. L'élève doit travailler à partir des données des lithothèques qui s'enrichissent régulièrement. Certaines de ces données, non publiées à l'heure où nous avons bouclé le manuel, pourront ainsi enrichir la synthèse proposée ici.

La tâche complexe se déroule en deux parties. La première consiste en la localisation des ophiolites sur la carte (voir carte ci-dessous), la seconde à la justification que ces ophiolites sont des marqueurs de collision. On attend alors un court texte argumentatif.



Les données disponibles, montrent que l'on retrouve des restes de lithosphères océaniques à accrétion lente et plus rarement de lithosphère à accrétion rapide (séquences magmatiques peu épaisses). Elles ont des âges différents. Une partie de ces restes lithosphériques ont clairement été porté en profondeur par subduction (domaine des schistes bleus ou des éclogites), tandis que d'autres ne sont pas entrés en subduction. Elles sont toutes à l'affleurement et ont donc été exhumées, et sont accompagnées de sédiments océaniques. Certaines sont définies comme des lithosphères océaniques, d'autres de bassin d'arrière-arc. Ces informations montrent clairement qu'on a eu une convergence de blocs continentaux puisque ces restes se trouvent associés à des roches continentales

En ce qui concerne la localisation, certaines sont parfaitement à la frontière des limites de microcontinents, ce qui souligne la notion de suture, et elles sont associées à des ceintures orogéniques récentes (Alpes) ou anciennes (chaîne varisque).

Les élèves pourront proposer des explications à l'éloignement des ophiolites de Groix d'une zone suture à l'aide des connaissances de première sur les charriages lors des collisions.

> Support pour l'autoévaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet soit du point de vue des connaissances, soit de point de vue de l'extraction d'informations des documents	Complet ou suffisant	
Communication Carte complétée, texte argumenté	Non conforme	La carte est en partie complétée et/ou le texte reprend une partie des éléments des documents	La carte est complète et le texte inclut toutes les notions présentées dans les documents en précisant les structures formant les sutures et la phase orogénique	La carte précise le nom des sites étudiés, le texte est bien structuré, la syntaxe correcte, sans faute d'orthographe et fait référence aux documents explicitement

Unité 3

> Éléments de correction

On attend ici un texte structuré avec une introduction, une conclusion et des parties développant une idée par paragraphe. Des schémas sont demandés, ils peuvent le cas échéant remplacer le texte pour l'objectif notionnel. On attend que les notions soient indexées aux documents de l'unité.

Le texte doit montrer que :

- les ophiolites alpines sont des restes de lithosphère océanique à accrétion lente car il n'y a pas de croûte magmatique et l'on retrouve tous les éléments d'une lithosphère de type Atlantique : péridotite serpentiniisée, fusion partielle, magmatisme sporadique, faille de détachement, sédiment hydrothermaux et océaniques (doc. 2 et 3)

– les minéraux présents dans les roches montrent que les ophiolites du Chenaillet ont été obductées (domaine des schistes verts) alors que celles du Vison ont été portées en profondeur avant exhumation (domaine des éclogites) elles ont donc subi une subduction. Ceci montre de plus que l'orientation des contraintes a changé et que les compartiments convergent.

– les ophiolites affleurent au sein de formations sédimentaires qui ont le même âge que l'accrétion. Formations sédimentaires et ophiolites sont coincées entre deux blocs continentaux différents ce qui montre l'existence d'une collision (doc. 1).

> Support pour l'autoévaluation

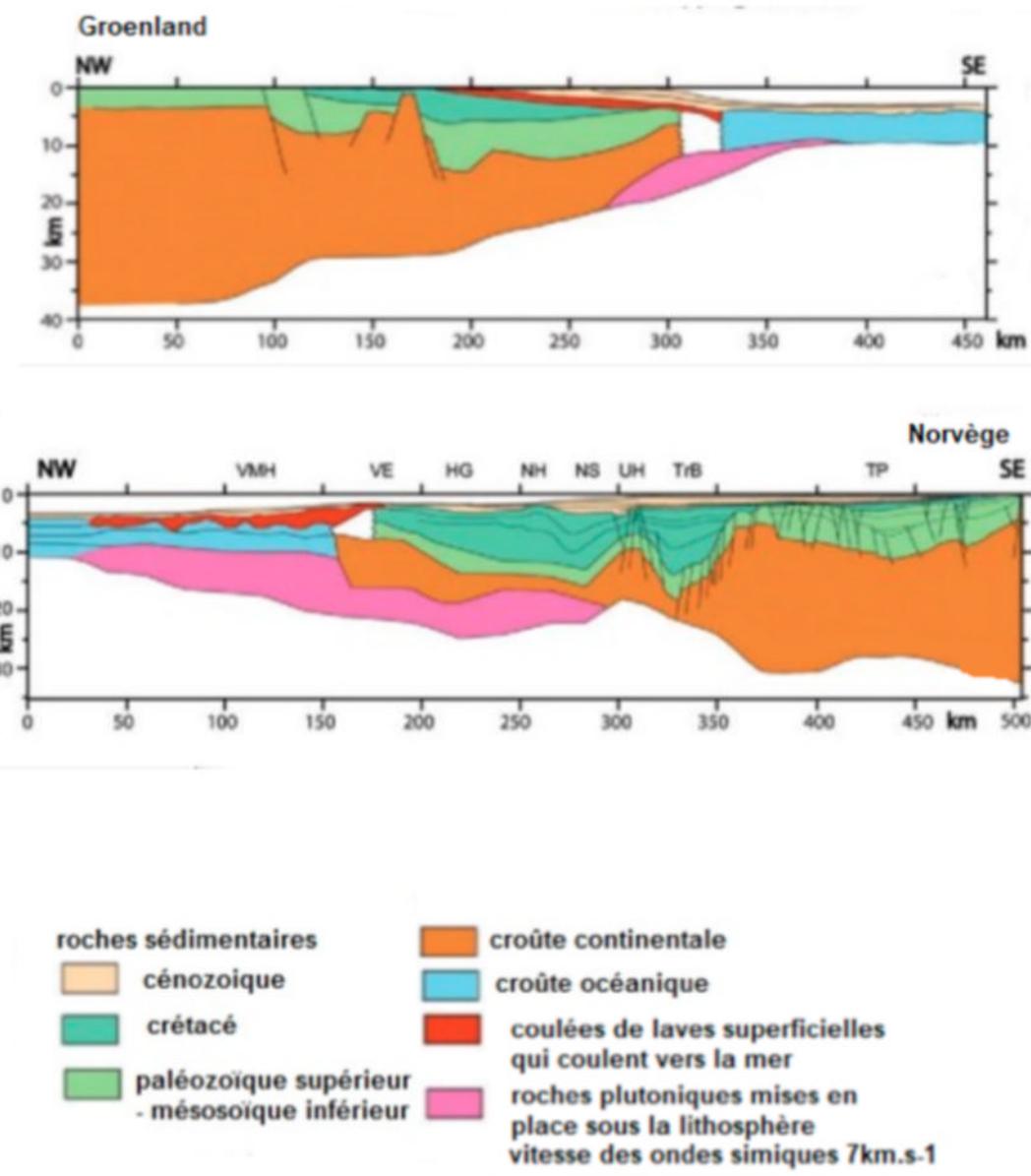
Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet soit du point de vue des connaissances, soit de point de vue de l'extraction d'informations des documents	Complet ou suffisant	
Communication	Non conforme	Le texte reprend une partie des éléments des documents Des schémas sont présents mais peu pertinents ou explicites	Les schémas sont pertinents et explicites Le texte inclut toutes les notions présentées dans les documents	Les schémas sont pertinents et correctement réalisés, le texte est bien structuré, la syntaxe correcte, sans faute d'orthographe et fait référence aux documents explicitement

Unité 4

> Éléments de correction

Pour mener à bien cette tâche complexe, il est nécessaire de réaliser un travail numérique qui apportera les informations complémentaires permettant la comparaison des différentes marges de part et d'autre de l'Atlantique.

L'interprétation de la structure de la marge A-A' est expliquée dans le doc. 2 p. 172. Celle de la marge B-B' est expliqué par le document d'aide présenté dans le protocole de l'activité numérique et reproduit ci-dessous. Ce document illustre les marges magmatiques associées aux flux mantelliques ascendants qui induisent un volcanisme aérien (rouge) et un plutonisme sous la croûte continentale amincie (rose). La marge C-C' est interprétée doc. 4 p. 173



Grâce aux informations récoltées, on peut conclure :

- les marges fonctionnent par deux : elles sont qualifiées de marges conjuguées, c'est-à-dire qu'elles ont une origine commune liée à leur principe de fragmentation (doc. 2 à 4) ;
- certaines marges montrent un volcanisme pendant la phase d'étirement, lié aux flux mantelliques ascendants (activité numérique) ; d'autres sont uniquement le résultat d'une divergence (doc. 3) ;
- on trouve tout au long de la côte de l'océan Atlantique une succession de marges dont la polarité de déchirure est alternée (plaques supérieure/inférieure, doc. 4).
- la répartition des marges de part et d'autre d'un océan est hétérogène et les mécanismes à l'origine de la formation de ces marges conduisent à des marges asymétriques.

> Support pour l'autoévaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet soit du point de vue des connaissances, soit de point de vue de l'extraction d'informations des documents	Complet ou suffisant	
Communication	Non conforme	Le texte reprend une partie des éléments des documents	Le texte inclut toutes les notions présentées dans les documents	Le texte est bien structuré, la syntaxe correcte, sans faute d'orthographe et fait référence aux documents explicitement

Unité 5

> Éléments de correction

Le format attendu est un diaporama. Il devra être richement illustré et ne présenter que le texte nécessaire à la compréhension des images. On attend quelques phrases d'introduction et de conclusion, succinctes et avec les mots clefs essentiels. On attend enfin une structuration logique du diaporama, qui peut apparaître dans les titres des diapositives.

Le diaporama doit montrer à l'aide des doc. 1 à 4 que la région est faillée, avec une dépression centrale qui montre un amincissement crustal. La présence d'éléments basculés montre qu'on est dans une zone divergente car les failles jouent avec un jeu normal. La présence de volcanisme permet aussi de montrer une remontée du manteau.

Le doc. 4 montre que les Vosges auraient pu devenir une marge « base de plaque », limitée par la faille de détachement (faille Vosgienne) qui découpe le fossé et entraîne avec elle les collines sous vosgiennes et la plaine d'Alsace. Si son évolution s'était poursuivie, le fossé alsacien serait donc devenu une marge type « surface de plaque ».

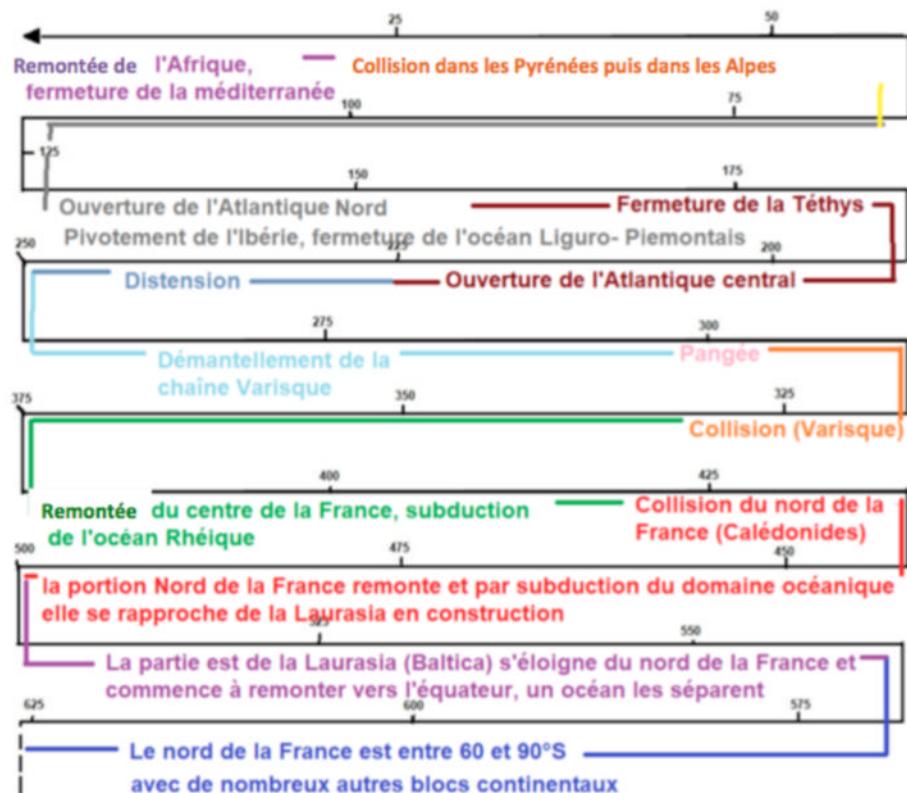
> Support pour l'autoévaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet soit du point de vue des connaissances, soit de point de vue de l'extraction d'informations des documents	Complet ou suffisant	
Communication	Non conforme	Les diapositives reprennent une partie des éléments des documents Ou/et elles contiennent trop de texte	Les diapositives traitent de toutes les notions présentées dans les documents mais il y a trop de texte	Diapositives précises et non surchargées, correctement illustrées faisant explicitement référence aux documents

Unité 6

> Éléments de correction

On s'attend à voir énoncées différentes étapes clefs de la structuration du territoire de la France métropolitaine. Ces événements doivent être situés les uns par rapport aux autres. On n'attend pas une parfaite complétude, mais que l'élève ait repéré la migration latitudinale des blocs crustaux, les périodes d'ouverture, de fermeture et de collision.



> Support pour l'autoévaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet soit du point de vue des connaissances, soit de point de vue de l'extraction d'informations des documents		Complet ou suffisant
Communication Frise chronologique	Non conforme	La frise ne prend pas en compte le temps ou la chronologie n'est pas respectée ; et la frise n'est pas suffisamment renseignée	La frise contient une grande partie des informations contenue dans les documents, la chronologie est respectée	La frise est correcte (chronologie, échelle de temps régulière) et elle est bien renseignée

Propositions corrigées de parcours « Pas-à-pas »

Unité 1

Question 1.

Sous forme d'un tableau à double entrée, déterminez grâce à vos connaissances et aux informations contenues dans les légendes la nature, l'origine géologiques et les conditions géodynamiques, liées à leur formation initiale et à leur évolution ultérieure, des roches exposées dans les documents de cette double page.

Roche étudiée	Nature	Origine géologique	Conditions de formation initiale	Conditions de transformation ultérieure
Schistes de Villé	Métamorphique	Argiles marine	Dépôts littoraux	Métamorphisme de basse pression et basse température en contexte hydraté puis exhumation par collision
Gneiss de Lièpvre	Métamorphique	Croûte continentale profonde	Conditions de pression et de température importante mais inférieures au solidus du granite	Exhumation par faille
Pluton de Senones	Magmatique	Fusion partielle de la croûte profonde de la portion de lithosphère chevauchante lors d'une collision	Conditions de température et de pression supérieures au solidus des roches de la croûte profonde (gneiss probablement)	Exhumation et érosion en boule
Sédiments marins du Thalhorn	Sédiments	Origine marine sans doute assez profonde puisqu'ils recouvrent la lithosphère océanique	Dépôt dans un bassin océanisé	Exhumation et chevauchement
Péridotites du Thalhorn	Roche ignée métamorphisée	Manteau hydraté et serpentinisé dans des conditions de basse pression et basse température	Exhumation de manteau dans un contexte d'expansion lent à faible magmatisme	Exhumation sans transformation par chevauchement
Phtanite de Fouday	Sédimentaire	Marine	Dépôt marin	Exhumation
Cornéennes de Fouday	Métamorphique	Sédimentaire	Métamorphisme de contact haute température basse pression	Exhumation

Roche étudiée	Nature	Origine géologique	Conditions de formation initiale	Conditions de transformation ultérieure
Rhyolithe de Fouday	Magmatique acide	Filon associé à un granite	Refroidissement rapide dans une cheminée qui traverse des sédiments	Exhumation
Granulites du col des Bagenelles	Métamorphique	Restite de la base de la croûte continentale	Fracturation	Exhumation par écaillage lithosphérique lors d'une collision
Péridotite serpentiniisée du col des Bagenelles	Roche ignée métamorphisée	Manteau lithosphérique sous continental	Fracturation et hydratation	Exhumation par écaillage lithosphérique lors d'une collision

Question 2.

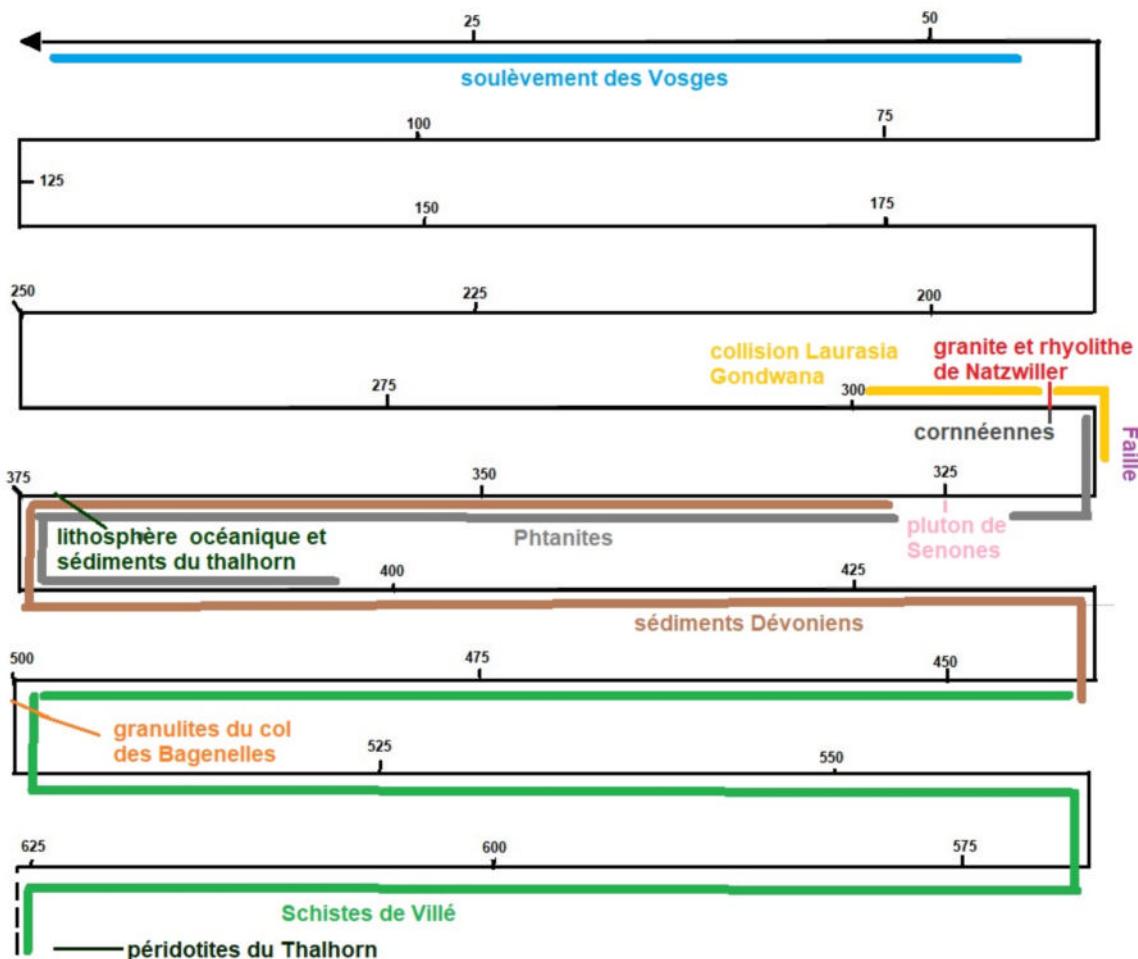
À partir de vos connaissances sur les principes de datation relative et des données de l'unité, reconstituez l'histoire des roches présentées doc. 1.

Les roches les plus anciennes sont les schistes de Villé. Ils reposent sur des roches d'âge dévonien (marron) qui sont donc plus jeunes, mais ces dernières sont en position inverse, donc on envisage le principe de superposition suivi d'un retournement de l'ensemble. Le granite de Senones traverse ces roches retournées donc il est plus récent (principe de recouplement). Toutes ces manifestations sont recoupées par la faille qui met en contact un gneiss avec ces roches. La faille est plus récente que le gneiss et les formations précédentes.

La chronologie relative est donc la suivante : 1. dépôts des schistes de Villé ; 2. dépôt des roches dévonniennes ; 3. retournement des roches par un phénomène tectonique ; 4. intrusion plutonique ; 5. faille. Le seul élément non dateable est le gneiss, mais il s'agit de croûte profonde donc antérieure à la faille.

Question 3.

Réalisez une frise chronologique afin d'y situer la date ou la période de mise en place de ces formations géologiques.



Question 4.

À partir des données recueillies et de vos connaissances sur la structure, la composition et le comportement de la lithosphère face aux contraintes géodynamiques, trouvez les arguments permettant de justifier que les Vosges sont constituées par l'accolement de deux portions de lithosphères différentes au niveau de la faille Lalaye-Lubine.

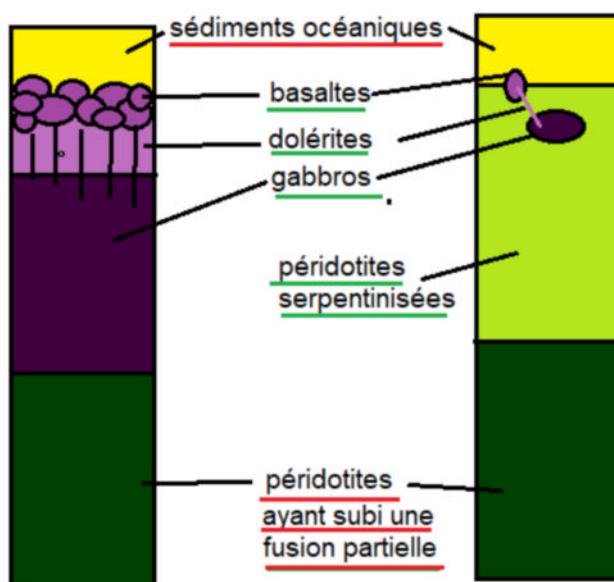
Au sud de la faille, on observe de nombreuses roches correspondant à de la lithosphère continentale profonde (gneiss, granulites et péridotites sous-continentales). Elles sont chevauchées par la klippe du Thalhorn qui correspond au reste préservé d'un petit bassin océanisé dont la majeure partie a disparu par subduction. On ne retrouve pas de sédiments antérieurs à l'Ordovicien et le magmatisme est plus récent (Viséen). Au nord de la faille, le magmatisme est d'âge Carbonifère supérieur et on trouve des sédiments très anciens (Précambrien terminal/Cambrien inférieur). On voit donc que les deux entités géologiques séparées par la faille de Lalaye-Lubine n'ont pas la même histoire et que l'accident met en contact par coulissemement des roches de lithosphères probablement très différentes. Sachant que la collision qui a donné naissance à la Pangée est le résultat de la collision de deux mégaccontinents – Laurasia au nord et Gondwana au sud – on peut envisager que la partie nord des Vosges peut être associée à des éléments de lithosphère de la Laurasia et la partie sud à des éléments appartenant au Gondwana.

Unité 2

Question 1.

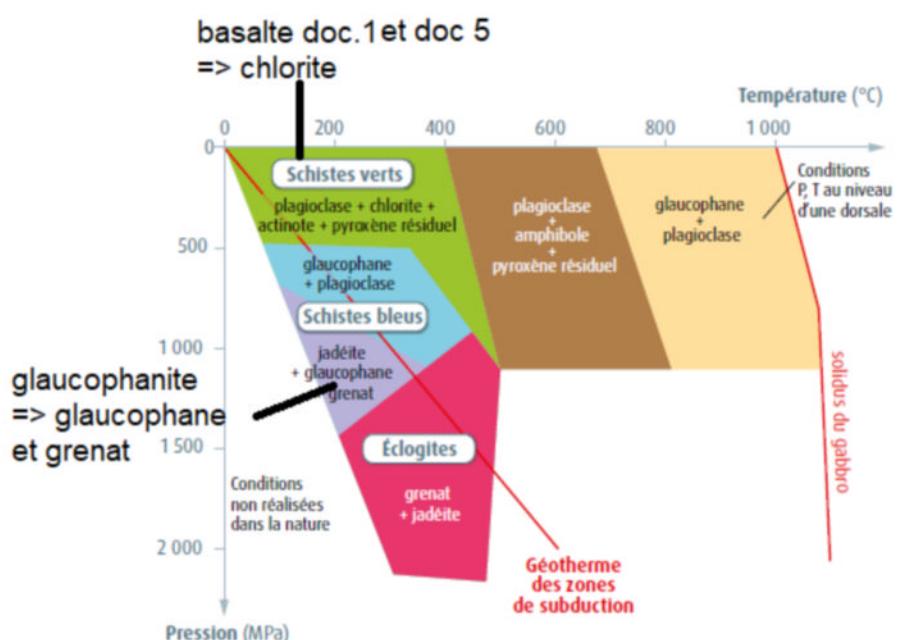
À partir des données des doc. 1 et 2, et de vos connaissances, représentez sous forme d'un schéma légendé l'organisation d'une lithosphère océanique à accrétion lente et celle d'une lithosphère océanique à accrétion rapide. Puis soulignez en rouge les légendes des éléments que l'on retrouve systématiquement dans une ophiolite et soulignez en vert ceux qui sont « facultatifs ».

Lithosphère à accrétion rapide Lithosphère à accrétion lente



Question 2.

En justifiant vos réponses, localisez dans le diagraphe de stabilité du doc. 3, les basaltes (doc. 1 et 5) et la glaucophanite (doc. 5).



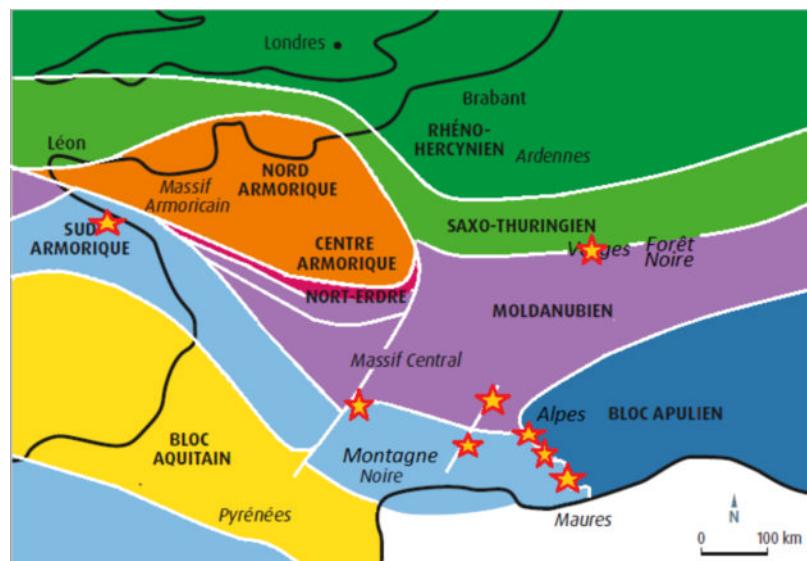
Question 3.

Réalisez l'activité numérique proposée (doc.4) afin de faire l'étude de l'ophiolite de Najac.

Site	Âge (Ma)	Nature des roches rencontrées	Domaine du métamorphisme atteint et minéraux caractéristiques	Conclusions possibles sur le type de lithosphère océanique et sur l'évolution métamorphique qu'elle a subie
Najac	485-443	<ul style="list-style-type: none"> • Boules (pillows ?) • Gabbros • Péridotite serpentinisée 	<ul style="list-style-type: none"> • Arrêt 1 et 2 : éclogite à grenats et glaucophane (amphibole) • Arrêt 3 : facies des schistes verts (amphibole chlorite, pyroxène) • Arrêt 4 : hydratation de la péridotite 	Lithosphère océanique magmatique probablement à accrétion rapide car présence de basaltes et gabbros, hydratée (chlorites, amphiboles) et entraînée en subduction assez profondément (grenats)

Question 4.

Situez sur la carte du doc. 6 les ophiolites étudiées dans les deux unités ainsi que dans le doc. 4 et mettez en relation les informations afin de justifier que les ophiolites sont des indicateurs de l'emplacement des sutures orogéniques.



Les ophiolites se situent majoritairement à la limite entre deux blocs crustaux. Certaines sont toutefois observables dans les plaques, et peuvent être interprétées comme le résultat de la fermeture d'un bassin océanisé intraplaque (pull apart, bassin d'arrière-arc, ou au résultat d'un charriage de nappes suite à la collision).

Unité 3

Question 1.

À l'aide des informations disponibles dans le doc.1 et de vos connaissances, trouvez les arguments permettant de justifier que les Alpes sont une suture orogénique.

Les Alpes correspondent à un relief formé par la collision de la plaque apulienne et de la plaque européenne. Cette collision met en contact deux marges continentales (socle, hauts topographiques et sédiments marin) et piège des formations caractéristiques d'une lithosphère océanique : sédiments océaniques et ophiolites. Les Alpes sont bien une suture orogénique car elles sont associées à des roches de nature, d'histoire et d'âge différents.

Question 2.

Recherchez dans le doc. 2 les indices permettant de conclure que le massif du Chenaillet est une ophiolite dont l'origine est une lithosphère océanique de type accrétion lente qui n'est pas entrée en subduction.

C'est une ophiolite issue d'une lithosphère océanique à accrétion lente car on observe peu de roches magmatiques. La serpentinitisation et la présence de chlorite et d'actinote dans les gabbros montre que la lithosphère est mature et hydratée. Comme elle est hydratée, elle n'est donc pas entrée en subduction, car la chlorite et l'actinote ne sont pas stables à haute pression.

Question 3.

Recherchez dans le doc. 3 les indices permettant de conclure que les ophiolites du Viso ont été entraînées en subduction avant d'être remontées très rapidement à la surface.

La présence de glaucophane, de grenat et de jadéite dans les roches rencontrées au mont Viso permet de conclure qu'elles ont atteint des pressions telles que celle que l'on peut trouver dans le manteau. Les transformations métamorphiques sont des phénomènes lents et progressifs qui peuvent être en partie inversés si les conditions physiques reviennent progressivement dans leur état initial. Ici, les roches sont restées dans les domaines du métamorphisme dans lequel elles ont été portées. L'exhumation a donc été trop rapide pour que le métamorphisme disparaîtse.

Question 4.

Expliquez simplement le phénomène d'obduction et d'exhumation d'ophiolites à partir des données du doc. 4. Attribuez à chaque mécanisme un exemple alpin et un exemple issu des données des deux unités précédentes.

L'obduction correspond à la mise en place par chevauchement de fragments de lithosphère océanique. Elle concerne ici le Chenaillet et elle a dû se dérouler de la même manière lors de la mise en place de la klippe du Thalhorn (voir unité 1).

La mise en place d'ophiolites exhumées après subduction correspond à un écaillage de la lithosphère plongeante et à la remontée des écailles vers la surface (rapidement) lors de la collision. L'exemple alpin est le mont Viso. L'ophiolite de Groix présente un métamorphisme haute pression et basse température.

Unité 4

Question 1.

En vous appuyant sur les données des doc. 1 et 2, trouvez tous les arguments permettant d'affirmer que les marges conjuguées ne sont pas symétriques.

Sur le doc. 1, on observe que la bordure des continents (plateforme continentale, en rose) ne présente pas la même largeur partout. Certaines zones (sud de l'Amérique du Sud par exemple) présentent une plateforme continentale très vaste tandis que les plateformes conjuguées qui leur correspondent sont très étroites (Afrique du Sud par exemple).

Sur le doc. 2, on distingue qu'au niveau de la marge de Galice (pourtant du même côté de l'Atlantique que l'Afrique du Sud) présente une vaste zone (200 km) de croûte amincie alors que ce domaine aminci est très étroit au niveau de Terre-Neuve (50 km). De plus, le passage entre le domaine aminci et domaine hyper-tendu est brutal au niveau de Terre-Neuve, tandis qu'il est très progressif au niveau de la Galice.

Les bassins sédimentaires à la surface des domaines amincis et hyper-étendus n'ont pas la même structure ni la même profondeur, ils ne doivent donc pas recueillir une sédimentation identique.

La faille de détachement qui sépare les deux unités continentales passe à la surface de la marge de Galice et s'enfonce sous la marge de Terre-Neuve.

La zone de manteau exhumé est plus vaste au niveau de la marge de Galice.

Les deux marges ne sont donc pas symétriques.

Question 2.

Après avoir redéfini la notion de lithosphère, montez que, lors de la divergence, la croûte mais aussi le manteau sont concernés par l'amincissemnt de la lithosphère (doc. 3).

Rappelons qu'une lithosphère est définie comme l'association, à la superficie de la Terre, d'une portion de manteau recouverte de roches diverses (métamorphiques, magmatiques ou sédimentaires) qui se déplace à la surface du manteau, notamment de sa portion la plus ductile, l'asthénosphère.

Dans le doc. 3 :

- (1) On observe que les failles touchent à la fois la croûte supérieure cassante mais aussi la zone de contact entre la croûte et le manteau.
- (2) Pendant la phase d'amincissemnt de la croûte – qui est marquée par le pivotement des blocs de la croûte supérieure cassante par le jeu des failles listriques et par l'étirement de la croûte moyenne ductile – on observe, en profondeur, l'écaillage de lentilles de croûte basale et de manteau sous continental supérieur.
- (3) De même que les blocs de croûte cassants en surface, ces écailles se déplacent vers la zone d'extension. Le manteau sous-continental lithosphérique est hyper-étiré puis se rompt.

Question 3.

Montrez (doc. 3) que les fluides, qu'ils soient d'origine météorique ou profonde, ont un rôle important dans les phénomènes mécaniques impliqués dans la rupture lithosphérique.

La pluie, l'eau de mer, ou l'eau provenant de certaines réactions métamorphiques s'infiltra par le biais des failles à l'intérieur de la croûte et du manteau. Elle hydrate les minéraux des roches, les transformant en minéraux plus plats (comme la serpentine) et donc plus facilement déplaçables les uns par rapport aux autres. Ces minéraux constituent des « couches savons » qui facilitent le déplacement des blocs crustaux ou mantelliques les uns par rapport aux autres. L'eau abaisse par ailleurs le point de fusion des roches, qui peuvent ainsi subir une fusion très partielle, l'origine d'un comportement plus ductile qui favorise leur étirement.

Question 4.

Sous forme d'un court texte qui exploitera les informations de tous les documents associées à vos connaissances de première, expliquez comment se forme une marge conjuguée

Une marge conjuguée correspond aux deux bordures d'un continent (doc. 1 et 4) qui s'est fracturé à la suite de tensions liées à la divergence des portions de lithosphère ou à la suite des remontées mantelliques (activité numérique). Ces deux modes de fracturation sont liés au brassage convectif du manteau (connaissances de première). La lithosphère continentale (croûte continentale et manteau subcontinental) est étirée et des failles listriques fracturent la croûte et le manteau. Les blocs de croûte et de manteau cassants dissociés pivotent/se déplacent, et les portions plus ductiles se distendent afin d'accompagner l'étirement. Lorsque les blocs crustaux sont suffisamment étirés, le manteau subcontinental s'étire à son tour jusqu'à la rupture et à la séparation des deux marges.

Unité 5

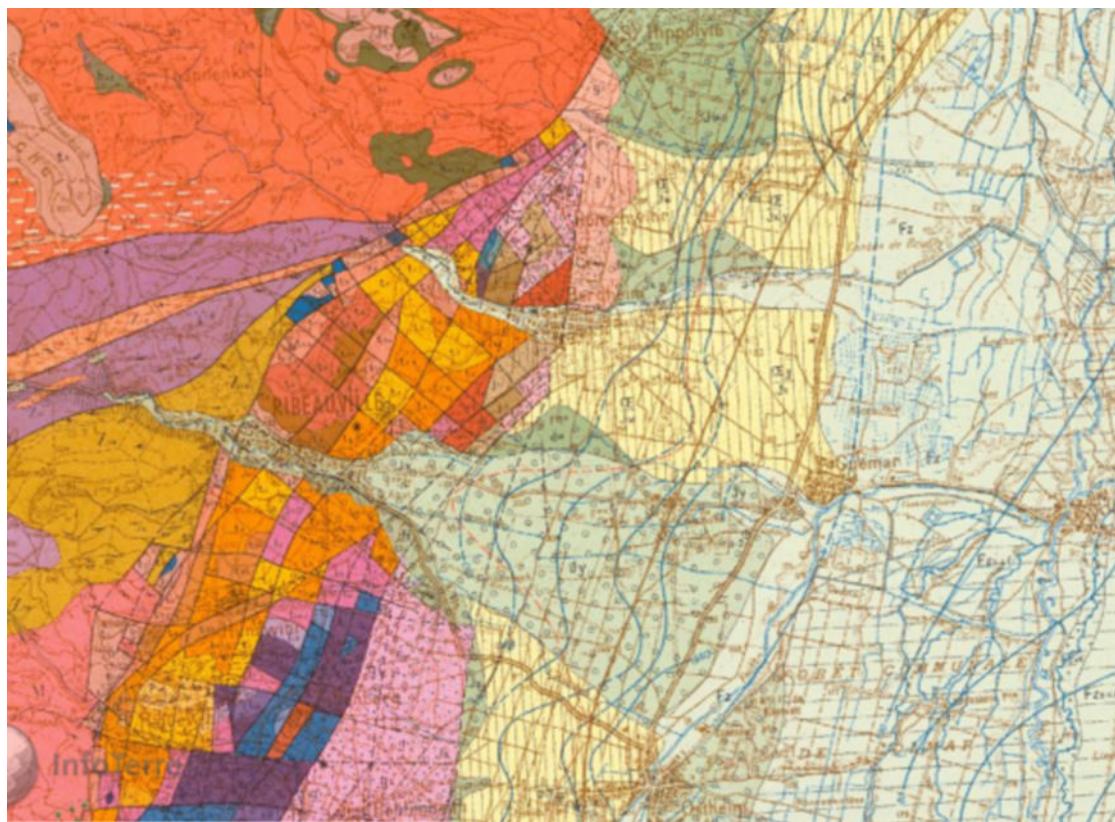
Question 1.

Réalisez l'activité numérique afin d'expliquer l'origine de la topographie présentée doc. 1.

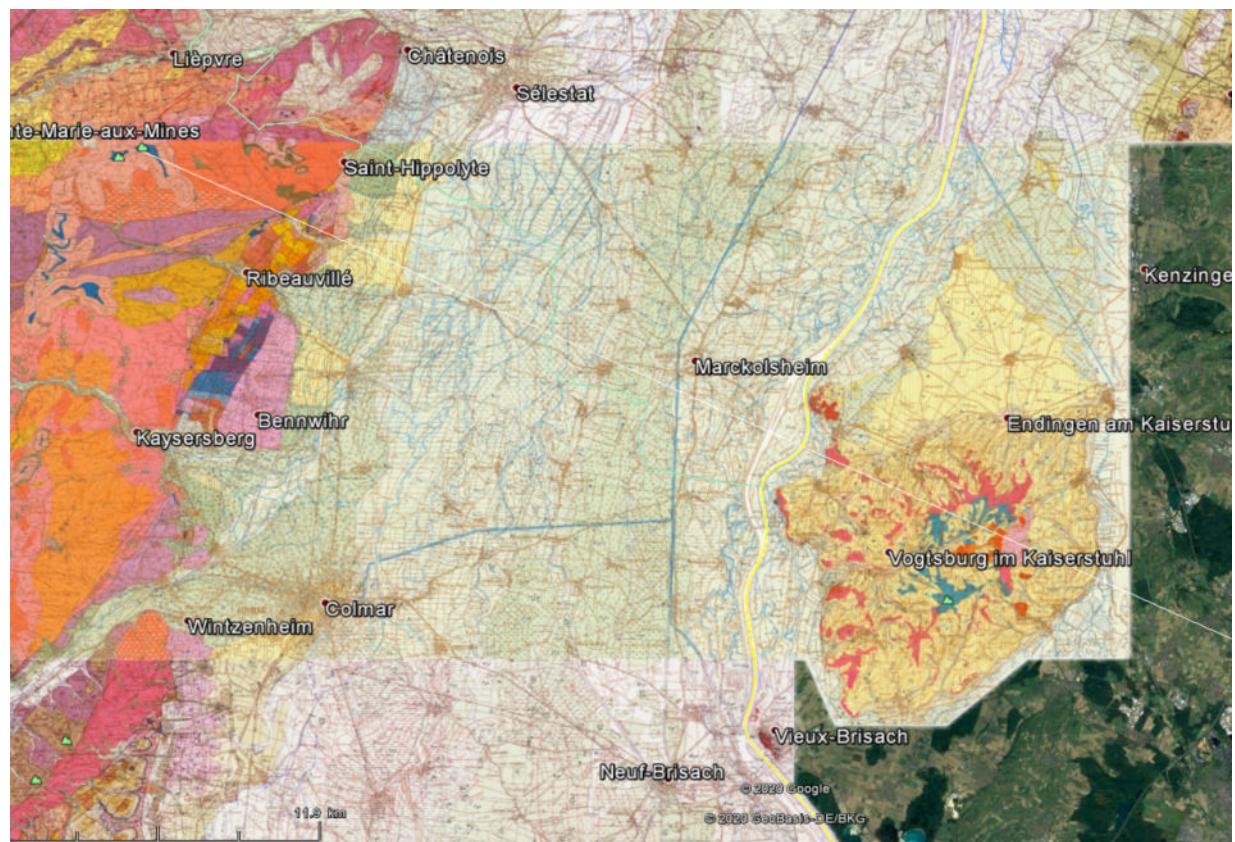
Voici les légendes attendues pour le profil topographique sous Google Earth :



La carte géologique ci-dessous (BRGM, extrait de la carte de Sélestat) montre la structure en touches de piano que forment les blocs basculés déplacés par les phénomènes d'extension crustale.

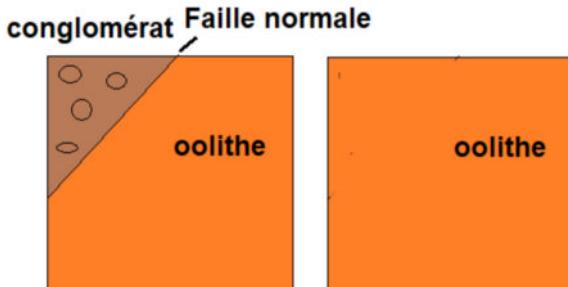


La carte géologique ci-dessous (BRGM, extrait de la carte de Sélestat) permet de localiser le Kaiserstuhl.



Question 2.

Représentez sous forme schématique l'affleurement photographié dans le doc. 2 puis, en utilisant les mêmes types de figurés, représentez sous forme schématique cet affleurement il y a 40 Ma.



Question 3.

Expliquez ce que sont les collines sous-vosgiennes limités par les deux failles représentées sur le doc. 3 et, à l'aide du doc. 4, proposez une origine à leur structure en « touches de piano »

Ce sont des blocs basculés le long de failles normales. Le système de divergence ne leur permet pas de s'enfoncer tous de la même manière. On voit que la couche de grès triasiques en violet est plus profonde dans le premier bloc à droite de la faille (Vosgienne) alors que dans le second bloc le grès est en surface. Cet enfouissement différentiel est responsable de la structure en « touches de piano ».

Question 4.

En vous appuyant sur les données du doc. 5 et du doc. 4 de l'unité 4, interprétez les trois profils présentés dans le doc. 3 et justifiez que les deux premiers sont des rifts avortés.

Au Nord du fossé rhénan, on observe un effondrement central et un amincissement de la croûte sous le bassin de Mayence lié à une faille de détachement qui plonge vers l'Ouest. Au niveau de la plaine d'Alsace, on retrouve cet amincissement ainsi qu'une faille de détachement qui plonge vers l'Est. Au niveau du Languedoc, seul un seul morceau de la marge est observable ainsi que la faille de détachement qui l'a séparée du reste de la marge conjuguée. Dans le nord du système de fossés oligocènes, on retrouve les structures typiques des marges conjuguées avant leur phase d'étirement alors que dans le sud de ce système, la marge est bien différenciée et en bord de mer. Dans le Nord, les contraintes distensives qui auraient pu donner une marge semblable à celle du Languedoc ne se sont pas poursuivies. On a donc bien des rifts avortés.

Unité 6

Question 1.

Réalisez l'activité numérique proposée (doc. 1). Comparez la façon dont les lithosphères augmentent leur surface, puis justifiez que les lithosphères continentales résultent de l'amalgame de blocs continentaux.

Les lithosphères océaniques croissent de manière symétrique par leur « centre », qui correspond à l'axe de la zone d'accrétion. Les lithosphères continentales croissent de manière concentrique par

ajout de matériel plus jeune à la périphérie. Ainsi, la lithosphère constituant l'Afrique est composée d'au moins deux zones en violet foncé qui sont des portions très âgées (3-4 Ga) qui ont grandi par leur périphérie.

Question 2.

Dans l'unité 1, une suture a été étudiée dans les Vosges. Recherchez dans le doc. 2 dans quelle(s) carte(s) paléogéographique(s) la suture s'est mise en place et justifiez votre choix.

Le volcanisme des Vosges du Nord est d'âge dévonien. Sur à la carte 400 Ma (doc. 2), on voit qu'il est contemporain d'une période où le centre territoire correspondant à la France remonte et où l'océan qui le sépare de la partie nord du territoire se ferme. Le stade collision correspond à la carte 300 Ma : on distingue clairement que le territoire français est localisé au sein d'une chaîne de montagnes. L'océan a donc disparu et l'écaillage crustal a eu lieu.

Question 3.

À partir de vos connaissances sur l'accrétion océanique et le mouvement des plaques, proposez un scénario décrivant l'évolution future du bassin méditerranéen. Justifiez votre réponse.

On observe que le vaste espace océanique situé entre le Gondwana/Afrique et le sud de l'Eurasie diminue depuis le Carbonifère terminal. L'Afrique (en raison de la croissance de l'Atlantique) pivote et remonte vers le Nord. Il paraît logique que la Méditerranée poursuive sa disparition (déjà entamée au niveau des zones de subduction en Italie et en Grèce) et que l'Afrique entre en collision avec l'Eurasie.

Question 4.

À partir de vos connaissances et des données du doc. 3, expliquez pourquoi toutes les sutures orogéniques ne peuvent pas se rouvrir lors d'un changement d'orientation des contraintes tectoniques.

Lorsque l'océan qui disparaît par subduction est vaste, la péridotite mantellique des zones de subduction est très appauvrie à cause de l'important magmatisme que la subduction produit. La péridotite appauvrie est plus rigide et casse préférentiellement. Dans le cas d'un océan de petite taille, la péridotite qui n'a pas subi une forte fusion partielle, elle peut donc encore en partie fondre et être ainsi plus ductile et moins cassante.

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

Je vois que	Je sais que	J'en déduit que
Doc. 1. Oman se situe au cœur d'une zone convergente où la plaque arabe, qui remonte vers le Nord, entre en collision avec la plaque eurasiatique	<ul style="list-style-type: none"> Dans les zones de convergence, il est possible d'avoir une subduction et une obduction de compartiments lithosphériques 	Oman est peut être un élément ayant subi de telles contraintes
Doc. 2 à 4. L'affleurement d'Oman est une succession verticale de roches magmatiques (doc. 4) reposant sur une semelle péridotitique mantellique (doc. 3 et 4). L'ensemble repose sur des gneiss et granites. Le contact entre la péridotite et le manteau est mylonitisé.	<ul style="list-style-type: none"> Une association pillows lavas/ filons / gabbro et péridotite correspond à de la lithosphère océanique. Des gneiss et des granites correspondent à des roches de la croûte continentale profonde. La présence de mylonite souligne une discordance entre deux compartiments de nature différente qui ont coulissé l'un par rapport à l'autre 	La présence de lithosphère océanique sur de la lithosphère continentale est nécessairement le résultat d'une obduction.

Conclusion

Oman est une ophiolite, c'est-à-dire une portion de lithosphère océanique portée par obduction sur de la croûte continentale. Cette obduction est liée à la collision de la plaque arabe avec l'Eurasie

Exercice 3

Je vois que	Je sais que	J'en déduit que
Doc. 1 Les Ardennes sont situées au nord-est de la France, en périphérie des vieux reliefs comme les Vosges	Les vieux massifs sont d'âge hercynien, ils se sont formés lors de la mise en place de la Pangée au Carbonifère.	Si les Ardennes font partie de la suture, elles correspondent à des roches situées à la périphérie de la chaîne varisque.
Doc. 3 Dans le massif ardennais on trouve des roches sédimentaires (argiles) déposées sur les bordures d'une marge passive et injectées par des dolérites	<ul style="list-style-type: none"> Les roches filonniennes sont des laves mises en place grâce à l'apparition d'une faille donc d'une activité tectonique. Les sédiments argileux proviennent de l'altération d'un continent et se déposent sur une marge passive qui est la bordure d'un océan constituée de blocs basculés limités par des failles 	Les Ardennes correspondent aux restes d'une marge passive. Elles sont donc la bordure d'un océan qui a disparu. Cette marge passive était encore tectoniquement active au Dévonien.
Doc. 4 Au Cap Lizard, en Angleterre, on trouve des gabbros des périclites et des basaltes d'âge Dévonien. On distingue bien des cristaux de feldspath et des cristaux de pyroxène altérés dans les gabbros	<ul style="list-style-type: none"> Ces roches sont caractéristiques d'une ophiolite. Les gabbros ne présentent pas de transformation métamorphique de haute pression L'ophiolite n'est pas entrée en subduction. 	Au cap Lizard, on trouve une ophiolite, reste de l'océan datant du Dévonien. Cette ophiolite portée sur le continent Laurasia par obduction.
Doc. 2 <ul style="list-style-type: none"> La carte paléogéographique indique qu'au Dévonien, les Ardennes sont localisées sur la bordure de l'océan rhéno-hercynien et le cap Lizard sur un continent appelé Laurasie. Ce continent converge vers un autre (le Gondwana) qui remonte vers le Nord. Le Gondwana a une marge passive très étirée, avec des blocs continentaux qui donneront les autres parties du territoire français : Bretagne et sud de la France. Si l'on soude les deux bords de l'océan, on distingue la géographie actuelle de la France et de l'Angleterre 	Les marges passives sont constituées de fragments continentaux étirés qui sont solidaires de la plaque à laquelle ils appartiennent et se déplacent en même temps. Ils ont en bordure d'une lithosphère océanique.	Les Ardennes et les affleurements du cap Lizard sont la suture de l'océan Rhéno-hercynien

Conclusion : Les Ardennes étaient bien une marge de l'océan rhéno-hercynien disparu.

Exercice 4

Le Groenland et l'Amérique du Nord sont entrés en collision avec l'Afrique occidentale formant la partie centre-ouest de Pangea Proxima.

La Floride et le sud-est des États-Unis sont entrés en collision avec le sud-ouest de l'Afrique.

Tout ce qui reste de l'océan Atlantique est une mer étroite.

La pointe sud de l'Amérique du Sud est en contact avec l'Indonésie, ce qui a fermé l'Océan indien.

Le nord-est et la marge est du sud de l'Amérique est entré en collision avec l'Afrique du Sud et l'Antarctique oriental formant la partie sud-ouest de Pangea Proxima.

La mer Méditerranée est complètement fermée.

Exercice 5

Je vois que	Je sais que	J'en déduit que
<ul style="list-style-type: none">• Le massif du Chenaillot est constitué de périclites serpentiniisées injectées de gabbros, recouvert par des basaltes en coussins• Il est situé à 2600 mètres d'altitude• Les roches sont dans le domaine des schistes verts	<ul style="list-style-type: none">• Des péridotites serpentiniisées injectées de gabbros sont les constituants de la lithosphère océanique à faible vitesse d'accréation• La présence de roches océaniques dans les reliefs montagneux est le signe d'une collision• Le domaine du métamorphisme indique que les ophiolites du Chenailler ne sont pas rentrées en subduction	L'ophiolite du Chenaillot est issue d'une dorsale à accréation lente ayant subi une obduction
La reconstitution place le Chenaillot au niveau d'un océan (océan liguro-piémontais), au bord de la marge passive de l'Europe constituée d'un haut topographique qui correspond au Briançonnais.	Au niveau de la marge de Galice, la lithosphère océanique est constituée de manteau hyper-étiré et de gabbros injectés qui apparaissent au niveau des blocs basculés et des hauts topographiques de la marge.	La reconstitution est tout à fait cohérente avec la réalité d'une marge.

Conclusion : Un océan de petite taille s'est mis en place entre l'Apulie et la plaque européenne en générant des marges étirées (comme le Briançonnais). Cet océan n'avait pas un taux d'accréation élevé puisqu'on ne trouve pas de croûte magmatique type océan Pacifique dans cette ophiolite. Lors des changements de direction des contraintes tectoniques, l'océan est rentré en subduction sauf le lambeau du Chenaillot qui est entré en obduction sur le haut topographique de la marge (Briançonnais) sur lequel il culmine toujours aujourd'hui.

Exercice 6

- Dans les sutures orogéniques, on trouve des roches océaniques (bordure de marge passive et sédiments), des roches continentales (roches plissées, croûte profonde, gneiss, granites, etc.) et des roches du manteau.
- L'âge des roches est très varié :
 - les roches océaniques de la lithosphère ont des âges croissants depuis l'axe de la dorsale vers la bordure de la marge ; les sédiments qui recouvrent les marges sont diachrones (anté-tectoniques, syntectoniques, post-tectoniques). On trouve des éléments de lithosphère océanique (sédiments compris) ayant été portés en subduction puis exhumés, ou bien ayant subi une obduction ;
 - les roches continentales ont subi une succession d'événements depuis la formation des premiers continents, notamment liés au métamorphisme.
- La collision de deux continents associera donc des roches d'âges différents et ayant une histoire différente.
- La dynamique de la lithosphère à l'origine de ces associations est une convergence entre des plaques, qui débute souvent par la disparition de la lithosphère océanique. Cette dernière s'enfonce sous l'une des marges de l'océan. Pendant cette phase, un magmatisme de subduction peut intervenir et enrichir en nouvelles roches la lithosphère chevauchante. Lors de la collision, un métamorphisme de haute pression comprime les roches des deux plaques et les transforme. Lors de la décompression, à la fin de la collision, l'érosion de la chaîne peut produire de nouvelles roches sédimentaires et mettre à nu les roches profondes de la suture.

Exercice 7

Je vois que	Je sais que	J'en déduit que
Doc. 1. <ul style="list-style-type: none">• La région de Bourg-d'Oisans se situe au cœur des Alpes, à l'ouest du Briançonnais et des restes de l'océan liguro-piémontais.• Ce compartiment correspond à la croûte européenne et il est limité du reste de la région par une suture	<ul style="list-style-type: none">• En bordure d'un océan, on trouve une marge• Les chaînes de montagnes sont généralement le résultat de la collision de deux domaines continentaux autrefois séparés par un océan bordé de marges passives.	<ul style="list-style-type: none">• Par sa situation géographique, Bourg-d'Oisans pourrait correspondre à des restes de la marge européenne

Je vois que	Je sais que	J'en déduit que
Doc. 2. • La faille fait descendre le compartiment de gauche par rapport au compartiment de droite. • On distingue une faille qui met en contact de vieux gneiss, des roches sédimentaires d'âges variés mais toutes plus récents que le gneiss et des roches magmatiques (contemporaines des premiers sédiments).	<ul style="list-style-type: none"> • Ce type de faille est une faille à jeu normal, elle est liée à une divergence. • Ce type de marge est fréquent au niveau des marges passives. • Les gneiss sont des roches de la croûte continentale profonde, leur présence à la surface indique des mouvements tectoniques les ayant exhumés. • L'âge des basaltes et celui des premières roches sédimentaires indiquent une activité tectonique au Trias, près de 100 Ma après la formation des gneiss. • La présence de basaltes indique que les conditions de fusion partielle des périclites est atteinte • La présence de brèches et d'olistolithes indique une instabilité de la région, qui a provoqué le dépôt brutal de roches au Jurassique dans une dépression sous-marine. • Le dépôts d'argiles au Jurassique supérieur indiquent un milieu calme non actif d'un point de vue tectonique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ces formations permettent de concevoir l'existence d'une croûte continentale paléozoïque qui se fracture au Trias à cause de mouvements distensifs. • La présence de basalte est à relier à un amincissement de la croûte, qui permet une décompression de la péridotite mantellique et sa fusion partielle. • Les évaporites se forment dans des dépressions où le lessivage des reliefs permet la surconcentration en sels. Elles peuvent indiquer la présence de la mer. • Les brèches et les olistolithes montrent que, pendant le Jurassique, les compartiments en jeux sont en mouvement et que l'espace d'accommodation est plus important. Les sédiments sont clairement marins. • Au Jurassique supérieur, les mouvements s'interrompent et la sédimentation est calme.
Doc. 3. • Le bloc diagramme offre une vision 3D des dépôts étudiés à l'affleurement. • On observe que le compartiment de Bourg-d'Oisans est basculé par rapport au compartiment à l'ouest de la faille d'Ornon. • Les couches de Trias et du Jurassique inférieur ont été faillées avec le socle gneissique. • Les dépôts du Jurassique supérieur remplissent la dépression	<ul style="list-style-type: none"> • Les blocs basculés se mettent en place lors d'un basculement progressif d'un compartiment le long d'une faille listrique à jeu normal. • On distingue des sédiments anté-, syn- et post-tectoniques grâce à leur disposition géométrique dans les dépressions inter blocs basculés 	<ul style="list-style-type: none"> • Le diagramme montre clairement que l'organisation des roches correspond à la structure d'une marge passive qui se fracture et s'amincit par basculements de blocs. • La forme des dépôts sédimentaires indique ici que la tectonique distensive a débuté au Trias, a joué pendant le Jurassique inférieur et s'est arrêtée au Jurassique supérieur

Conclusion : Tous ces indices montrent que les géologues ont de bonnes raisons de considérer Bourg-d'Oisans comme les restes d'une marge passive de la croûte européenne.

Exercice 8

On demande ici à l'élève de calculer la densité des échantillons et de rechercher, à l'aide de la clef de détermination des minéraux à l'œil nu, le domaine de stabilité métamorphique atteint par la roche.

La mise en forme recommandée serait un dessin ou une capture d'image des roches en légendant les minéraux caractéristiques (chlorite/actinote et jadéite/grenat) et un tableau à double entrée présentant pour chaque échantillon trois mesures de masse et la moyenne, trois mesures du volume et la moyenne, le calcul de la densité à partir des moyennes. On valorisera un élève qui aura discuté de mesures aberrantes et les aura éliminées du calcul de sa moyenne.

Les aides majeurs proposées en numérique sont :

- deux documents présentant les minéraux caractéristiques de chaque roche ;
- deux documents présentant la masse et le volume de chaque échantillon ;
- protocole pour effectuer la mesure de la densité ;
- formule pour le calcul de la densité ;
- deux documents présentant la densité de chaque roche.

Chapitre 8. Organisation fonctionnelle des plantes à fleurs

Ce chapitre d'introduction à la biologie végétale permet d'aborder la structure morpho-anatomique des plantes à fleurs et les fonctions associées. Les connaissances des élèves sur ces questions datent pour l'essentiel du collège. Il conviendra donc de prendre le temps de placer le vocabulaire nécessaire, essentiel pour appréhender les chapitres suivants.

Dans ce chapitre, les élèves doivent s'interroger sur la capacité des plantes à fleurs à réaliser toutes les fonctions vitales (se nourrir, se reproduire, se défendre) tout en restant fixées. Cet angle, déjà choisi dans les précédents programmes, a le mérite de permettre une approche fonctionnelle (chapitre 8 et 10) et biochimique (chapitres 9 et 10) des caractéristiques structurales.

Dans **l'unité 1**, après avoir décrit structurellement une plante-type, on s'intéresse à différentes adaptations morpho-anatomiques liés à des contraintes physico-chimiques de l'environnement. **L'unité 2** décrit structurellement et fonctionnellement les surfaces d'échange des plantes : surface d'échange aérienne (page de gauche) et surface d'échange souterraine (page de droite). La nécessaire circulation de matière dans la plante est abordée dans **l'unité 3**, avec les descriptions des structures responsables (phloème et xylème) et la définition des sèves (brute et élaborée). C'est aussi l'occasion de donner une première vision fonctionnelle des flux de matières internes à la plante. **L'unité 4** est une introduction aux modalités de croissance et de différenciation des tissus et des organes ; la localisation de ces phénomènes au niveau de la plante est étudiée. Enfin, **l'unité 5** présente le cas particulier de la croissance orientée (phototropisme) des plantes vis-à-vis d'un facteur non homogène de l'environnement : la lumière. Cette unité s'appuie largement sur des expériences historiques réalisées sur de jeunes plantules de poacées.

Thème 3. De plante sauvage à la plante domestiquée

Connaissances	Capacités, attitudes
<p>Par diverses caractéristiques, les plantes terrestres montrent une capacité d'adaptation à la vie fixée à l'interface sol/atmosphère, dans des environnements variables.</p> <p>> Unité 1</p> <p>Les plantes développent de grandes surfaces d'échange, aériennes d'une part (optimisation de l'exposition à la lumière, source d'énergie, transferts de gaz) et souterraines d'autre part (absorption d'eau et d'ions du sol facilitée le plus souvent par des symbioses, notamment les mycorhizes).</p> <p>> Unité 2</p> <p>Des tissus conducteurs canalisent les circulations de matière dans la plante, notamment entre les lieux d'approvisionnement en matière minérale, les lieux de synthèse organique et les lieux de stockage.</p> <p>> Unité 3</p> <p>Le développement d'une plante associe croissance (multiplication cellulaire par mitoses dans les méristèmes, suivie d'élongation cellulaire) et différenciation d'organes (tiges, feuilles, fleurs, racines) à partir de méristèmes.</p> <p>> Unité 4</p> <p>Ce développement conduit à une organisation modulaire en phytomères, contrôlée par des hormones végétales et influencée par les conditions de milieu.</p> <p>> Unité 5</p>	<p>Conduire l'étude morphologique simple d'une plante commune mettant en lien structure et fonction. Estimer (ordre de grandeur) les surfaces d'échange d'une plante par rapport à sa masse ou son volume.</p> <p>> Unités 1 à 3 ; activités expérimentales</p> <p>Mettre en œuvre un protocole expérimental de localisation des zones d'élongation au niveau des parties aériennes ou souterraines.</p> <p>> Unité 4</p> <p>Étudier les surfaces d'échange des mycorhizes, associations symbiotiques entre champignons et racines de plantes, déjà observées en classe de première. Réaliser et observer des coupes dans des organes végétaux afin de repérer les grands types de tissus conducteurs (phloème, xylème).</p> <p>> Unité 2 et Objectif oral</p> <p>Étudier et/ou réaliser les expériences historiques sur l'action de l'auxine dans la croissance racinaire ou caulinaire.</p> <p>> Unité 5</p> <p>Établir et mettre en œuvre des protocoles montrant l'influence des conditions de milieu (lumière, gravité, vent) sur le développement de la plante.</p> <p>> Unité 5, Objectif oral et activités expérimentales</p>

Compétences et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
<p>Pratiquer des démarches scientifiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Formuler et résoudre une question ou un problème scientifique. • Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution. • Observer, questionner, formuler une hypothèse, en déduire ses conséquences testables ou vérifiables, expérimenter, raisonner avec rigueur, modéliser, argumenter. • Interpréter des résultats et en tirer des conclusions. • Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique. • Comprendre qu'un effet peut avoir plusieurs causes. • Discerner, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 et 2 • Activités expérimentales • Unités 2 et 3 • Unité 2 • Unités 2 et 3 • Unité 5 • Unité 2

Concevoir, créer, réaliser	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier et choisir des notions, des outils et des techniques, ou des modèles simples pour mettre en œuvre une démarche scientifique. • Concevoir et mettre en œuvre un protocole. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 5 • Unités 2, 3 et 5, activités expérimentales
Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre	<ul style="list-style-type: none"> • Garder trace de ses recherches (à l'oral et à l'écrit) et mémoire de ses acquis précédents. • Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 1 • Unité 1
Pratiquer des langages	<ul style="list-style-type: none"> • Communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant. • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique. • Utiliser des outils numériques • Utiliser des outils numériques : conduire une recherche d'informations sur internet pour répondre à une question ou pour résoudre un problème scientifique, en choisissant des mots-clés pertinents, et en évaluant la fiabilité des sources et la validité des résultats. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 3 • Unités 1 à 4 • Unité 3 et activités expérimentales • Unité 5

Choix pédagogiques

Unité 1

La première page rappelle les différents organes permettant de décrire l'anatomie d'une angiosperme.

> Le **document 1** permet, à travers l'exemple d'une plante alimentaire bien connue des élèves – le haricot – d'associer les termes botaniques et des images (photos et dessins) aux différentes parties de la plante. Le choix d'une légumineuse permet de présenter à la fois les nodosités et les mycorhizes comme organes racinaires symbiotiques.

> Le **document 2** fournit un texte pour remettre en perspective le mode de vie fixé et introduire l'idée que la morphologie des plantes s'explique bien si l'on considère les fonctions vitales à réaliser dans ces conditions de fixité.

> Le **document 3** présente la renoncule des glaciers, vivant en montagne dans des conditions limites en ce qui concerne la survie des angiospermes. Elle est soumise à de nombreux facteurs écologiques particulièrement difficiles, notamment :

– saison de végétation très courte (à 4000 m d'altitude il n'y a pas d'été, simplement un réchauffement « printanier » qui a lieu en juillet et s'enchaine avec l'automne) =>¹ cette plante a une floraison rapide et une croissance très lente ;

¹ Les => donnent des exemples de réponses adaptatives.

- gel : le gel limite la disponibilité en eau, détruit par la formation de cristaux de glace les structures cellulaires, dessèche les tissus par augmentation de la pression osmotique => le port en boule limite l'effet du vent (desséchant et refroidissant par convection thermique), la plante possède des mécanismes biochimiques de protection (osmolyte, protéines antigel, etc.) permettant notamment d'augmenter sa pression osmotique ;
- l'enneigement limite l'exposition à la lumière et la possibilité des échanges de gaz, une couche de neige joue également un rôle de protection thermique => la croissance est lente ;
- l'intensité de l'irradiation lumineuse a des effets délétères => cette plante produit spécifiquement une protéine protectrice de la chaîne photosynthétique.

> Les documents 4 à 6 fournissent d'autres exemples d'adaptations particulières à la vie fixée en fonction des conditions environnementales.

> Le **document 4** traite de l'exemple classique des adaptations de l'oyat à la vie dans les dunes mobiles (dont le sable n'est pas fixé). L'accent est mis sur la structure particulière de la feuille dont les deux faces, très asymétriques, ont des fonctions différentes : la face externe, possédant une cuticule épaisse, limite les pertes en eau lorsque la feuille est enroulée sur elle-même, tandis que la face interne présente une importante surface d'échange et une pilosité qui limite la convection de l'air à proximité de la surface (et de fait l'évapo-transpiration). Les modalités d'ouverture et de fermeture de la feuille selon les conditions d'hygrométrie atmosphérique (turgescence différentielle des cellules bulliformes) pourront être abordées à l'aide de la ressource suivante :

www.snv.jussieu.fr/bmedia/mouvements/nasties-hydro.htm

Au-delà des adaptations liées à la faible disponibilité en eau, l'oyat présente également des adaptations à l'enfoncissement et au déchaussement selon les mouvements du sable dans lesquels il est installé (capacité à produire des rhizomes et des feuilles selon si les organes sont enfouis ou dégagés par le vent).

> Le **document 5** traite d'une plante endémique rare des Pyrénées : *Xatardia scabra*. Comme des plantes plus communes dans les éboulis (le laser de France par exemple, *Laserpitium gallicum*), elle présente des structures racinaires particulières lui permettant de s'installer dans des éboulis et d'accéder à des ressources en nutriments et en eau située sous les éboulis. Elle peut également supporter d'éventuels mouvements du substrat (capacité à reformer l'appareil aérien à partir de fragments racinaires). Comme les autres plantes d'éboulis, il s'agit d'une plante pionnière (elle va contribuer à reformer un sol en surface et dans les interstices de l'éboulis sur lesquels d'autres plantes vont pouvoir s'installer).

> Le **document 6** aborde l'exemple du maïs, une plante très étudiée. On s'intéresse ici à la diversité du système racinaire en fonction des conditions nutritionnelles du sol dans lequel il est installé. On pourra trouver facilement de nombreux autres exemples de plasticité des systèmes racinaires selon les conditions hydriques ou nutritionnelles du sol, par exemple avec les mots-clés « root plasticity nutrients ».

Unité 2

> Cette unité aborde principalement les structures anatomiques permettant la nutrition de la plante. Celle-ci nécessite d'indispensables échanges de matières entre l'environnement proche et la plante elle-même.

> On peut, en première approche, considérer une plante comme une association de deux ensembles très ramifiés :

- l'un aérien, portant l'appareil photosynthétique (ensemble des feuilles) est responsable de la nutrition carbonée et de l'évapo-transpiration (page de gauche),
- l'autre souterrain, souvent l'objet d'association avec des micro-organismes, notamment les champignons mycorhiziens, assure la nutrition hydro-minérale (page de droite).

Dans les deux cas, la ramification permet d'augmenter les surfaces d'échange. Il s'agit là d'une caractéristique des organismes fixés (que l'on retrouve chez certains animaux fixés) se nourrissant directement de substances abondantes dans leur environnement proche.

> Le **document 1**, présente une coupe transversale classique de feuille de lilas (les feuilles d'autres espèces, tant qu'elles ne sont pas spécialisées, peuvent être utilisées pour faire des coupes et des observations microscopiques en classe). Le schéma d'interprétation permet de replacer le vocabulaire anatomique classique. On insistera sur le fait que les surfaces d'échanges gazeux, au sens propre sont, non pas les épidermes des feuilles, mais les surfaces des chambres sous-stomatique.

> Cela a comme conséquence que cette surface d'échange n'est pas constante à un moment donné mais subit une régulation au cours de la journée par le contrôle de l'ouverture stomatique (voir les **documents 2 et 3**). L'ouverture et la fermeture des stomates permet en particulier de réguler les flux d'eau perdus par évapo-transpiration tout en assurant l'approvisionnement en dioxyde de carbone (notion de compromis).

> L'évaluation des surfaces d'échange repose la plupart du temps sur des estimations, l'importance des structures concernées (en nombre et en longueur), leur petite taille, leur fragilité et leur extrême ramification rendent difficiles les mesures exactes. Ces estimations sont la plupart du temps réalisées par des mesures précises sur de petits échantillons et extrapolées à l'ensemble du système concerné. On trouve dans la littérature scientifique des exemples de quantification des systèmes ramifiés comme celle rapportée dans le **document 7** sur le concombre, extraite de Jakobsen et al., 1989 (« Carbon flow into soil and external hyphae from roots of mycorrhizal cucumber plants »).

> L'**activité expérimentale** de la page 208 permettra d'aborder l'évaluation des différentes surfaces d'échange. Les données apportées par ces activités expérimentales seront utiles pour répondre à la tâche complexe proposée pour l'unité 2 page (voir plus loin). Si les élèves ne réalisent pas ces activités expérimentales, il est possible qu'ils effectuent une recherche sur Internet pour obtenir des résultats d'estimation.

Notons que ces estimations sont extrêmement variables d'abord parce que la densité stomatique varie d'une plante à l'autre (d'un facteur 30 environ entre le blé qui possède autour d'une dizaine de stomates par millimètre carré comparé au pommier qui en environ 300 sur la même surface) et que l'estimation de la surface foliaire totale est soumise à de nombreuses approximations et erreurs. On pourra également évoquer l'existence de formules permettant une estimation simple des surfaces foliaires à partir des dimensions de la plante comme par exemple dans cette publication : Ruget, F., Bonhomme R., Chartier M. (1996), « Estimation simple de la surface foliaire de plantes de maïs en croissance ». Signalons par ailleurs qu'il existe des appareils de terrain permettant l'estimation des surfaces foliaires (ces appareils sont appelés « Leaf Area Meter ») et des applications gratuites pour smartphones telles que Easy Leaf Area qui viennent compléter les méthodes classiques (scannage de feuilles et utilisation de logiciels de mesures telles que Mesurim).

> Pour simplifier, il est possible de proposer une estimation pour un plant de taille modeste. Par exemple un plant de pois de 50 cm de haut, présente 30 folioles (ou stipules) de 6 cm^2 de moyenne chacun, et possédant environ 300 stomates par mm^2 sur leur face inférieure (on néglige les stomates de la face supérieure), soit 30 000 stomates par cm^2 (180 000 par foliole). Considérant que pour chaque stomate, la chambre sous-stomatique peut être considérée comme une sphère de 50 μm de diamètre, la chambre a une surface unitaire de $8000 \mu\text{m}^2$ soit $0,008 \text{ mm}^2$. On a donc la surface totale de chambres sous-stomatiques suivante :

$$30 \times 180000 \times 8000 = 43,2 \cdot 10^9 \mu\text{m}^2 = 432 \text{ cm}^2$$

On peut la comparer à la surface inférieure des feuilles, $30 \times 6 = 180 \text{ cm}^2$, ou à la surface totale (face supérieure et inférieure), soit $180 \times 2 = 360 \text{ cm}^2$.

On constate que les ordres de grandeur sont similaires, ceci s'explique notamment parce que les surfaces des épidermes ne sont pas comptées dans le calcul des surfaces cumulées des chambres sous stomatiques.

> Le document 4 présente les poils absorbants, très facilement visibles sur les jeunes germinations des plantes de la famille des brassicacées. Il est d'ailleurs possible de faire pousser quelques graines de radis ou de moutarde (faciles à se procurer dans le commerce pour réaliser des graines germées alimentaires) pour faire des observations à la loupe binoculaire ou au microscope. Compter au minimum une semaine de germination sur du papier absorbant humide.

> On rappelle que les racines mycorhizées ne possèdent pas de poils absorbants, l'absorption des nutriments étant déléguée aux filaments mycorhiziens. C'est pourquoi, les poils absorbants sont observés sur les jeunes les germinations chez lesquelles la symbiose mycorhizienne n'a pas encore été mise en place ou dans les familles botaniques ne formant pas de mycorhizes (brassicacées, ex-chénopodiacées). Pour la grande majorité des plantes (environ 90 % des trachéophytes à l'échelle mondiale), l'absorption hydro minérale est réalisée grâce à une symbiose mycorhizienne avec des champignons spécifiques, une même plante pouvant former des symbioses avec plusieurs espèces de champignons simultanément et réciprocement (**documents 5 à 7**).

> En Europe, il s'agit pour l'essentiel d'ectomycorhizes (**document 5 et 6**) chez les espèces ligneuses (les mycorhizes de l'ordre du millimètre sont alors visibles à l'œil nu à la surface des racines et présentent des morphologies facilement reconnaissables) tandis que chez les plantes herbacées, on observe principalement des endomycorhizes, invisibles à l'œil nu et nécessitant une préparation microscopique spécifique (coloration au bleu coton lactique ou à l'encre).

Unité 3

> Après avoir abordé les échanges de matières avec l'environnement, l'unité 3 s'attache à décrire comment cette matière circule l'intérieur de la plante. Il s'agit à la fois de caractériser les structures anatomiques permettant cette circulation (phloème et xylème) et les fluides transportant la matière (les sèves). On pourra faire réfléchir les élèves à la nécessité de cette circulation de matières dans des organes spécialisés aux fonctions nutritionnelles différentes (absorption du carbone pour l'appareil aérien, de l'eau et des sels minéraux pour l'appareil souterrain). On pourra rapprocher fonctionnellement le rôle des sèves de ce point de vue de celui du sang chez les vertébrés et effectuer une comparaison (notamment sur l'absence de transport des gaz respiratoires photosynthétiques chez les plantes).

> Le document 1 présente deux expériences classiques de mise en évidence de la circulation des sèves. À gauche (a), la sève brute dont on peut prélever une goutte juste après avoir coupé (suffisamment près du sol) la tige d'une plante herbacée. C'est la poussée racinaire qui est responsable de l'émergence de cette goutte. À droite (c), la sève élaborée dont on constate la circulation périphérique puisqu'elle provoque un renflement dans la partie supérieure d'une tige écorcée (retrait du xylème) dont on a maintenu l'axe central (supportant le xylème sur une jeune tige). Le prélèvement de la sève brute est l'occasion de faire une analyse biochimique simple (au centre, (b)).

> Le document 2 compare la composition chimique et le pH des sèves du ricin circulant dans le phloème d'une part et dans le xylème de l'autre. Cela permet de constater la faible concentration en soluté de la sève brute, majoritairement composée de sels minéraux. De son côté la sève élaborée contient jusque 10 % de saccharose.

> Le **document 3** permet de compléter la coupe transversale de feuille (de lilas) déjà vue dans l'unité 2 (document 1) en se focalisant sur les tissus conducteurs, xylème et phloème, constituant la nervure principale de la feuille (du théier ici).

> Le **document 4 et 5** viennent compléter cet ensemble de coupes histologiques, avec l'exemple d'une tige de tournesol dans le document 4, où l'on retrouve le phloème et le xylème superposé, tandis que le document 5 montre l'alternance de xylème et de phloème dans une racine de radis. Ainsi les élèves disposent de coupes des trois principaux organes végétatifs qu'ils peuvent comparer. Ils constateront l'omniprésence des tissus conducteurs, montrant de fait la circulation des sèves dans ces organes.

> Le **document 6** fourni un schéma de synthèse, représentant la circulation de ces sèves, et leur rôle fonctionnel dans la circulation de la matière : flux hydrominéral dans la sève brute qui prend sa source dans les racines et flux de matières organiques (glucides) dans la sève élaborée qui prend sa source dans les feuilles. Pour les élèves à l'aise avec ces notions, l'enseignant pourra introduire les notions d'organes sources et d'organes puits (et l'évolution de ce statut au cours du cycle de vie de la plante).

Unité 4

> Cette unité s'intéresse à la croissance et au développement de la plante. On séparera la différenciation (processus menant à de nouveaux types cellulaires et à de nouveaux organes) de la croissance (augmentation de taille des organes préexistants).

> Le **document 1** reprend l'expérience de Sachs, laquelle met en évidence la croissance différentielle d'une gêne racine (de potimarron en l'occurrence). Cette expérience permet de constater plusieurs choses, d'abord un doublement de taille (approximativement) du segment observé en 14 heures les par ailleurs la localisation des zones de croissance clairement situées entre les repères 7 et 8 et dans une moindre mesure entre les repères 6 et 7 et entre 5 et 6.

> Le **document 2** montre différentes zones d'un apex racinaire dont la contribution à la croissance et la différenciation sont différentes. Le méristème apical montre un grand nombre de noyaux en division dans des cellules de relativement petite taille. La zone d'élongation cellulaire, montre au contraire des noyaux plutôt quiescents et des cellules plus allongées. La zone de différenciation, montre des cellules d'encore plus grande taille dont les parois s'épaissent.

> Le **document 3** représente un rameau feuillé de tilleul, dont la structure répétée est caractéristique de l'organisation des rameaux végétatifs des angiospermes. L'unité répétée constituant un phytomère (fragment de tige, feuille et bourgeon axillaire).

> Le **document 4** montre une manipulation classique de coupe longitudinale dans un bourgeon de marronniers en fin d'hiver. Elle permet de montrer que la différenciation des organes a lieu dans le bourgeon en formation et pendant le débourrement au printemps, le rameau miniature subit principalement une augmentation de taille de ces organes (même si de nouveaux organes, notamment des feuilles, pourront être formés ensuite pendant la belle saison).

> Le **document 5** montre justement, à l'échelle microscopique, le méristème apical à l'intérieur d'un bourgeon et les différentes ébauches des futurs organes, des feuilles en particulier.

> Enfin, le schéma du **document 6** représentent la localisation des différentes zones méristématiques tout en replaçant le vocabulaire vu dans la double page.

Unité 5

> L'unité 5 montre l'influence des facteurs de l'environnement, en l'occurrence de la lumière sur la croissance des plantes, avec les expériences historiques classiques sur le phototropisme. À partir de l'ensemble des documents présentés par la double page, les élèves pourront reconstituer le rôle de l'auxine dans la croissance orientée des coléoptiles. Cet exemple illustre la plasticité phénotypique des plantes, déjà évoquée dans l'unité 1.

> Parce que cette structure est utilisée dans les expériences suivantes, le **document 1** présente le coléoptile. Le **document 2** permet de découvrir que la croissance des coléoptiles est orientée dans des situations d'éclairage non homogène (anisotrope).

> Le **document 3** montre une série d'expériences de Charles Darwin et son fils (à gauche) et de Boysen-Jensen (à droite). À partir des expériences de Darwin, l'élève doit proposer les interprétations suivantes :

- l'apex du coléoptile semble jouer un rôle dans sa croissance orientée vers la lumière ;
- le coléoptile à une croissance orientée lorsqu'il peut capter la lumière ;
- le reste du coléoptile ne semble pas jouer de rôle dans la croissance orientée.

Concernant les expériences de Boysen-Jensen, les interprétations attendues sont :

- une substance semble responsable de la croissance orientée ;
- cette substance n'est pas arrêtée par une lamelle de gélose, ce qui suggère qu'elle est hydrophile ;
- cette substance est arrêtée par une lamelle de mica ;
- cette substance semble circuler sur la face non éclairée du coléoptile entre l'apex et le reste de l'organe.

> Le **document 4** présentent les expériences de Söding et de Went, toujours sur la croissance orientée des coléoptiles de graminées.

Des expériences de Söding on peut tirer les interprétations suivantes :

- la section de l'apex empêche la croissance du coléoptile ;
- un apex sectionné puis replacé sur le coléoptile lui permet de poursuivre sa croissance ;
- la croissance du coléoptile est stoppée si l'apex sectionné est replacé sur le reste du coléoptile en ayant au préalable intercalé des substances telles que des micas, du platine ou du beurre de cacao. Cela suggère qu'une substance produite par l'apex, qui n'est pas une substance lipidique ni un message électrique, permet sa croissance.
- la croissance des coléoptiles est rétablie si la substance intercalée entre l'apex et le coléoptile est hydrophile, ce qui suggère que la substance permettant la poursuite de la croissance du coléoptile est produite par l'apex est hydrophile.

Des expériences de Went, l'élève pourra tirer les interprétations suivantes :

- la substance hydrophile permettant la croissance peut être stockée dans un bloc de gélose ;
- le bloc de gélose imbiber peut produire sur le reste du coléoptile sectionné la même action sur la croissance qu'un apex intact.

> Le **document 5** précise que la substance hydrophile concernée est l'auxine. Sa répartition non uniforme permet la croissance orientée des coléoptiles. Le **document 6** permet de quantifier la croissance différentielle des faces éclairées ou non éclairées des coléoptiles soumis à un éclairage anisotrope.

Ressources complémentaires

Unité 1

> Sur les adaptations des plantes de montagne

www.jardinalpindulautaret.fr/sites/sajf/files/pdf/Plantes_alpines.pdf

> Sur la renoncule des glaciers

Busti, D. 2012. Renoncule des glaciers et Dryade à 8 pétales : deux espèces arctico-alpines biologie.ens-lyon.fr/ressources/Biodiversite/Documents/image-de-la-semaine/images-de-2012/semaine-03-16-01-2012/

Streb P. et coll. (2005). « Evidence for alternative electron sinks to photosynthetic carbon assimilation in the high mountain plant species *Ranunculus glacialis* » *Plant, Cell and Environment*, 28: 1123-1135.

Totland O. et coll. (2002). "Effects on temperature and date of snowmelt on growth, reproduction, and flowering phenology in the arctic/alpine herb, *Ranunculus glacialis*. » *Oecologia* 133: 168-175.

Wagner J. et coll. (2010). « *Ranunculus glacialis* L.: successful reproduction at the altitudinal limits of higher plant life. » *Protoplasma* 243:117-128.

> Sur l'oyat

www.snv.jussieu.fr/bmedia/anatomie/feuille/enplus/oyat/oyat.htm

www.snv.jussieu.fr/bmedia/mouvements/nasties-hydro.htm

> Sur *Xatardia scabra*

Huc, S. (2008). « Mobilité des éboulis supraforestiers des Pyrénées orientales (France): morphodynamique et marqueurs biologiques. » *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 14(2), 99-112.

> Sur le système racinaire du maïs

Kong, X., Zhang, M., De Smet, I., & Ding, Z. (2014). « Designer crops: optimal root system architecture for nutrient acquisition. » *Trends in Biotechnology*, 32(12), 597-598.

Corrigé des parcours « tâches complexes »

Unité 1

> Éléments de correction

La production attendue est un texte accompagné d'un tableau.

Sur le fond, la production devra aborder les conditions environnementales et la réponse morpho-anatomique de la plante. Les élèves n'ayant pas la possibilité de différencier ce qui relève de l'adaptation (expression phénotypique du génotype) et de l'accommodation (plasticité phénotypique en fonction des conditions environnementales), on n'attend pas que ces deux aspects soient traités. Néanmoins, l'enseignant pourra évoquer ces questions et la méthodologie expérimentale permettant de dissocier ces deux types de réponse (réalisation de cultures témoins avec suppression des facteurs environnementaux contraignants).

Pour le tableau, une réponse possible est un tableau à trois colonnes (espèce, facteur écologique considéré, réponse phénotypique de la plante) tel que celui proposé ci-dessous (voir réponses aux questions « pas-à-pas »).

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les liens causes à conséquences sont confus• le discours est finaliste• le tableau et le texte sont redondants	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• articulation texte / tableau maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente. <ul style="list-style-type: none">• Les informations des documents ont été exploitées et mises en relation.• L'articulation texte / tableau est correcte
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les informations des documents sont insuffisamment exploitées• Des difficultés à associer les contraintes et adaptations correspondantes	Complets ou suffisants	
Communication Texte et tableau	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Le texte n'est pas correctement structuré• Le tableau ne permet pas de répondre à la question	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Des maladresses dans la structuration du texte ou du tableau	Le texte et le tableau sont bien structurés pour répondre à la question

Unité 2

> Éléments de correction

La production attendue est un tableau.

Les entrées de ce tableau doivent être choisies avec soin de façon à pouvoir répondre à la question posée. On attend qu'en plus des surfaces d'échange classiques telles que les surfaces de feuilles ou les surfaces de racines, il soit fait mention de la surface des chambres sous-stomatiques et des réseaux mycorhiziens. Concernant l'estimation des surfaces d'échange, les valeurs indiquées dépendront des activités pratiques réalisées par les élèves (voir activité expérimentale p. 208), ou des recherches qu'ils pourront effectuer sur Internet.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les entrées choisies pour le tableau ne sont pas complètes	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les entrées choisies pour le tableau sont complètes mais il y a des erreurs dans les estimations	Démarche à la fois pertinente et cohérente. <ul style="list-style-type: none">• Les informations des documents ont été exploitées et mises en relation.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les informations des documents sont insuffisamment exploitées• Des difficultés à réaliser les estimations de surface	Complets ou suffisants	
Communication Tableau	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• La structure du tableau ne permet pas de répondre à la question	Le tableau est bien structuré et permet de répondre à la question	

Unité 3

> Éléments de correction

La production attendue est un texte accompagné d'un schéma. L'essentiel des informations peuvent être apportées par le schéma auquel le texte fera référence.

Le schéma pourra s'appuyer sur le document 6. Il devra être complété et légendé. Le texte et/ou le tableau devront mentionner les différences entre xylème et phloème, leur existence dans tous les organes, les différences entre sève brute et sève élaborée.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• ne s'appuie pas sur les données des documents• redondance entre le schéma et le texte	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• mauvaise complémentarité entre le texte et le schéma.	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• le texte n'aborde pas les différences fonctionnelles entre sèves et/ou entre les tissus vasculaires	Complets ou suffisants	
Communication Schéma et texte	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Le texte n'est pas correctement structuré (séparation des idées, enchaînement logique)• Le texte ne précise pas l'origine des informations citées	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Quelques maladresses dans la structuration du texte• Le texte est correct mais mal articulé avec le schéma	Le texte est bien structuré et cohérent par rapport au schéma

Unité 4

> Éléments de correction

La production attendue est un schéma.

Celui-ci pourra s'appuyer sur les documents 2, 5 et 6, mais devra séparer les parties aériennes et racinaires de la plante. Il devra également intégrer les informations des autres documents. Compte tenu des structures à représenter (phytomère, méristème, zone d'elongation, zone de différenciation), l'élève devra utiliser plusieurs échelles. On verra donc dans l'évaluation à ce que ces échelles soient indiquées, et le lien entre les schémas d'échelles différentes soit clairement explicité.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Démarche explicative	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• le schéma ne s'appuie pas sur les données des documents	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• la gestion des différentes échelles de représentation est maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• la représentation des différentes zones n'apparaît pas clairement• les légendes sont insuffisantes	Complets ou suffisants	
Communication Schéma	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Le choix de l'échelle ne permet pas de représenter différentes zones	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• la compréhension du schéma est difficile faute de légendes ou de titres appropriés	Le schéma est bien structuré, bien organisé, les échelles sont judicieusement choisies

Unité 5

> Éléments de correction

La production attendue est un texte illustrant le caractère collectif, itératif et complémentaire des expériences sur le phototropisme et plus généralement du travail en sciences expérimentales. On attend une courte introduction, une courte conclusion et un développement présentant les interprétations et apports des expériences.

On attend donc des observations et des interprétations fiables des expériences présentées dans la double page. Le texte devra présenter les redondances entre les expériences des différents auteurs et les apports de chacun. La structure du texte, naturellement organisé dans l'ordre chronologique, permettra à partir des expériences les plus anciennes d'aboutir à la caractérisation de l'auxine.

Parmi les questions scientifiques éclaircies par ces expériences, le texte pourra se concentrer sur le rôle de l'auxine (bien avant sa caractérisation) dans la croissance du coléoptile (effet positif), dans sa croissance orientée (du fait d'une répartition différentielle), sur sa synthèse sous l'influence de la lumière, sur son transport dans le coléoptile (depuis apex vers le bas), sur sa nature chimique.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Démarche explicative	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• le texte ne s'appuie pas sur les interprétations des expériences	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• le texte s'appuie sur les interprétations expériences mais ne répond que partiellement la question	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Eléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• les interprétations expériences sont insuffisantes maladroites	Complets ou suffisants	
Communication Texte	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• le texte n'est pas structuré	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• le texte n'est pas structuré de façon à comprendre en quoi les différentes expériences se complètent	Le texte est bien structuré et cohérent

Propositions corrigées de parcours pas à pas

Unité 1

Question 1. Réaliser une description structurée et raisonnée d'une plante de votre choix (doc. 1).

Qu'il s'agisse d'une plante que l'élève trouve seul dans l'environnement proche du lycée ou de son domicile, ou bien d'une plante proposée par l'enseignant, on veillera à ce qu'il y tous les organes, notamment souterrains et de reproduction, soient présents. Dans ce but, il est préférable d'envisager ce chapitre avant la fin octobre ou après la mi-avril. Dans le cas contraire, on pourra faire une analyse sur la base de photographies ou de plantes de collection (herbier), mais cela présente moins d'intérêt pédagogique.

Question 2. Réalisez un tableau associant les contraintes environnementales et les caractéristiques morpho anatomiques qui y répondent chez les différentes plantes de la double page (doc. 3 à 6).

Espèce	Contraintes environnementales	Caractéristiques morpho-anatomiques
Renoncule des glaciers	Froid	Tige courte, robuste, très ramifiée parfois rampante
Oyat	Faible disponibilité en eau	Capacité de la feuille sont roulées pour exposer une face externe imperméable
Xatardie	Éboulis instable	Racine pivot se développant entre les gros rochers
Maïs	Variation de la disponibilité des nutriments	Développement du système racinaire plus ou moins important

Question 3. Écrivez un court texte présentant des adaptations à la vie fixée à partir des exemples de la double page (doc. 1 à 6).

En vivant fixée, une plante subit les contraintes environnementales sans pouvoir y échapper par un mouvement, comme peuvent le faire les animaux. Les adaptations aux contraintes environnementales sont notamment des réponses morpho-anatomiques.

Par exemple, la renoncule des glaciers a une morphologie en coussin facilitant sa résistance au froid. L'oyat possède des feuilles pouvant se rouler sur elles-mêmes, lui permettant d'adapter ses pertes en eau en fonction de la disponibilité de celle-ci. La xatardie rude développe une racine pivot capable de se développer entre les gros rochers des éboulis dans lesquels elle s'installe. Enfin, le maïs a un développement de son système racinaire qui dépend de la richesse nutritionnelle du sol.

En conséquence, les plantes présentent des phénotypes adaptés aux conditions environnementales locales et leur permettant de se nourrir, de croître et de se reproduire tout en restant fixées.

Unité 2

Question 1. Quelle sont les structures qui contribuent aux échanges de l'appareil aérien de la plante avec atmosphère ? Proposez une formule permettant théoriquement de les calculer.

Ces structures sont les chambres sous-stomatiques qui s'ouvrent sur l'atmosphère par les stomates. On peut estimer la surface d'échange aérienne totale d'une plante si l'on connaît :

- une estimation de la surface d'une chambre sous-stomatique, S_s ;
- a densité de stomates (nombre de stomates par unité de surface de feuille), d_s ;
- a surface foliaire moyenne d'une feuille, S_f ;
- le nombre de feuilles, n.

La surface totale des chambres sous stomaticques correspond alors au produit $n \times S_f \times d_s \times S_s$

Question 2. Quelle sont les structures qui contribuent aux échanges avec le sol de l'appareil souterrain ? Proposez une formule permettant théoriquement de les calculer.

Ces structures sont les racines et les filaments mycorhiziens. Si l'on considère, pour simplifier, que ces structures sont cylindriques, l'estimation de leur surface d'échange nécessite de connaître leur longueur (l) et leur diamètre (d). La formule est alors la somme des surfaces des cylindres correspondants de surface $2\pi \left(\frac{d}{2}\right) l$.

Question 3. Expliquez pourquoi l'estimation quantitative des surfaces d'échange est un exercice difficile (doc. 1, 2, 4, 7).

Les différents paramètres nécessaires pour calculer les surfaces sont difficiles à obtenir. Par exemple, connaître le nombre de feuilles d'une plante herbacée de quelques dizaines de centimètres est envisageable par comptage exhaustif, sur un arbre d'une vingtaine de mètres cela passe nécessairement par des estimations. De la même façon, les racines, et les filaments mycorhiziens, compte tenu de leur grande finesse et de leur intrication avec le sol environnant, nécessite un travail extrêmement lourd d'inventaire et de mesure pour faire les estimations (voir activité expérimentale).

Question 4. Réalisez un tableau synthétique comparant structures d'échanges aériennes et souterraines (doc. 1 à 6).

Appareil	Nature des organes	Nature des échanges	Exemple d'estimation (activité expérimentale p. 208)
Souterrain	Racines (poils absorbants) et filaments mycorhiziens	Eau et solutés (sels minéraux contenant de l'azote, du phosphore etc.)	622 km de racines d'un diamètre moyen de 0,12 mm pour un pied de seigle
Aérien	Feuilles et chambres sous stomatiques	Lumière et gaz (dioxyde de carbone, dioxygène, eau)	400 cm ² environ de surface foliaire pour un pied de pois

Unité 3

Question 1. Décrivez le trajet et la composition des sèves brutes et élaborées (doc. 1 et 2).

D'après le document 1a, on constate que la sève brute est provient de la partie inférieure d'une plante. On peut donc supposer qu'elle prend ses origines dans la racine. Le renflement observé dans le document 1c semble montrer que la sève élaborée descend des feuilles le long de la tige. Ces observations sont en accord avec la composition des sèves (document 2) circulant d'une part dans le phloème (sève élaborée) et d'autre part dans le xylème (sève brute). En effet, dans le phloème les sèves sont enrichies en saccharose, alors que dans le xylème la sève est principalement constituée d'eau et de sels minéraux.

Question 2. Commentez la répartition du xylème et du phloème dans les différents organes des plantes à fleurs (Doc. 3 à 5)

On constate, sur les différentes coupes microscopiques, que le xylème et le phloème sont présents dans tous les organes, ce qui est cohérent avec leur rôle nutritif. On observe par ailleurs que l'organisation du xylème et du phloème varie selon la nature de l'organe observé : feuille, tige ou racine. Dans la tige et la feuille, le xylème et le phloème sont superposés (document 3 et 4), alors que le xylème forme une croix dans le phloème dans la racine de radis (document 5).

Question 3. Écrivez un court texte comparant la sève brute et la sève élaborée (doc. 1 à 6).

La sève brute est une sève composée principalement d'eau et de sels minéraux qui circulent dans le xylème de la racine vers les autres organes. La sève élaborée comporte elle aussi des sels minéraux mais également du saccharose. Elle circule dans le phloème depuis les feuilles vers les autres organes.

Unité 4

Question 1. Expliquez la différence entre croissance et différenciation (doc. 1, 2 et 5).

La différenciation est l'acquisition de nouvelles caractéristiques : par exemple, les cellules méristématiques deviennent après division des cellules racinaires (document 2). La croissance est une augmentation du nombre de cellules ou une augmentation la taille de chaque cellule sans que les caractéristiques des cellules ne changent fondamentalement (document 2). La croissance a comme conséquence une augmentation de la taille des organes (document 1) tandis que la différenciation est à l'origine de nouveaux organes (document 5).

Question 2. Décrivez la croissance d'une racine (doc. 1 et 2).

Une racine croît par son extrémité. Néanmoins, la zone la plus terminale n'est pas celle qui croît le plus. Dans le document 1, on observe des zones d'élongation situées à quelques millimètres de l'extrémité de la racine. Au microscope optique, on constate que l'extrémité proprement dite est occupée par un méristème, c'est-à-dire une zone de multiplication des cellules protégées par une coiffe. Ce méristème se prolonge, lorsque l'on s'éloigne de l'apex, par une zone d'élongation responsable de la croissance, où l'on constate une augmentation de taille en longueur des cellules (document 2).

Question 3. En quoi peut-on dire qu'un rameau d'arbre est une structure répétitive ?

Comment s'appelle l'unité répétée (doc. 3, 5 et 6) ?

Sur la photo 3, on constate qu'un rameau feuillé de tilleul est constitué d'une alternance de feuilles et de fragments de tige qui se succèdent. L'unité qui se répète est nommée phytomère.

Question 4. Par rapport à l'ouverture d'un bourgeon, resituez temporellement la différenciation et la croissance d'un rameau (doc. 3, 4 et 5).

Dans un bourgeon, on constate que les organes du rameau sont déjà formés (document 4). Néanmoins, ils sont de taille très modeste comparés au rameau totalement développé (document 3). La différenciation a donc lieu avant l'ouverture du bourgeon, ce que l'on observe d'ailleurs dans le document 5. L'essentiel de la croissance des organes a lieu après l'ouverture du bourgeon.

Question 5. Écrivez un court texte concernant la différenciation et la croissance chez les plantes (doc. 1 à 6).

Les plantes, lorsqu'elles se développent, subissent deux phénomènes associés : la croissance et la différenciation. La formation de nouvelles cellules a lieu au niveau de régions localisées notamment aux apex de la racine de la tige : les méristèmes (document 2 et 5). Ces nouvelles cellules vont ensuite s'allonger (croissance) et se spécialiser (différenciation). C'est ainsi que les cellules méristématisques deviennent des cellules de racines dans la racine (document 2) et les cellules issues du méristème apical de la tige vont former des tissus vasculaires ou des feuilles par exemple (document 5). Ces mécanismes que l'on observe à l'échelle cellulaire (document 2 et 5) s'observent également à l'échelle macroscopique (document 1, 3 et 4) : la différenciation de nouveaux organes dans un bourgeon (document 4) est suivie, après l'ouverture de celui-ci, par une croissance donnant naissance à un rameau structuré d'unités répétées des mêmes organes : les phytomères (document 3).

Unité 5

Question 1. Quel phénomène les expériences de cette double page cherchent-elles à étudier (doc. 1 et 2) ?

Ces expériences cherchent à étudier la croissance orientée vers la lumière de coléoptiles, des organes de jeunes germinations de céréales.

Question 2. Que nous apprennent les expériences de Darwin et Darwin, 1880 (doc. 1, 2 et 3) ?

La première expérience, à gauche, est une expérience témoin positif. La deuxième expérience montre que la section de l'apex empêche la croissance orientée vers la lumière. La troisième et la quatrième expérience montrent que l'apex doit percevoir la lumière pour permettre la croissance orientée. La dernière expérience montre que seul l'éclairage de l'apex suffit à provoquer une croissance orientée.

Question 3. Quelle(s) information(s) nouvelle(s) apporte(nt) les expériences de Boysen-Jensen en 1913 (doc. 3) ?

La première expérience, à gauche, est un témoin positif. La deuxième expérience montre qu'un apex sectionné et replacé sur le coléoptile en intercalant un morceau de gélose produit la même courbure. Cela suggère qu'il y a un messager pouvant passer dans la gélose qui induit la croissance orientée. La troisième expérience montre que ce messager ne passe pas à travers une lamelle de mica. La quatrième expérience nous apprend que le messager doit passer sur la face externe pour provoquer une courbure, et la cinquième expérience nous apprend que si l'on bloque ce passage sur la face externe, la croissance orientée n'a pas lieu. Cela suggère que le messager est réparti non uniformément dans la partie haute du coléoptile et que cette répartition non uniforme est responsable de la croissance orientée.

Question 4. Montrez en quoi les expériences de Söding et Went sont décisives pour déterminer la nature de l'information à l'origine de la croissance orientée (doc. 4 et 5).

Dans les expériences de Söding, l'apex sectionné n'est pas replacé sur le coléoptile : c'est l'expérience témoin (négatif) qui montre l'absence de croissance du coléoptile dans ces conditions. La deuxième expérience, montre que l'on peut retrouver une croissance du coléoptile si l'on replace l'apex en contact avec le reste du coléoptile (témoins positifs). La troisième et la quatrième expériences montrent que le mica et le platine ne permettent pas au messager responsable de la croissance de passer de l'apex vers le reste du coléoptile, ce qui suggère que ce messager est plutôt de nature chimique (pas électrique). La cinquième expérience, utilisant du beurre de cacao intercalé entre l'apex et le coléoptile, montre que le messager qui permet la croissance dans l'expérience 2 ne peut pas diffuser à travers le beurre de cacao, ce dernier étant lipidique, on peut supposer que le messager est hydrophile. Cela est confirmé par la sixième expérience, puisque lorsque de la gélose, de nature hydrophile, est intercalée entre l'apex et le reste du coléoptile, la croissance reprend comme dans l'expérience 2.

Les expériences de Went montrent que de la gélose qui a été au contact d'un apex peut, une fois replacée sur un coléoptile sectionné, produire le même effet que l'apex lui-même. La gélose stocke donc le messager, ce qui renforce l'idée d'une substance chimique hydrophile, cette dernière pouvant s'accumuler dans la gélose.

Question 5. Décrivez comment l'auxine peut induire une croissance orientée des coléoptiles (doc. 1 à 6).

L'auxine est une molécule hydrosoluble produite dans l'apex du coléoptile des céréales (document 5). Elle diffuse dans le coléoptile et est responsable de sa croissance (document 4). Lorsque l'apex du coléoptile reçoit une lumière anisotrope, il semble que l'auxine ne soit plus répartie uniformément dans la partie supérieure du coléoptile (document 3). Cette répartition inégale est liée à une croissance inégale des deux faces (éclairés et non éclairés) des coléoptiles permettant sa croissance orientée vers la lumière (document 6).

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

1. Comment réagit le nénuphar à une élévation du niveau d'eau ?

D'après le document 2, on observe, avant la submersion, que l'âge des feuilles est principalement de quatre jours au plus. Tandis que 10 jours après la submersion, on observe qu'il y a surtout des feuilles plus jeunes que quatre jours. Dans le document 4, si l'élévation du niveau d'eau est graduelle, le nénuphar va produire beaucoup de nouvelles feuilles. On constate par ailleurs (document 3) que les pétioles des fleurs les plus jeunes s'allongent, ce qui permet à celle-ci de rester en dehors de l'eau.

2. Comment varie cette réaction selon les paramètres de la submersion ?

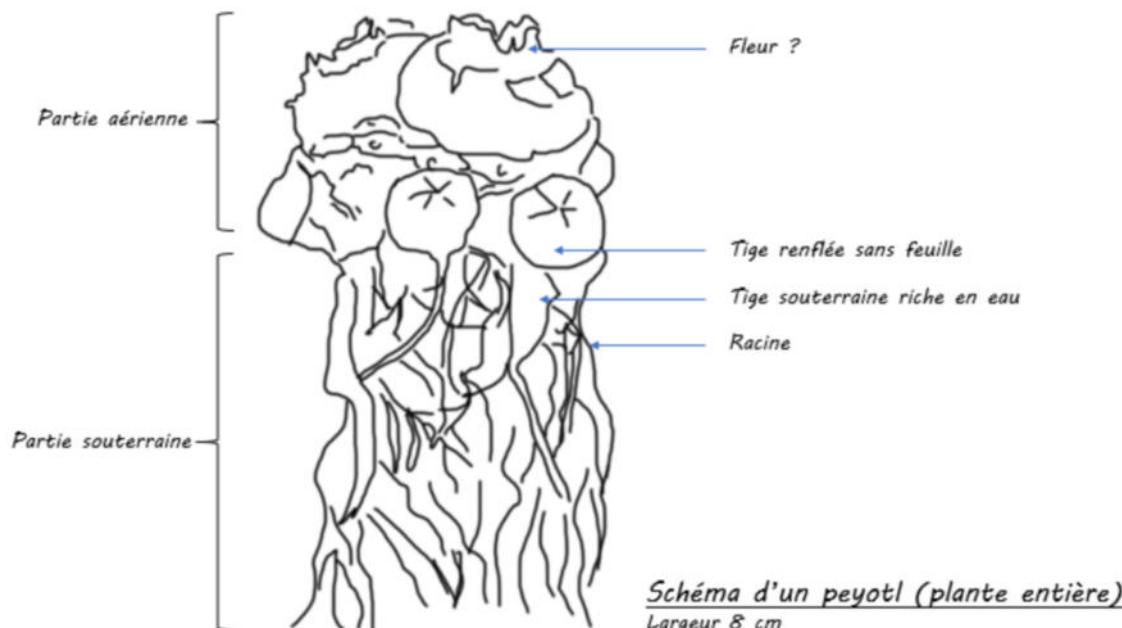
Les documents indiquent des différences de réaction selon si l'élévation du niveau d'eau est graduelle ou rapide. Si elle est graduelle la croissance en longueur du pétiole augmente progressivement au cours du temps et le nombre de nouvelles feuilles produites également. Au contraire, si l'élévation du niveau d'eau est rapide il y a une augmentation rapide de la longueur du pétiole jusqu'à une taille maximum d'environ 300 cm puis cette taille n'augmente plus. Le nombre de nouvelles feuilles, lui, n'augmente pas.

3. Proposez une hypothèse pour expliquer en quoi cette réaction favorise la survie des nénuphars.

Par ces différentes réactions, on constate que le nénuphar peut maintenir une part importante de sa surface foliaire à la surface de l'eau, ce qui lui permet de capturer probablement davantage de lumière et favorise sa survie lorsque le niveau d'eau s'élève.

Exercice 3

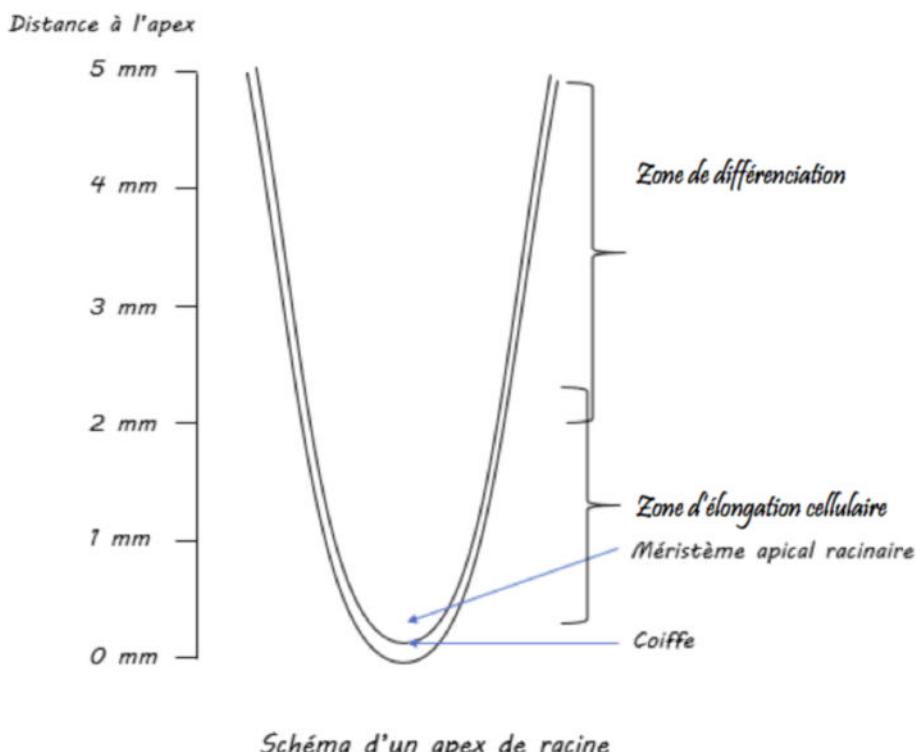
1. Réalisez un schéma de la plante et nommez les différentes parties que vous observez.



2. Expliquez en quoi sa morphologie paraît adaptée à son milieu de vie.

Parce qu'elle vit dans le désert, cette plante dispose probablement de peu d'eau. L'absence de feuilles réduit ses pertes en eau par les stomates. L'eau peut être stockée en réserve dans les tiges aériennes ou souterraines. Son allure en boule limite la surface d'évaporation (par rapport au volume de la plante). Sa ressemblance avec des cailloux lui permet d'échapper à des herbivores à la recherche de plantes riches en eau dans cet environnement.

Exercice 4



Exercice 5

On constate sur le document 1 qu'une fraise dont on a retiré les akènes ne grossit pas. En revanche, une fraise aux akènes retirés à laquelle on a ajouté artificiellement de l'auxine retrouve une taille comparable témoin (fraise non modifiée). On peut donc supposer que les akènes jouent un rôle dans la taille finale de la fraise notamment par l'intermédiaire de l'auxine (dont on sait par ailleurs qu'elle participe à la croissance des organes végétaux).

Le document 2 montre que la teneur en auxine est surtout importante lorsque le réceptacle est vert et que cette auxine est principalement contenue dans les akènes. On peut donc supposer que les akènes produisent de l'auxine lorsque le réceptacle est vert ce qui contribue à sa croissance jusqu'à son stade rouge.

Exercice 6

Connaissances

Les plantes vivent fixées. Elles supportent donc les contraintes de l'environnement sans pouvoir se déplacer. Leur morphologie et leur anatomie est très variable et présente des adaptations à l'environnement local (influence du manque d'eau, de la disponibilité en nutriments, de la température, etc.)

Informations pouvant être tirées des documents

Des espèces apparentées présentent des morphologies extrêmement variables. Chez les euphorbes on peut corrélérer cette morphologie au milieu de vie. Les formes de prairie sont ramifiées, de petite taille et ne semblent pas porter d'importants organes de stockage d'eau. En revanche, les formes des déserts sont peu ramifiées, avec des feuilles réduites à des épines et des tiges portant un épiderme

épais évitant l'évaporation. Ces caractères limitent les pertes d'eau. Par ailleurs, les tiges stockent de l'eau. Cette morphologie est favorable à la vie dans un milieu aride.

Exercice 7

Connaissances

Les apex produisent de l'auxine contribuant à la croissance des organes. La répartition inégale de l'auxine consécutive à un facteur de l'environnement anisotrope permet une croissance orientée de ces organes.

Informations pouvant être tirées des documents

La racine présente une croissance orientée vers le bas. Une rotation artificielle de 90° d'une jeune racine provoque sa courbure par croissance orientée vers le bas. Dans le même contexte, l'ablation de la coiffe racinaire a pour conséquence une absence de courbure.

Dans d'une racine témoin, l'auxine est répartie uniformément de part et d'autre de la racine en croissance tandis que dans une racine ayant subi une rotation de 90° on observe davantage d'auxine sur la face inférieure que sur la face supérieure. Celle-ci semble être responsable d'une inhibition de la croissance sur la face inférieure provoquant la courbure et la croissance orientée.

Exercice 8

Les plantes peuvent nouer au niveau de leurs racines des symbioses avec des champignons mycorhiziens formant des structures particulières : les mycorhizes. Les documents proposés présentent des expériences montrant l'importance des mycorhizes dans les flux de matières pour la plante (documents 1, 2 et 3) et les conséquences dans la production de biomasse (document 4).

Commençons par analyser chaque expérience.

Concernant le phosphore (document 1), on constate, dans l'expérience témoin, qu'il y a 20 fois plus de ^{33}P absorbé dans la plante que de ^{32}P . On peut donc en déduire que dans cette expérience, la quasi-totalité de la radioactivité est prélevée dans le compartiment de droite par les racines.²

Dans le dispositif avec champignons, on constate que l'absorption des deux isotopes est similaire. Le développement des filaments étant le même dans les deux compartiments, cela suggère que l'absorption du phosphore est entièrement réalisée par les champignons et n'est pas effectué par les racines.

Lorsque l'on compare la radioactivité du ^{32}P entre le dispositif sans champignon et le dispositif avec champignons, on observe une multiplication par 29 de la quantité de phosphore absorbé. Cela montre ainsi que le champignon seul est capable d'absorber de grandes quantités de phosphore pour la plante. Concernant l'azote (document 2), on constate que, très rapidement, les racines mycorhizées absorbent de grandes quantités de ^{15}N (trois fois plus) comparé au dispositif témoin. Avec quelques jours de retard (un peu moins d'une dizaine), les tiges contiennent à leur tour des teneurs similaires en ^{15}N .

On constate que dans le dispositif témoin (sans champignon), il y a une légère augmentation de la teneur en ^{15}N des tiges et des racines qui peut s'expliquer par une diffusion de ^{15}N d'un compartiment à l'autre. On peut donc en déduire que les champignons dans le compartiment sans racines prélèvent du ^{15}N et le transmettent au plant de maïs.

Concernant le carbone (document 3), d'après les expériences B et B' et l'information selon laquelle le glucose n'a pas été dégradé par le champignon, on en déduit que le champignon n'absorbe pas le glucose marqué. Par ailleurs, dans les expériences A et A', on constate que de la matière organique,

² **Remarque :** La présence d'un peu de radioactivité ^{32}P peut s'expliquer soit par des racines très fines qui arrivent à passer le grillage réservé aux filaments du champignon (compartiment de gauche), soit parce que du ^{32}P a diffusé vers le compartiment central ou le compartiment de droite.

différentes du glucose, est présente à la fois dans la racine et dans le champignon. Concernant la racine, elle a absorbé (sans doute par l'intermédiaire des filaments situés dans ses tissus) le glucose présent et l'a transformé en d'autres molécules organiques. Concernant le champignon, le résultat est plus étrange puisque l'on ne s'attend pas à trouver des molécules organiques issues du glucose marqué puisque le champignon seul n'est pas capable de l'absorber. La seule possibilité est que le champignon ait reçu de la racine de carotte (et des filaments qu'elle contient) le glucose marqué que celle-ci a absorbée. Il y a donc flux de carbone de la plante (ou des filaments qu'elle contient) vers le champignon seul qui permet à celui-ci de synthétiser ces différentes molécules organiques.

Les conséquences sur la masse des plantes (document 4) sont assez variables. En effet, on constate que la présence de mycorhize multiplie par plus de 100 la masse des carottes, tandis qu'elle n'a quasiment pas d'influence sur celle du blé. Pour les autres cultures, on trouve des valeurs assez variables (une augmentation d'un facteur 20 environ pour le poireau et 15 environ pour la fève). La symbiose mycorhizienne joue donc un rôle important dans la production de biomasse.

En conclusion, on constate l'importance des interactions mycorhizienne dans l'absorption de l'azote et du phosphore. La symbiose mycorhizienne est également corrélée à une augmentation importante de la biomasse chez de nombreuses plantes cultivées. Les documents présentés ici permettent donc de montrer que les interactions mycorhiziennes sont des symbioses dont la plante profite pour sa nutrition et sa synthèse de matière organique.

Chapitre 9. La plante productrice de matière organique

Ce chapitre permet de remettre en cohérence un certain nombre de connaissances sur le métabolisme des plantes que les élèves ont déjà abordées. En particulier, la spécialisation des cellules et leur métabolisme (SVT 2^e) et la conversion de l'énergie par photosynthèse (enseignement scientifique 1^e). La connaissance des enzymes (SVT 1^e) leur sera également utile. Ce chapitre s'inscrit bien sûr aussi dans la continuité du chapitre 8 de terminale (organisation fonctionnelle : surface d'échange et flux des sèves) puisqu'il détaille les fonctions de nutrition et les flux de matières (notamment internes). Il offre de nombreuses occasions d'aborder la démarche expérimentale : approche historique de la photosynthèse, discussions sur les protocoles expérimentaux, passage des faits à leurs interprétations, conceptualisation des résultats de plusieurs expériences, etc.

L'**unité 1** aborde la face claire de la photosynthèse sous un angle historique à travers quelques-unes des principales expériences ayant permis de comprendre le rôle de la lumière dans la synthèse de la matière organique. Les documents correspondants sont organisés dans la page dans un globalement ordre chronologique. Le dernier document fournit une synthèse schématique.

La seconde partie de la photosynthèse est décrite dans **l'unité 2**. On retrouve, là encore, des expériences classiques avec une attention particulière pour les expériences de Calvin et Benson dont on retrouve la synthèse dans le dernier document de la double page.

Dans les unités suivantes, le choix a été fait de proposer un aperçu de la diversité moléculaire des plantes en présentant des fonctions associées aux différentes molécules synthétisées : croissance, réserves énergétiques, interactions entre espèces.

Les documents de **l'unité 3** montrent que le carbone absorbé au niveau des feuilles est utilisé dans toute la plante, notamment pour la constitution des parois végétales. Ces documents sont l'occasion de présenter deux molécules essentielles des écosystèmes par leur biomasse et leur fonction : la cellulose et la lignine.

La page gauche de **l'unité 4** insiste sur la constitution de réserves sous forme d'amidon chez la pomme de terre, avec des approches cellulaires et tissulaires. La page de droite montre l'importance de ces réserves dans les interactions avec des animaux, humains compris.

Enfin, **l'unité 5** traite de l'importance des tanins dans la défense des plantes et d'autres métabolites secondaires (anthocyanes en l'occurrence) dans la couleur des fleurs et leur attractivité pour les coloniseurs.

Thème 3. De la plante sauvage à la plante domestiquée

Connaissances	Capacités, attitudes
<p>Les parties aériennes de la plante sont les lieux de production de matière organique par photosynthèse. Captée par les pigments chlorophylliens au niveau du chloroplaste, l'énergie lumineuse est convertie en énergie chimique par la photolyse de l'eau, avec libération d'O₂ et réduction du CO₂ aboutissant à la production de glucose et d'autres sucres solubles. >Unités 1 et 2</p> <p>Ceux-ci circulent dans tous les organes de la plante où ils sont métabolisés, grâce à des enzymes variées, en produits assurant les différentes fonctions biologiques dont : la croissance et le port de la plante (cellulose, lignine) ; le stockage de la matière organique (saccharose, amidon, protéines, lipides) sous forme de réserves dans différents organes, qui permet notamment de résister aux conditions défavorables ou d'assurer la reproduction ; les interactions mutualistes ou compétitives avec d'autres espèces (anthocyanes, tanins). > Unités 3 à 5</p>	<p>Étudier et/ou mettre en œuvre des expériences historiques sur la photosynthèse. > Unité 1</p> <p>Réaliser et observer des coupes dans des organes végétaux pour repérer une diversité de métabolites. > Unités 2 à 5</p> <p>Mettre en évidence expérimentalement la présence d'amidon dans les chloroplastes et les amyloplastes de réserve-dans des organes spécialisés (graine, fruit, tubercules...). > Activité expérimentale</p> <p>Mettre en œuvre une coloration afin d'identifier la lignine et la cellulose et d'analyser leur distribution. > Unité 3</p> <p>Réaliser une chromatographie de pigments végétaux. > Activité expérimentale</p> <p>Extraire, organiser et exploiter des informations sur les effets anti-phytophages, antibactériens ou antioxydants des tanins. > Unité 5</p>

Compétences et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
<p>Pratiquer des démarches scientifiques</p> <ul style="list-style-type: none"> Formuler et résoudre une question ou un problème scientifique. Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution. Observer, questionner, formuler une hypothèse, en déduire ses conséquences testables ou vérifiables, expérimenter, raisonner avec rigueur, modéliser, argumenter. Interpréter des résultats et en tirer des conclusions. Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique. Comprendre qu'un effet peut avoir plusieurs causes. Discerner, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 et 2 • Activités expérimentales • Unité 1 • Unité 5 • Unités 1 et 2 • Unités 1 et 2 • Unités 1 à 3 ; objectif oral

Concevoir, créer, réaliser	<ul style="list-style-type: none"> Identifier et choisir des notions, des outils et des techniques, ou des modèles simples pour mettre en œuvre une démarche scientifique. Concevoir et mettre en œuvre un protocole. 	<ul style="list-style-type: none"> Unité 1 Unités 1 à 4, activités expérimentales
Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre	<ul style="list-style-type: none"> Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information. 	<ul style="list-style-type: none"> Unité 1 à 4
Pratiquer des langages	<ul style="list-style-type: none"> Communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant. Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique. 	<ul style="list-style-type: none"> Unités 1 à 3 Unités 2 et 3
Adopter un comportement éthique et responsable	<ul style="list-style-type: none"> Comprendre les responsabilités individuelle et collective en matière de préservation des ressources de la planète (biodiversité) et de santé 	<ul style="list-style-type: none"> Objectif oral

Choix pédagogiques

Unité 1

> Cette première unité aborde la face claire de la photosynthèse. Le choix a été fait d'insister sur la dimension historique et expérimentale de la compréhension des différents aspects de ce phénomène. Les enseignants qui le souhaitent pourront travailler (selon le temps qu'ils veulent/peuvent y consacrer) de nombreux aspects d'histoire des sciences et d'épistémologie (construction collective de la connaissance scientifique, ce que les faits disent et ne disent pas, expériences contredisant la théorie, poids des préjugés, etc.).

> Dans le **document 1**, on rappelle l'une des expériences clé de Joseph Priestley, permettant de mettre en évidence de la façon la plus simple qui soit, la complémentarité entre les deux voies métaboliques produisant et consommant le dioxygène atmosphérique : la photosynthèse et la respiration. Cette expérience, qui paraît modeste, peut être le prétexte à des développements intéressants avec les élèves : flux de matières à l'échelle de l'organisme ou du globe, cycle du dioxygène atmosphérique, cycle du carbone, théorie du phlogistique, découverte du dioxygène, etc. Il sera nécessaire d'insister auprès des élèves sur la complémentarité respiration/photosynthèse. Tout d'abord parce qu'elle montre le lien entre des voies métaboliques étudiées à l'échelle de l'organisme et leurs conséquences à l'échelle des écosystèmes et de l'atmosphère globale (question des flux de matière en écologie). Ensuite, parce qu'elle est au cœur des enjeux climatiques contemporains concernant d'émission des gaz à effet de serre et du stockage de carbone à long terme par la végétation (complémentarité dans le cycle du carbone et pas seulement de l'oxygène).

> Cette expérience réalisée par J. Priestley s'inscrit dans un ensemble d'expériences plus globales de remise en cause de la théorie du phlogistique (théorie qui stipulait que la combustion d'un corps

résultait de la libération d'un « principe combustible » appelé « phlogistique » ; Priestley n'a pas remis en cause cette théorie). D'autres expériences similaires à celles du document pourront être mentionnées. J. Priestley a ainsi pu rallumer, sans ouvrir la cloche (à l'aide d'une loupe), une bougie placée avec un pied de menthe, 27 jours après que la bougie se soit éteinte, montrant ainsi que les végétaux permettent de « régénérer l'air vicié » par la respiration.

Quelques éléments bibliographiques sont disponibles aux adresses suivantes :

- Sur J. Priestley :

www.societechimiquedefrance.fr/joseph-priestley-1733-1804.html

- Sur J. Priestley, la théorie du phlogistique et la découverte de l'oxygène :

www.fondation-lamap.org/sites/default/files/upload/media/minisites/projet_europe/PDF/prieHistfr.pdf

> Comme pour le document 1, les expériences de C. Bonnet et J. Ingenhousz sont des grands classiques de l'histoire des sciences. Alors que Charles Bonnet pense que les bulles qu'il observe sont dues à l'augmentation de la température de l'eau à la fin de journée, Jan Ingenhousz est le premier à montrer le rôle de la lumière dans la génération de ses bulles. Dans son ouvrage *Expérience sur les végétaux*, il cite et reconnaît l'importance des travaux de Priestley (et critique ceux de C. Bonnet). On pourra utiliser des extraits originaux de leurs publications disponibles gratuitement en livre numérique : Bonnet, C. 1754. *Recherches sur l'usage des feuilles dans les plantes* ; Ingenhousz, J. 1779. *Expériences sur les Végétaux*.

> Rappelons que les expériences de Van Helmont, non retenues ici mais présentées dans le manuel SVT 2^e (exercice 6 p. 48, chapitre 2) ont été effectuées à la même époque et peuvent prendre place dans ce corpus documentaire. C'est un exemple classique d'une expérience menée correctement et dont l'interprétation est fausse. On trouvera plus d'éléments dans cet article : ife.ens-lyon.fr/publications/edition-electronique/aster/ASTER_1992_15_85.pdf

> Le **document 3** présente les expériences de T. Engelman. Très originales dans leur réalisation, elles produisent ce que l'on peut considérer comme le premier spectre d'action photosynthétique. On pourra alors faire le lien avec la décomposition de la lumière blanche et la notion de longueur d'onde vsu en physique. On trouvera plus d'informations sur ces expériences : ressources.unisciel.fr/photosynthese/co/grain_78.html

> Le **document 4** rappelle l'isolement de la chlorophylle au début du XIX^e siècle par P.-J. Pelletier et J. B. Caventou. Les études sur cette molécule ont d'ailleurs été l'objet de nombreux prix Nobel, comme le rappelle l'article suivant : www.societechimiquedefrance.fr/chlorophylles.html. Le document est surtout l'occasion de présenter le spectre d'absorption des différents pigments photosynthétiques.

> Le **document 5** montre les expériences de S. Ruben et M. Kamen, fondées sur les isotopes lourds. Ces expériences clé ont permis de déterminer l'origine du dioxygène, dont on ne pouvait savoir *a priori* s'il provenait du dioxyde de carbone ou de l'eau consommée par la photosynthèse. Cette expérience fondamentale est à l'origine de la compréhension de la photolyse de l'eau, elle doit être associée aux réactions d'oxydo-réduction de la photosynthèse. On trouvera plus d'informations à l'adresse suivante : uel.unisciel.fr/biologie/module1/module1_ch02/co/apprendre_ch2_11.html

> Le **document 6** propose une synthèse des différentes observations métaboliques de la double page, en montrant spécifiquement la production de coenzymes réduits et d'ATP, ces molécules faisant le lien avec la seconde partie de la photosynthèse (unité 2) permettant l'assimilation du carbone.

Unité 2

> Cette unité aborde la seconde partie de la photosynthèse concernant l'assimilation du carbone. Là encore, une large place est faite aux données expérimentales en insistant notamment sur le cycle de Calvin-Benson. Notons que d'autres expériences concernant le sujet ont été décisives mais sont difficilement accessibles au niveau terminale dans les limites du programme : expériences d'Emerson et Arnold (1932), expériences de Hill (1937).

> Le **document 1** permet de placer la question centrale de cette double page : comment expliquer que des feuilles placées à la lumière produisent de l'amidon ? On pourra rappeler que l'amidon, comme toutes macromolécules biologiques, est constitué principalement de carbone, lequel a comme origine le dioxyde de carbone atmosphérique. La question posée devient donc : comment les plantes assimilent-elles le dioxyde de carbone atmosphérique pour synthétiser des macromolécules biologiques telles que l'amidon ? Les manipulations avec le lugol, facilement accessibles en classe, devront être liées avec cette question des flux de carbone.

> Le **document 2** prend le temps de montrer le dispositif expérimental utilisé par M. Calvin et A. Benson. La compréhension de ce dispositif expérimental montre plusieurs éléments :

- les découvertes les plus décisives nécessitent des protocoles expérimentaux ingénieux et originaux (simples ou complexes selon les cas, cf. unité 1) ;
- l'étude des réactions métaboliques est limitée par leur rapidité. Le principal apport du dispositif « Lollipop » est justement, grâce à une culture liquide pouvant être « tuée » quasiment instantanément la capacité à étudier des réactions très courtes ;
- le marquage radioactif du carbone (comme avec les isotopes lourds de l'oxygène de Ruben et Kamen dans l'unité 1) est un élément fondamental de compréhension des voies métaboliques.

On trouvera davantage d'explications sur le dispositif expérimental de Calvin-Benson aux adresses suivantes :

- www.biologydiscussion.com/photosynthesis/calvin-cycle-meaning-features-and-enzymes/39939
- ressources.unisciel.fr/photosynthese/co/grain_28.html

> Les **documents 3 et 4** permettent d'analyser les résultats des expériences de Calvin et Benson, et par la suite de proposer un cycle simplifié (**document 5**). L'analyse des graphiques du document 4 nécessite un petit peu de temps. On pourra préciser aux élèves que l'accumulation d'une molécule (RuBP dans l'expérience 1) signifie que cette molécule ne subit plus de réactions de transformation : elle s'accumule car la réaction dont elle est le substrat cesse (en l'occurrence lorsque la fourniture de dioxyde de carbone marqué cesse aussi). On peut donc en déduire que le RuBP est le substrat d'une réaction qui utilise également du dioxyde de carbone. Le même type de raisonnement peut être pratiqué avec l'APG : la diminution marquée de l'APG lorsque la fourniture en dioxyde de carbone marqué cesse montre que l'APG est le produit d'une réaction utilisant le dioxyde de carbone. L'analyse de l'expérience 2 utilise le même principe, et permet de reconstituer la seconde partie du cycle qui dépend, elle, de l'apport de lumière.

> Dans le **document 5**, cet apport de lumière correspond aux produits de la phase claire (notés « énergie ») et apportés sous forme d'ATP et de coenzymes réduits. La première partie du cycle (déduite de l'expérience 1 du document 4) correspond à la partie supérieure du cycle du document 5. La partie inférieure du cycle correspondant aux informations apportées par l'expérience 2 du document 4.

> Des rappels sur les principales expériences historiques traitant de la photosynthèse peuvent être trouvé sur rnbio.upmc.fr/physio_veg_photosynthese_07_doublereaction_3

Unité 3

- > L'unité 3 traite de l'importance des molécules associées à la croissance et au port des plantes.
- > Le **document 1** montre que l'absorption du carbone décrite dans l'unité 2, elle a certes lieu dans les organes photosynthétiques, mais permet la production de molécules carbonées qui vont être ensuite distribuées dans tout le reste de la plante (avec une concentration plus marquée au niveau des gaines des feuilles chez cette poacée).
- > Les autres documents de l'unité 3 insistent sur deux molécules essentielles pour la croissance et le port des plantes : la cellulose et la lignine. Le **document 2** fournit un exemple de coloration classique carmin-vert d'iode permettant de distinguer les tissus selon leur richesse en cellulose ou en lignine. Notons qu'il s'agit bien de richesses relatives et non pas de parois ne seraient constituées que de cellulose ou de lignine.
- > Les **documents 3 et 4** sont l'occasion de montrer la paroi pecto-cellulosique, caractéristique importante des cellules végétales et souvent méconnue des élèves. Les aspects structuraux et fonctionnels sont précisés à travers les microphotographies du document 3 et les schémas explicatifs du document 4. On pourra insister sur l'importance de la cellulose pour la biosphère (essentiel de la biomasse), les cycles de la matière (stockage du carbone, formation de roches carbonées), structuration des sols (à l'origine, avec la lignine, des humus), les utilisations humaines (construction, ameublement, chauffage, papier, textile, fibres alimentaires), etc. On pourra également préciser que la cellulose, comme l'amidon est un polymère de glucose, mais contrairement à celui-ci elle n'est pas une ressource alimentaire pour les humains du fait de sa faible digestibilité (on sait néanmoins depuis quelques années qu'elle est en partie dégradée par le microbiote intestinal humain et est à l'origine d'acides gras volatiles aux fonctions variées). L'amidon constitue, lui, plus de la moitié des apports énergétiques alimentaires de l'humanité. Ces questions pourront être abordées à travers l'**Objectif oral** « Les humains et la photosynthèse » p. 234.
- > Les **documents 6 et 7** montrent, à l'échelle de l'organisme (un arbre en l'occurrence), l'importance de la cellulose et de la lignine dans la constitution des tissus et le port. Le fait que ces deux molécules constituent l'essentiel du bois sera abordé à nouveau dans l'unité 5.
- > Sources :
- Carpita, N. C., & Gibeaut, D. M. (1993). Structural models of primary cell walls in flowering plants: consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth. *The Plant Journal*, 3(1), 1-30.
 - Cosgrove, D. J. (2005). Growth of the plant cell wall. *Nature reviews molecular cell biology*, 6(11), 850.

Unité 4

- > L'unité 4 aborde le stockage de matières organiques dans les organes de reproduction asexuée ou dans les structures de dissémination (fruits et graines), avec une attention particulière pour l'amidon en page de gauche et sur les conséquences en termes d'interaction en page de droite.
- > Le **document 1** montre la répartition granulaire de l'amidon dans des organes cellulaires spécifiques : les amyloplastes (chloroplastes modifiés). Cette observation microscopique est facile à réaliser avec des élèves et peut être l'occasion de comparer différents organes de stockage et différentes formes de stockage. Pour cela, on pourra s'appuyer sur la proposition d'**Activité expérimentale** « les réserves des graines » p. 233.
- > Le **document 2** montre la formation des tubercules de pommes de terre et l'accumulation progressive de molécules carbonées apportées par les tissus conducteurs. Notons que la couleur claire

des tissus ne signifie pas qu'ils ne contiennent pas de molécules carbonées, mais seulement pas de carbone radioactif (c'est-à-dire de molécules carbonées assimilées dans le temps de l'expérience).

Source : Viola, R., Roberts, A. G., Haupt, S., Gazzani, S., Hancock, R. D., Marmiroli, N., ... & Oparka, K. J. (2001). Tuberization in potato involves a switch from apoplastic to symplastic phloem unloading. *The Plant Cell*, 13(2), 385-398.

> Les documents 3 et 4 montrent l'importance des organes (en l'occurrence les noisettes et les cerises) stockant des ressources énergétiques pour la plante elle-même (dissémination de sa descendance) et pour les animaux qui s'en nourrissent. Le **document 3** montre la capacité des écureuils à retrouver des noisettes cachées : 60 % de leurs propres noisettes sont retrouvées, environ 30 % sont retrouvés par d'autres écureuils, il reste donc environ 10 % des noisettes cachées qui pourront germer.

> Le **document 4** montre l'importance quantitative de la consommation des cerises par les hérissons, renards et blaireaux (comparée aux quantités de cerises qui tombent au sol sous l'arbre). Contrairement à l'exemple de l'écureuil dans le cas de la noisette, qui détruit les embryons en mangeant ces dernières, les consommateurs de cerises n'affectent pas le pouvoir germinatif des graines, mais contribuent à la dissémination de celles-ci par endozoochorie. Les élèves doivent en déduire que la dépense énergétique liée à la synthèse de la chair des cerises est un investissement parental favorisant la dissémination des graines tout en profitant aux animaux disséminateurs. On comprend ainsi à quel point l'énergie solaire stockée sous forme de réserves énergétiques alimente non seulement les futures plantules descendant de l'arbre mère, mais également une diversité d'espèces animales associées à ces arbres jouant à la fois un rôle de prédateur et de disséminateurs des fruits et graines.

> Le **document 5** présente un dernier exemple d'organes de stockage avec la racine de la betterave sucrière, cultivée spécifiquement pour en extraire le saccharose pour l'alimentation humaine. Cette plante stocke le saccharose dans un parenchyme xylémien particulièrement abondant puisque cette espèce présente des cambiums surnuméraires. Notons qu'il existe de nombreuses autres plantes stockant du saccharose : carottes, oignons, etc. La plante exploitée pour faire du sucre de table est principalement la canne à sucre. En région tropicale (principalement d'Asie du Sud-Est), on trouve également du sucre de palme (produit par une autre espèce de palmier que l'huile, *Borassus flabellifer*). On peut également faire remarquer aux élèves que l'ensemble des organes évoqués dans cette double page (pommes de terre, noisettes, cerises, betterave) est cultivé et utilisé dans l'alimentation humaine pour leur richesse en matière organique comestible.

> On trouvera plus d'informations sur la plante alimentaire et ses molécules constitutives dans Reboulard, S. *Le défi alimentaire, écologie, agronomie, avenir*. Belin éducation, 2018 (chapitre 6 « La plante alimentaire », pp. 151-164).

Unité 5

> L'unité 5 aborde les molécules organiques produites par les plantes et impliquées dans leurs interactions interspécifiques à travers deux fonctions : la lutte contre les bioagresseurs (documents 1 à 5) et la communication avec les mutualistes (documents 6 et 7). Il s'agit bien sûr uniquement d'un très bref aperçu de ces questions. Il existe en effet autant de sujets d'études possibles que d'interactions chez les plantes, toutes impliquant des molécules d'origine photosynthétique (comme ressources convoitées, comme récompense, comme signal chimique d'attraction de répulsion, comme molécules de défense, etc). On pourra d'ailleurs trouver d'autres exemples dans les **exercices** du chapitre.

> Le **document 1** montre une des utilisations humaines des tanins : la protection des cuirs (après tannage des peaux). L'action antibactérienne et antifongique des dérivés phénoliques (dont font partie les tanins) est également abordée à travers le **document 5**, qui aborde la pérennité du bois conservé en milieu sec. Ce document peut lui-même être mis en lien avec la constitution des troncs abordés

dans l'unité 3, document 7. Sur l'importance des tanins en écologie et pour les activités humaines, on pourra lire : Selosse M.-A. *Les goûts et les couleurs du monde. Une histoire naturelle des tanins, de l'écologie à la santé*. Actes Sud, 2019.

> Les documents 2 et 3 montrent que les tanins ont également une action de défense des graines en retardant le développement d'un insecte les attaquant, la bruche du haricot.

Source : Boughdad, A., Gillon, Y., & Gagnepain, C. (1986). Influence des tanins condensés du tégument de fèves (*Vicia faba*) sur le développement larvaire de *Callosobruchus maculatus*. *Entomologia experimentalis et applicata*, 42(2), 125-132.

> Toujours sur le sujet des tanins, le document 4 rapporte l'anecdote classique concernant l'élévation de la concentration, des tanins dans des feuilles d'acacia du Transvaal (Afrique du Sud) suite à une importante pression de broutage par des koudous. Cette élévation de la teneur en tanins des feuilles augmentera en retour la mortalité des koudous. Notons que cette observation est souvent associée à un exemple de communication entre arbres par des phytohormones volatiles. Ce dernier élément n'a jamais été démontré même s'il a été rapporté de nombreuses fois. Pour plus d'informations on pourra lire cet article : www.tela-botanica.org/2019/03/le-koudou-et-lacacia-histoire-et-analyse-critique-dune-anecdote/

> Les documents 6 et 7 décrivent un exemple de changement de couleur de fleurs suite à la pollinisation. Ce type de « signal honnête » est fréquent chez les plantes entomogames. En l'occurrence, on constate que ce changement de couleur est corrélé également à une réduction des récompenses associées (quantité de nectar fourni par la fleur) et semble être rapidement compris et appris par les différents polliniseurs.

Source : L. F. Delph & C. M. Lively (1985) Pollinator visits to floral colour phases of *Fuchsia excorticata*, *New Zealand Journal of Zoology*, 12:4, 599-603.

> Il est facile de trouver des fleurs (en mai-juin de préférence) qui se comportent de la même façon que les fleurs de fuchsia : pulmonaires, lupins, astragales, etc. On peut alors utiliser une goutte d'acide chlorhydrique 0,1 N sur des fleurs broyées pour les faire changer de couleur (il faut une minute environ pour voir les effets).

Corrigé des parcours « tâches complexes »

Unité 1

> Éléments de correction

La production attendue est un texte structuré. On attend donc une courte introduction et une courte conclusion ainsi qu'un développement, qui pourra se faire dans l'ordre chronologique avec les apports successifs des différentes expériences historiques.

On sera particulièrement vigilant dans l'évaluation aux points suivants :

- exploitation correcte des données expérimentales : part de l'observation et part de l'interprétation clairement identifiées ;
- mention des documents sources ;
- absence de surinterprétation (risque d'anachronisme) ;
- organisation logique de l'interprétation des expériences (chronologique *a priori*).

Notons que l'on peut également demander la production sous forme de tableau listant dans les premières colonnes les différentes expériences, leurs auteurs et les dates et dans une dernière colonne les apports de chacune dans la compréhension du processus photosynthétique (voir parcours « Pas-à-Pas » de l'unité).

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Démarche explicative	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• difficulté de faire la part des choses entre la description des résultats d'expérience et leurs interprétations• référence aux documents insuffisantes	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• articulation entre les différentes expériences maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• certains apports des expériences ne sont pas correctement exploités ou ne sont pas compris	Complets ou suffisants	
Communication Texte	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• le texte n'est pas correctement structuré	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• des maladresses dans la structuration du texte	Le texte est bien structuré pour répondre à la question

Unité 3

> Éléments de correction

La production attendue est un tableau s'appuyant sur les données de la double page. On veillera à la qualité (rédaction, pertinence) des entrées du tableau (en-tête de colonnes et en tête de lignes).

Type de molécules	Localisation cellulaire	Localisation à l'échelle de l'organisme	Fonction
Cellulose	Paroi cellulaire	Les parois de toutes les cellules	Croissance, soutien, protection mécanique, protection contre les animaux (peu digeste)
Hémicellulose, pectine	Paroi cellulaire	Les parois de toutes les cellules	Croissance
Lignine	Parois des cellules des espèces ligneuses (xylème par exemple)	Duramen des arbres par exemple	Soutien, protection chimique contre les animaux

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• les liens entre les informations fournies par les différents documents ne sont pas faits	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• mise en perspective des informations de la double page insuffisante	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• certaines informations disponibles dans les documents n'ont pas été utilisées	Complets ou suffisants	
Communication Tableau	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• difficulté de construction du tableau (lignes et/ou colonnes mal choisies)	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• des maladresses dans la structuration du tableau	Le tableau est bien structuré pour répondre à la question

Unité 4

> Éléments de correction

La production attendue est un texte. On attend une courte introduction et une courte conclusion. Le développement pourra être organisé en séparant la matière organique mise en réserve pour la plante elle-même (organe de réserve pour la mauvaise saison ; le lien avec la reproduction asexuée traitée dans le chapitre 10 est un plus) et celle accumulée pour favoriser la dissémination (récompense pour les disséminateurs) ou faciliter le développement de la jeune plantule (stockage de la graine).

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• les informations tirées des documents ne sont pas organisées de façon logique	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• le choix des connaissances est pertinent mais leur mise en cohérence est maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• certaines informations disponibles dans les documents n'ont pas été utilisées• l'utilité des réserves accumulées (pour la plante ou pour sa descendance) n'est pas bien comprise et/ ou exposée dans le texte	Complets ou suffisants	
Communication Texte	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• la syntaxe et la structuration des paragraphes ne permet pas de répondre à la question posée	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• des maladresses dans la structuration du texte	Le texte est correctement structuré pour répondre à la question

Unité 5

> Éléments de correction

La production attendue est un exposé oral. Une courte introduction et une courte conclusion sont attendues. Le développement traitera successivement des deux métabolites secondaires choisis. L'évaluation devra valoriser la qualité de la recherche Internet complémentaire. Pour cela, on veillera à :

- la mention des sources Internet utilisées ;
- la fiabilité des sources Internet utilisées ;
- la pertinence des informations collectées ;
- l'exploitation par l'élève (reformulation et adaptation au sujet) des informations collectées.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• le travail de synthèse ou de reformulation des informations n'est pas suffisant	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• la mention des sources Internet complémentaires n'est pas précisée	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• les informations fournies par les documents ne sont pas exploitées suffisamment ou correctement• les informations collectées sur les sites Internet ne sont pas fiables	Complets ou suffisants	
Communication Exposé	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• difficulté d'organisation de l'exposé• difficulté d'expression orale	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• des maladresses dans la structuration de l'exposé	L'exposé est bien structuré pour répondre à la question

Propositions corrigées de parcours pas-à-pas

Unité 1

Question 1. Décrivez et interprétez l'expérience de J. Priestley. Quelle(s) information(s) peut-on en tirer (doc. 1) ?

Dans cette expérience, J. Priestley ne fait varier qu'un seul paramètre : la présence ou non d'une plante verte. Or ce seul changement semble être à l'origine de la mort ou de la survie de la souris. Dans l'expérience témoin, sans plante verte, il est difficile de savoir la cause de la mort de la souris : asphyxie ou augmentation de la température (due au soleil ou à la bougie). Dans la deuxième expérience, on peut supposer que la plante maintient les conditions nécessaires à la survie de souris. Les plantes n'influencent pas la température d'un milieu fermé à cette échelle, on peut supposer qu'elles empêchent l'asphyxie par renouvellement de l'air.

Avec nos connaissances actuelles, on peut ajouter l'interprétation suivante. On sait que la combustion de la bougie et la respiration de la souris produisent du dioxyde de carbone. Ce dernier finit par provoquer l'asphyxie des animaux lorsqu'il est en trop forte concentration. La plante, elle, consomme du dioxyde de carbone pour la photosynthèse et produit du dioxygène. Sa présence contribue donc sans doute à maintenir un taux de dioxygène suffisant pour maintenir la souris vivante.

Question 2. Décrivez et interprétez les expériences de C. Bonnet et J. Ingelhousz. Quelle(s) information(s) peut-on en tirer (doc. 2) ?

Charles Bonnet et Jan Ingelhousz constatent ici la présence d'un gaz capable de rallumer une allumette incandescente ; il s'agit donc de dioxygène. Charles Bonnet semble considérer que la température de l'eau est un facteur favorisant l'augmentation de taille des bulles. Il note néanmoins que le coucher du soleil met fin à la production de dioxygène. On sait aujourd'hui que la présence de lumière est indispensable à la production de dioxygène par les plantes.

Question 3. Décrivez et interprétez l'expérience de T. Engelmann. Quelle(s) information(s) peut-on en tirer ?

L'algue placée dans l'obscurité est une expérience témoin négative. L'expérience du centre, avec un éclairage à la lumière blanche, est un témoin positif montrant que l'algue produit uniformément du dioxygène lorsqu'elle est uniformément éclairée. La troisième expérience montre que les bactéries attirées par le dioxygène se répartissent de façon non uniforme le long d'une algue éclairée par différentes longueurs d'onde. Il y a donc des longueurs d'onde plus favorables que d'autres à la production de dioxygène. D'après le graphique, on constate que les longueurs d'onde autour de 500 nm et autour de 680 nm montrent un maximum de production dioxygène.

Question 4. Décrivez et interprétez le spectre d'absorption des pigments photosynthétiques (doc. 4).

On constate dans tous les cas que les rayonnements bleus et rouges sont favorables à l'activité photosynthétique. Néanmoins, on observe des variations avec des pics d'absorption légèrement décalés selon les pigments. On remarque également que l'activité photosynthétique est corrélée à l'absorption par les pigments et semble correspondre à une sommation de celle-ci. Ces pigments semblent donc jouer un rôle dans l'activité photosynthétique.

Question 5. Décrivez et interprétez les expériences de S. Ruben et M. Kamen. Quelle(s) information(s) peut-on en tirer (doc. 5) ?

Dans l'expérience 1, de l'eau marquée l'oxygène lourd est fournie aux algues vertes exposées à la lumière. On constate que le dioxygène présent dans le tube continué de l'oxygène lourd. Il semble donc que l'eau soit à l'origine du dioxygène dégagé dans l'atmosphère du tube.

L'expérience 2 utilise le même protocole, mais cette fois avec des carbonates marqués à l'oxygène lourd. Le dioxygène présent dans le tube est alors marqué l'oxygène léger, ce qui suggère qu'il n'a pas pour origine les carbonates.

Question 6. Quels sont les substrats et les produits de la phase claire de la photosynthèse (doc. 5 et 6) ?

D'après ce schéma, on constate que l'eau est un substrat de la phase claire de la photosynthèse, qui va donner, sous l'influence de la lumière, un déchet, le dioxygène dégagé dans l'atmosphère. Cette photolyse de l'eau en dioxygène produit de l'ATP et des coenzymes réduits.

Question 7. Réalisez un tableau résumant l'apport de chacune des expériences mentionnées dans la double page (doc. 1 à 6).

Auteurs des expériences	Date	Principale conclusion
J. Priestley	1771	Les plantes « régénèrent » l'air produit par la combustion d'une bougie ou la respiration d'une souris.
C. Bonnet	1747	Des plantes éclairées produisent un gaz caractérisé comme étant le dioxygène
J. Ingenhousz	1780	
T. Engelmann	1884	Les chloroplastes produisent de dioxygène de façon différentielle selon les longueurs d'onde
S. Ruben et M. Kamen	1941	Le dioxygène produit par la photosynthèse a pour origine l'eau.

Unité 2

Question 1. Expliquez pourquoi la simple coloration au lugol n'est pas suffisante pour comprendre la transformation du CO₂ en molécules organiques (doc. 1 et 2).

La coloration au lugol montre la présence d'amidon dans les chloroplastes. Dans l'expérience présentée ici on sait de plus que cette présence d'amidon dépend de l'exposition à la lumière. Néanmoins on ne connaît pas l'origine des éléments chimiques, du carbone notamment, qui forment l'amidon.

Question 2. Comparez les 2 autoradiographies. Identifiez les premières molécules organiques produites par photosynthèse à partir du CO₂ (doc. 3).

D'après ces autoradiographies, il semble que la première molécule produite est l'APG, suivi par le RubP et les hexoses monophosphate.

Question 3. Décrivez l'évolution des quantités d'APG et de RuBP de l'expérience 1. À quoi peut être dû le plateau observé ? Que suggère l'évolution des concentrations lorsqu'il n'y a plus de CO₂ disponible (doc. 4) ?

On constate qu'en présence de dioxyde de carbone, les quantités de molécules atteignent un plateau ce qui suggère qu'elles sont converties en d'autres molécules (du dioxyde de carbone continuant d'être absorbé). Par ailleurs, lorsque l'apport de dioxyde de carbone est interrompu on constate une élévation brutale de la teneur en RuBP. Ce qui suggère que le RuBP s'accumule et n'est plus transformé en une autre molécule. Étant donné que la teneur en APG diminue simultanément on peut supposer que l'absence de dioxyde de carbone empêche une réaction de conversion du RuBP en APG de se produire. Cette réaction nécessite le dioxyde de carbone. On peut donc supposer que l'incorporation du CO₂ se réalise sur le RuBP et provoque la formation de l'APG : l'APG est la première substance formée par assimilation du dioxyde de carbone.

Question 4. Décrivez l'évolution des quantités d'APG et de RuBP de l'expérience 2. Que suggère l'évolution des concentrations lors du passage à l'obscurité (doc. 4) ?

La première partie de l'expérience à la lumière est similaire à l'expérience précédente (on observe un plateau qui suggère une conversion). À l'obscurité, il y a une accumulation d'APG et un effondrement de la quantité de RuBP ce qui, d'après les conclusions de l'expérience précédente, suggère que l'ensemble du stock de RuBP est converti en APG mais qu'ensuite l'APG ne peut plus redonner RuBP. Cela montre que la lumière est indispensable à la transformation de l'APG en RuBP. Ceci est certainement dû à la production d'ATP et de coenzyme réduit à la lumière, d'après ce que l'on peut tirer de l'unité 1.

Question 5. Citez les conditions nécessaires à la photosynthèse et écrire son équation bilan (doc. 1 à 5).

Pour la réalisation de la photosynthèse il est nécessaire qu'il y ait de l'eau, du dioxyde de carbone et de la lumière. Son bilan peut donc s'écrire (sans prendre en compte l'équilibre stœchiométrique) :



Unité 3

Question 1. Expliquez la répartition de la radioactivité dans une plante à qui on fournit du dioxyde de carbone radioactif au niveau d'un fragment de feuille (doc. 1).

On constate, lorsque l'on fournit du dioxyde de carbone radioactif à une partie de feuilles d'une plante, que la radioactivité est rapidement détectable dans l'ensemble de la plante avec certaines zones, comme la base des feuilles, plus marquées. Ce qui suggère que les molécules produites par la photosynthèse sont réparties par les sèves dans l'ensemble de la plante.

Question 2. Décrivez la synthèse, la localisation et la fonction de la cellulose, puis expliquez son importance (doc. 2 à 5).

La cellulose est synthétisée à proximité de la membrane plasmique des cellules côté extracellulaires par des complexes nommés cellulose synthèse utilisant du glucose intracellulaire. Les fibres de cellulose constituent ainsi une part importante de la paroi des cellules végétales qu'elles contribuent à protéger et à soutenir (protection mécanique).

Question 3. Quels sont les points communs et les différences entre cellulose et lignine (doc. 6 et 7) ?

La lignine est synthétisée à partir d'acides aminés, eux-mêmes produits à partir des glucides photosynthétiques. Elle aussi est présente dans les parois végétales qu'elle contribue à rigidifier. Elle a donc comme la cellulose un rôle de soutien et de protection.

Question 4. Expliquez la contribution des molécules issues la photosynthèse à la croissance et au port des plantes (doc. 1 à 7).

La lignine et la cellulose sont des molécules produites indirectement par l'activité photosynthétique qui contribuent à la croissance des plantes en participant à la constitution des parois. Les parois sont des structures protectrices soutenant les plantes en croissance.

Unité 4

Question 1. Décrivez la localisation et la fonction de l'amidon chez la pomme de terre, puis expliquez son importance (doc. 1 et 2).

L'amidon est présent dans les amyloplastes des cellules des tubercules de pommes de terre. Il est produit par photosynthèse à partir du dioxyde de carbone atmosphérique. Il est stocké dans le tubercule de pommes de terre et va permettre, s'il reste dans le sol, de reformer un plant de pommes de terre l'année suivante

Question 2. Les réserves stockées par un noisetier dans les noisettes ont-elles d'autres fonctions que de nourrir l'embryon du futur noisetier (doc. 3) ?

On constate que les noisettes sont cachées par les écureuils pour être consommé de façon différée. Elles ont donc une fonction d'alimentation de cet animal. Par ailleurs, en cachant les noisettes, une proportion que l'on peut estimer à environ 10 % (l'écureuil consomme environ 60 % des noisettes qu'il a cachées, et environ 30 % seront consommés par d'autre écureuil) ne va pas être consommée par les écureuils et pourra donc germer. Le comportement de cache des écureuils assure donc une dissémination des noisettes ce qui est la conséquence de l'accumulation de réserves dans la noisette.

Question 3. Quelle est la fonction de la chair de cerises (doc. 4) ?

La chair de cerises est consommée par de nombreux animaux (hérisson, renard, blaireau, oiseaux). Ces animaux rejettent dans leurs déjections des noyaux de cerises dont le pouvoir de germination est intact. Selon les animaux la distance de dispersion est variable, faible pour les oiseaux, plus importantes pour les mammifères. On peut donc considérer que la chair de cerises a principalement une fonction d'attraction et de récompense pour les animaux disséminateurs. Elle ne contribue pas directement au développement du jeune cerisier mais à son déplacement avant sa germination.

Question 4. Montrez que les réserves énergétiques synthétisées par une plante peuvent être utilisées par elle mais peuvent aussi avoir d'autres fonctions (doc. 3 à 5).

D'après les documents de la double page, on constate que les réserves accumulées par les plantes peuvent être utilisées pour passer l'hiver et permettre une germination l'année suivante (exemple de multiplication asexuée) : c'est le cas de la pomme de terre. Mais les réserves peuvent également être accumulées dans la graine (exemple de la noisette) ou dans le fruit à l'extérieur de la graine (exemple de la cerise). Dans les deux cas, les réserves contribuent à la dissémination des graines. Lorsque ces réserves sont dans la graine, elles vont également favoriser la germination de la jeune plantule. À

l'inverse, lorsque ces réserves sont dans le fruit à l'extérieur de la graine, comme dans la cerise, elles sont consommées par l'animal disséminateur.

Unité 5

Question 1. Listez les différentes fonctions des tanins traitées dans cette double page (doc.1 à 5).

Dans le document 1, on constate que les tanins permettent de conserver les cuirs en limitant leur putréfaction. Le document 3 montre que les tanins sont protecteurs des fèves contre la bruche du haricot dont ils retardent le développement. Dans le document 4, on observe que les feuilles d'acacia produisent davantage de tanins lorsqu'elles sont davantage broutées, ce qui est toxique pour les koudous. Enfin, le document 5 permet de constater que les bois de charpente peuvent se conserver plusieurs centaines d'années au sec car leur imprégnation en tanins limite le développement des champignons décomposeurs.

Question 2. Décrivez les fonctions des couleurs des fleurs de fuchsia. En quoi, cela semble un caractère sélectionné (doc. 6 et 7) ?

Il semble que les deux couleurs que l'on observe sur les fleurs de fuchsia correspondent à des signaux pour les polliniseurs : les formes vertes- bleues indiquent la présence de nectar d'une fleur à polliniser tandis que les formes rouges correspondent à des fleurs déjà pollinisées.

On peut supposer que ce caractère a été sélectionné car il permet d'optimiser l'effort des polliniseurs : leurs visites se concentrent sur les fleurs à polliniser et évite des fleurs sans nectar (aucun des bénéfices pour eux) et déjà pollinisées (aucun bénéfice pour la plante).

Question 3. Montrez que les molécules synthétisées par les plantes leur permettent d'influencer leurs relations avec les autres espèces (doc. 1 à 7).

Avec les exemples de cette double page, on constate que certaines molécules produites par les plantes leur permettent de lutter contre des bioagresseurs, d'éviter des parasites ou au contraire d'attirer des mutualistes comme les polliniseurs en orientant leur visite vers les fleurs à polliniser.

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

1.

Dans le document 1, on constate qu'au fur-et-à-mesure des essais, la probabilité de réponse des bourdons augmente ce qui indique un phénomène d'association de l'odeur avec l'apport de la solution de saccharose. En revanche, on ne voit pas de différence significative selon la teneur en caféine des solutions.

2.

Dans le document 2, on constate que la probabilité de réponse après 24 heures passe de 0,2 pour l'expérience témoin à plus de 0,6 pour une concentration en caféine de 10^{-7} M. Or les nectars naturels contiennent 10 à 1000 fois plus de caféine. Néanmoins, au-delà de 10^{-7} M il n'y a pas d'amélioration de la probabilité de réponse. On peut donc en conclure, que les bourdons associent d'autant mieux

une odeur à une récompense (sous forme de solutions de saccharose) s'il y a de la caféine en concentration suffisante dans cette dernière. Cet effet perdure au moins 24 heures.

Dans le document 3, on constate que la probabilité de réponse n'est pas significativement différente après 10 minutes ou après 24 heures selon la concentration en saccharose de la solution. Il semble donc que la présence plus importante de saccharose dans la récompense ne contribue pas à améliorer la mémorisation du bourdon.

3.

Il semble donc que la présence de caféine dans le nectar permet aux bourdons d'associer une odeur à une récompense et de s'en rappeler pendant au moins 24 heures.

Exercice 3

1.

Lorsqu'un fruit est abîmé (blessure, coupure) les champignons peuvent s'y installer et commencer à le dégrader. Cette blessure met en contact l'enzyme PPO du cytoplasme, son substrat et le dioxygène de l'air et va contribuer à oxyder les polyphénols. Les composés noirs produits sont toxiques pour les champignons. On en déduit que cette réaction permet de protéger le fruit de la décomposition lors de blessures.

2.

D'après le document 2, on constate que l'activité de la PPO est d'autant plus faible que la concentration en acide ascorbique est importante. En conséquence, lorsque l'on coupe des fruits frais, il est possible de limiter leur noircissement en les mettant en contact avec du jus d'agrumes, dont la concentration en acide ascorbique est importante.

Exercice 4

1.

On constate que la teneur en saccharose augmente sur la période printanière entre avril et juin pour atteindre un plateau à partir de juillet et ceci jusqu'en septembre. Les feuilles supérieures des arbres ont une teneur d'environ 20 % supérieurs aux feuilles inférieures. Ceci peut s'expliquer par une meilleure exposition à la lumière et donc une activité photosynthétique plus importante.

2.

On constate que la teneur en saccharose augmente assez rapidement au printemps tandis que la teneur en tanins augmente très progressivement pour atteindre un maximum en septembre seulement.

3.

On constate que la densité de chenilles est maximale au mois de mai et diminue rapidement avant le mois de juillet. On peut imaginer deux hypothèses (non exclusives l'une de l'autre) pour expliquer cette constatation :

- la plupart des papillons ont la chenille se nourrit du chêne ont fini leur stade larvaire au mois de juillet et par conséquent on observe plus de chenilles après cette date.
- la composition des feuilles (teneur en eau réduite et augmentation de teneur en tanins) n'est pas favorable au développement des chenilles

Exercice 5

Éléments que l'on peut tirer du document

On constate que la teneur en acide ascorbique est beaucoup plus importante chez les espèces alpines que chez les espèces de plaine. Cette constatation peut être considérée comme une adaptation à la vie en montagne où le rayonnement UV et les effets délétères de la lumière sont potentiellement plus importants qu'en plaine.

Exercice 6

Éléments que l'on peut tirer du document

On constate qu'une plante aquatique placée à la lumière dans de l'eau distillée ne produit pas de gaz. Si elle est placée dans de l'eau du robinet, elle produit un peu de gaz alors qu'elle en produit beaucoup en présence de carbonate de sodium. On sait qu'un des produits de la photosynthèse est le dioxygène qui forme probablement ces bulles. Dans ces expériences, l'activité photosynthétique semble d'autant plus importante qu'il y a beaucoup de dioxyde de carbone (sous forme de carbonate) disponible.

Exercice 7

Éléments que l'on peut tirer du document

Il existe une très grande diversité de molécules produites par les plantes ayant elle-même une très grande diversité de fonctions. Néanmoins, on constate que certaines fonctions sont récurrentes notamment la lutte contre les bioagresseurs (parasites, phytophages) et l'attraction des polliniseurs et disséminateurs. On retrouve aussi dans cette liste certaines molécules qui peuvent être connues du grand public : molécules thérapeutiques ou addictives (morphine, nicotine), lignine (rigidification du bois), menthol (arôme utilisé pour les sucreries, dentifrices, gels hydroalcooliques, etc.), caroténoïdes (pro-vitamine A), tanins (conservation des cuirs), etc.

Exercice 8

On constate que les polyphénols semblent protéger les peupliers en limitant le développement des sucoirs du gui (document 2). Il apparaît alors que la production de polyphénols par les peupliers permet d'augmenter la production de bois utilisé pour la pâte à papier.

Pourtant, le texte introductif de l'exercice nous apprend que la lignine (qui est aussi un polyphénol) est un composé posant problème pour l'industrie du papier et dont on cherche à réduire la teneur dans le bois servant de matières premières.

Les lignées transgéniques permettent ici de réduire la teneur en lignine (documents 3 et 4) ce qui semble favorable pour la production du papier mais pourrait poser problème en rendant les peupliers en question beaucoup plus sensibles au gui.

Il semble donc qu'il faille trouver un compromis entre la limitation du développement du gui et l'obtention de bois pauvres en lignine pour la fabrication du papier.

Exercice 9

Conseils

- En l'absence de pipettes de précision, on peut estimer qu'une goutte à un volume d'environ 50 µL
- Compte tenu du délai de réalisation des cultures de champignons, des résultats déjà produits seront fournis aux candidats ayant proposé une démarche de résolution satisfaisante et réalisé les manipulations
- Des résultats possibles qui pourraient être fournis par l'enseignant après présentation du protocole par le candidat dans le cadre d'une épreuve réelle

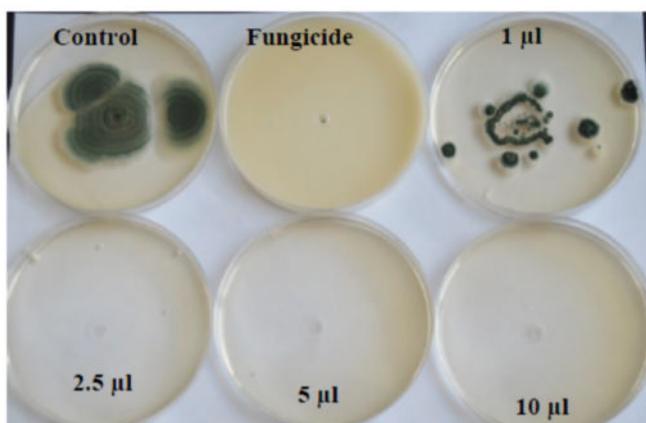


Figure 1: Inhibition of the mycelial growth of *P. expansum* LT-10 isolate 7 days after incubation with different doses of oregano oil and the fungicide Thiabendazole (0.02%).

Reproduit de : Taş, L., & Karaca, G. (2015). Effects of Some Essential Oils on Mycelial Growth of *Penicillium expansum* Link and Blue Mold Severity on Apple. *Asian Journal of Agriculture and Food*, 3(06).

On peut convertir les quantités d'huile essentielle placées dans chaque boîte de Pétri en dilutions dans l'**ordre de 1 µL à 10 µL** :

- 1 µL : une goutte d'huile essentielle diluée 50 fois (une goutte d'huile pure avec 49 gouttes d'huile neutre) placée dans le milieu de culture de la boîte de Pétri ;
- 2,5 µL : une goutte d'huile essentielle diluée 20 fois placée dans le milieu de culture la boîte de Pétri ;
- 5 µL : deux goutte d'huile essentielle diluée 20 fois placée dans la boîte de Pétri ;
- 10 µL : quatre gouttes d'huile essentielle diluée 20 fois placée dans la boîte de Pétri.

Ressources complémentaires.

www.univ-brest.fr/esiabscientifique/Mycologie/Methodes+d%C3%A9tudes/Milieux+de+culture

Autres publications sur le même thème :

- Vitoratos, A., Bilalis, D., Karkanis, A., & Efthimiadou, A. (2013). Antifungal activity of plant essential oils against *Botrytis cinerea*, *Penicillium italicum* and *Penicillium digitatum*. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 41(1), 86-92.
- Katooli, N., Maghsodlo, R., Honari, H., & Razavi, S. E. (2012). Fungistatic activity of essential oil of thyme and eucalyptus against postharvest and soilborne plant pathogenic fungi. *Global Journal of Medicinal Plant Research*, 1(1), 1-4.

Chapitre 10. Reproduction des plantes entre vie fixée et mobilité

Ce chapitre est l'occasion d'approfondir la reproduction sexuée et asexuée des plantes, qui n'a pas été abordée par les élèves depuis le collège. Des rappels préliminaires sur le cycle de vie des plantes et l'organisation fonctionnelle des plantes à fleurs (voir chapitre 8) seront nécessaires. Les notions vues en seconde sur l'organisme pluricellulaire et en première spécialité SVT sur les divisions cellulaires et le génotype seront utilement remobilisés pour ce chapitre.

L'organisation du chapitre reprend, conformément au programme, une structure classique. Après avoir abordé la reproduction asexuée, on s'intéresse dans les unités suivantes à la reproduction sexuée en reprenant les différentes étapes du cycle de vie dans un ordre chronologique : organisation fonctionnelle de la fleur, pollinisation, dissémination des graines, germination des graines. Comme pour les autres chapitres de ce thème, il conviendra de faire réfléchir les élèves à la réalisation de la fonction de reproduction par des organismes fixés pendant l'essentiel de leur cycle de vie. En particulier, la reproduction sexuée nécessitant la rencontre de partenaires (des gamètes de ces derniers tout au moins), les modalités et l'efficacité de cette rencontre nécessite d'être questionnées.

L'unité 1 est consacrée à la reproduction asexuée. La page de gauche se concentre sur des modalités de multiplication végétative spontanée chez les plantes. La page de droite se focalise sur les techniques plus récentes de multiplication *in vitro*.

Les **unités 2 à 5** traitent de la reproduction sexuée, de la fleur à la jeune plantule. **L'unité 2** est l'occasion de replacer le vocabulaire de description d'une fleur d'angiosperme à partir d'exemples photographiques. La page de droite présente les interactions entre le pollen et le stigmate : germination du tube pollinique, barrière à l'autofécondation.

Le transport du pollen est abordé spécifiquement par **l'unité 3**. L'élève y découvre la diversité des vecteurs de pollen (abiotiques et biotiques) et des adaptations des fleurs à la pollinisation. C'est également l'occasion d'aborder le rôle de l'attraction et des récompenses dans les interactions avec les polliniseurs.

L'unité 4 décrit, chez deux espèces, l'évolution de la fleur aux fruits. Elle montre également l'origine morpho-anatomique du fruit et des graines, et permet de replacer le vocabulaire spécifique. La diversité des modes de dissémination et l'importance des fruits dans la dissémination des graines sont largement évoquées par les autres documents.

L'unité 5 rapporte des expériences de physiologie classiques, pour beaucoup historiques, rappelant les conditions de germination des graines déjà abordées au collège et les conséquences physiologiques qu'elles provoquent. Ces expériences permettent d'aborder les modalités de mobilisation des réserves de la graine et le rôle des phytohormones et des enzymes dans le processus de germination.

Thème 3. De la plante sauvage à la plante domestiquée	
Connaissances	Capacités, attitudes
<p>Les plantes ont deux modalités de reproduction : sexuée et asexuée. La reproduction asexuée repose sur la totipotence des cellules végétales et les capacités de croissance indéfinie des plantes, à partir de presque n'importe quelle partie du végétal (tiges, racines, feuilles). > Unité 1</p> <p>La reproduction sexuée est assurée chez les Angiospermes par la fleur où se trouvent les gamètes femelles, au sein du pistil, et les grains de pollen, portés par les étamines, vecteurs des gamètes mâles. Chez certaines espèces, la fécondation des gamètes femelles par les gamètes mâles de la même fleur est possible, voire obligatoire. Dans les autres cas, elle est rendue impossible par divers mécanismes d'incompatibilité. > Unité 2</p> <p>La fécondation croisée implique une mobilité des grains de pollen d'une plante à une autre. Dans une majorité de cas, la pollinisation repose sur une collaboration entre plante et pollinisateur en relation avec la structure florale ; le vent peut aussi transporter le pollen. > Unité 3</p> <p>À l'issue de la fécondation, la fleur qui porte des ovules se transforme en un fruit qui renferme des graines. La graine contient l'embryon d'une future plante qu'elle protège (enveloppe résistante) et nourrit à la germination en utilisant des molécules de réserve préalablement accumulées. > Unités 4 et 5</p> <p>La dispersion des graines est une étape de mobilité dans la reproduction de la plante. Elle repose sur un mutualisme animal disperseur / plante et sur des agents physiques (vent, eau) ou des dispositifs spécifiques à la plante. > Unité 4</p>	<p>Mettre en œuvre un protocole de reproduction asexuée (bouturage, marcottage) ou étudier la régénération des petits fragments tissulaires en laboratoire. > Unité 1</p> <p>Réaliser la dissection d'une fleur entomogame pour mettre en lien structure et fonction. > Unité 2, activité expérimentale</p> <p>Mettre en évidence, dans l'analyse fonctionnelle d'une fleur, les relations entre une plante et un animal pollinisateur, et leurs éventuelles implications évolutives (coévolution). > Unité 3, Objectif oral</p> <p>Mettre en œuvre un protocole de sciences participatives sur les relations plantes/polinisateurs. > Objectif oral</p> <p>Mettre en évidence les relations entre une plante et un animal disséminateur de graines. > Unité 4</p> <p>Mettre en évidence les réserves de la graine et interpréter des expériences historiques sur la germination montrant la mobilisation des réserves de la graine. > Unité 5</p>

Compétences et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
<p>Pratiquer des démarches scientifiques</p> <p>Formuler et résoudre une question ou un problème scientifique.</p> <p>Observer, questionner, formuler une hypothèse, en déduire ses conséquences testables ou vérifiables, expérimenter, raisonner avec rigueur, modéliser, argumenter.</p> <p>Interpréter des résultats et en tirer des conclusions.</p> <p>Comprendre qu'un effet peut avoir plusieurs causes.</p> <p>Discerner, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 5 • Unité 5 • Unité 5 • Unités 3 et 4 • Unités 3 et 4
<p>Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre</p> <p>Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 2 et 4
<p>Pratiquer des langages</p> <p>Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 5

Choix pédagogiques

Unité 1

- > L'unité 1 traite de la reproduction asexuée chez les plantes. Le choix a été fait de choisir autant que possible des plantes du quotidien des élèves : plantes alimentaires, plantes d'intérieur courantes.
- > Le **document 1** présente une analyse simplifiée du tubercule de pommes de terre, accessible à tous et souvent négligée. Une étude en classe permet de retrouver les caractéristiques d'une tige : nombreux bourgeons axillaires (les « yeux ») inséré sur une spirale, une cicatrice d'insertion du stolon (à l'opposé de l'apex) ayant alimenté le tubercule.
- > Les enseignants souhaitant faire des observations sur la germination des tubercules de terre avec les élèves devront choisir des tubercules du commerce non irradiés (ce traitement empêche la germination), par exemple issus de l'agriculture biologique. Il est alors possible de réaliser des plans d'expérience plus ou moins complexes en faisant varier un ou plusieurs paramètres (lumière, humidité, température, photopériode, etc). On peut étudier le délai d'apparition des premières feuilles ou, si on va jusqu'au bout des cultures, le nombre de tubercules et la « biomasse fille » obtenue.
- > On pourra également sectionner avec un couteau les tubercules de pommes de terre servant de semences et constater que les yeux gardent leur pouvoir germinatif s'ils sont maintenus en milieu humide. Il faut pour cela placer les morceaux de pommes de terre sur de la terre humide ou à la surface d'un verre d'eau maintenus par des cure-dents à la manière d'un noyau d'avocat. Dès l'apparition des premières feuilles, la transplantation peut être réalisée dans de la terre riche en matière organique. Une pomme de terre que l'on divise en plusieurs morceaux peut ainsi donner deux ou trois plants sans problème... et 2 kg de pommes de terre si on va au bout de la culture ! Cette dernière ne nécessite que peu d'entretien (réalisable dans un gros pot avec beaucoup de terreau ou de matières organiques et un arrosage régulier). La culture est également possible en intérieur à proximité d'une fenêtre et peut être au moins partiellement désaisonnalisée.
- > Concernant le statut d'organes de réserve du tubercule de pommes de terre, on pourra faire le lien entre ce document et ceux de la **page 228 de l'unité 4 du chapitre 9**. Les observations microscopiques de l'amidon sont relativement faciles à faire après coloration au Lugol de coupes microscopiques du parenchyme de stockage du tubercule à différents stades de germination.
- > Le **document 2** montre qu'il existe une corrélation entre le nombre d'yeux du tubercule semence (tubercule mère) et le nombre de tubercules fils obtenus par pied issu de la germination du tubercule semence. Pour l'interprétation de ces données, il peut être utile de rappeler le cycle végétatif de la pomme de terre.
- > Le **document 3** présente une manipulation classique de bouture d'une plante d'intérieur, la misère. On peut aussi utiliser du saintpaulia, du pothos, etc. Les boutures peuvent être tentées avec tous les matériels végétaux (même s'il faut s'attendre à des succès inégaux).
- > Le **document 4** permet de rappeler que la multiplication asexuée est très répandue dans les pratiques agricoles. Elle permet de fournir de nombreux greffons (des sections de tiges qui seront greffées sur des pieds appelés porte-greffe) dans la culture de la vigne. En France, la quasi-totalité des pieds de vigne sont greffés depuis les épisodes de phylloxéra du XIX^e siècle : on greffe des cépages européens (nom que l'on donne aux variétés en viticulture) standardisés (chardonnay, muscat, pinot noir, merlot, etc.) sur des porte-greffes (domestiqués à partir de vigne sauvage américaine) résistants au phylloxéra. Un film sur le bouturage de la vigne est disponible à l'adresse suivante : <https://www.youtube.com/watch?v=0NPRupW0R2c>. L'arboriculture fruitière (pommes, poires, cerises, noix, etc.) repose également sur la multiplication de variétés bien connues (qu'elles soient anciennes ou contemporaines) à partir de rameaux (les greffons) greffés sur des porte-greffes d'origine variées.

- > La culture de la pomme de terre, de la patate douce, de l'igname ou du bananier (voir p. 262) sont également des cultures dont les semences et propagules sont obtenues en routine par une multiplication asexuée.
- > La page de gauche s'intéresse aux applications plus récentes de la multiplication sexuée. Le texte du **document 5** permet de définir la totipotence, d'insister sur la maîtrise technique nécessaire et sur le rôle important des hormones végétales dans le microbouturage et la multiplication *in vitro*.
- > Le **document 6** illustre par deux photographies la micropropagation *in vitro*. Cette technique est très largement utilisée en recherche fondamentale et en recherche appliquée pour obtenir du matériel végétal génétiquement homogène sur lequel on peut faire des expérimentations dans des conditions comparables. Elle est également très utilisée par les fournisseurs des pépiniéristes pour multiplier en très grand nombre les génotypes (variétés) recherchés commercialement.
- > Le tableau du **document 7** montre l'importance des phytohormones, plus exactement du ratio entre auxine et cytokinine pour maîtriser les cultures *in vitro* des microboutures. Un ratio élevé (plus d'auxine que de cytokinine) permet une multiplication des cellules non différenciées formant un cal. En revanche, un ratio très faible (peu d'auxine devant la cytokine) permet un développement à la fois des tiges et des racines, d'où la formation de plantules.

Unité 2

- > L'unité 2 introduit la reproduction sexuée des angiospermes. La page de gauche (**documents 1 et 2**) est consacrée à la description morphologique d'une fleur et au vocabulaire spécifique associé. On fera la différence entre les parties stériles (sépales et pétales) et les parties fertiles (androcée et gynécée). On veillera à ce que ce vocabulaire soit bien maîtrisé des élèves pour leur permettre d'être à l'aise dans la suite du chapitre.
- > La page de droite (**documents 3 à 6**) décrit le mécanisme de fécondation à partir du dépôt du pollen sur le stigmate (germination du tube pollinique, progression des gamètes mâles, mécanismes d'auto-incompatibilité) La double fécondation, typique des angiospermes, n'étant pas au programme elle n'est pas abordée.
- > Le **document 3** décrit la germination du tube pollinique issu des grains de pollen. L'utilisation de marqueurs fluorescents permet de visualiser la progression du pollinique. Les photos sont extraites de Wu, Y., Yan, J., Zhang, R., Qu, X., Ren, S., Chen, N., & Huang, S. (2010). « *Arabidopsis FIMBRIN5*, an actin bundling factor, is required for pollen germination and pollen tube growth. » *The Plant Cell*, 22(11), 3745-3763.
- > Le **document 4** replace la progression du pollinique dans le contexte plus général de la fécondation. On insistera sur le fait que le grain de pollen n'est pas le gamète mâle et que l'ovule n'est pas le gamète femelle (contrairement au vocabulaire utilisé chez les animaux). Le pollen contient les gamètes mâles qui vont progresser le long du tube pollinique jusqu'à l'ovule contenant l'oosphère qui est, lui, le gamète femelle.
- > Le **document 5** s'intéresse aux barrières à l'autofécondation. On pourra, en préalable, remobiliser les connaissances des élèves sur l'importance de la reproduction sexuée (méiose/fécondation) dans le brassage génétique. Se pose alors la question de l'efficacité de ce brassage en cas d'autofécondation. Si l'on tient compte de la sédentarité des plantes, l'autofécondation peut paraître comme un moyen de réaliser une fécondation sans les obstacles et les coûts associés à la rencontre des gamètes. Pourtant, chez de nombreuses espèces, on observe des mécanismes limitant cette autofécondation. On pourra alors se poser la question du maintien au fil des générations de la fécondation croisée (importance du brassage génétique comme source de diversité).

Le document présente ici l'auto-incompatibilité gamétophytique pour simplifier. On pourra trouver des informations sur l'auto-incompatibilité sporophytique en suivant ce lien : <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Pollinisation/incomp.htm>

> Le **document 6** illustre un exemple d'auto-incompatibilité chez les pétunias, qui se manifeste par une croissance différentielle selon l'origine génétique du pollen.

Unité 3

> L'unité 3 se focalise sur une étape du cycle de reproduction : le transport du pollen d'une plante à l'autre. L'accent est mis sur les deux modes de pollinisation les plus fréquents en France métropolitaine : par les insectes et par le vent. On peut rappeler qu'il existe de très nombreux autres modes de pollinisation : par des chauves-souris (exemple du baobab, voir le documentaire en ligne ci-après), par des limaces (exemple de *Chrysosplenium oppositifolium*), par des oiseaux (voir l'exemple des fuchsias **chapitre 9, p. 231**), etc.

Documentaire sur la pollinisation du baobab par les chauves-souris : https://www.canal-u.tv/video/cerimes/pollinisation_du_baobab.9430

> Le **document 1** permet de mettre en évidence l'importance des visites des insectes dans la pollinisation des oignons et la formation des graines. C'est aussi l'occasion de montrer qu'en l'absence de polliniseurs, la formation des fruits et des graines n'est pas nulle mais le plus souvent considérablement réduite. Selon les espèces, la dépendance à la pollinisation est variable. En effet, il existe fréquemment des mécanismes « d'autofécondation de secours » qui surviennent à la fin de la floraison si la pollinisation croisée n'a pas eu lieu.

> Le texte du **document 2** fournit du vocabulaire associé à la pollinisation. Il donne deux informations importantes :

- la pollinisation par des vecteurs animaux repose le plus souvent sur des mécanismes couplant attraction et récompense ;
- il existe de nombreux exemples de « tricheries » dans lesquelles la récompense est prélevée par l'animal sans que le service de pollinisation soit rendu (un exemple est donné dans le **document 7** et l'**exercice 2 p. 263**) ou inversement des mécanismes d'attraction des animaux non associés à une récompense (exemple dans le **document 6** et fréquent chez les orchidées, genre *Ophrys* par exemple). Cela permet de discuter le caractère « mutualiste » de l'interaction, puisque la limite avec le parasitisme n'est pas toujours très franche (il faudrait souvent des analyses approfondies sur la valeur sélective pour pouvoir trancher entre les deux types d'interactions). On peut rappeler en replaçant ces caractéristiques dans un contexte de sélection naturelle, que les deux types d'interactions (mutualisme et parasitisme) peuvent être sélectionnées et maintenues au cours des générations. Le parasitisme notamment se maintient d'autant plus facilement qu'il nuit peu à l'espèce qui en est victime.

> Le **document 3** fournit quelques éléments morpho-anatomique permettant de comprendre l'efficacité de l'abeille domestique comme pollinisateur (comme beaucoup d'apidés, les bourdons notamment). Parmi les structures observables, on peut citer la pilosité, des peignes et des brosses sur les pattes permettant de rassembler le pollen dispersé sur le corps au niveau des corbeilles à pollen. Ces dernières permettent le transport de grandes quantités de pollen. Rappelons à toutes fins utiles, que le pollen est une source d'azote (riche en protéines) contribuant à l'alimentation des abeilles (avec le nectar, riche en sucres), mais qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication du miel (ce dernier est principalement du nectar et du miellat déshydratés). On peut par ailleurs faire la différence entre les insectes floricoles (ceux qui visitent les fleurs) et les polliniseurs : une proportion seulement des floricoles sont de bons polliniseurs. À ce titre, beaucoup de papillons souvent cités comme des polliniseurs sont en réalité relativement peu efficaces (ils transportent peu de pollen) bien qu'ils visitent les fleurs et soient capable d'en utiliser le nectar.

> Le **document 4**, avec une photo de fleur de coquelicot, illustre la diversité des récompenses possibles qui peuvent être autres que le nectar. En l'occurrence, les fleurs de coquelicots sont visitées par de nombreux insectes pour leur pollen abondant.

- > Le **document 5** montre l'interaction classique d'une abeille avec une fleur de sauge. L'insecte active la pédale en essayant d'accéder au nectar et fait basculer les anthères sur son dos. L'observation de fleur de sauge sur le terrain permet de voir de nombreux insectes, plus petits que les abeilles, accéder au nectar sans activer la pédale. C'est donc là encore un exemple de tricherie possible, qui ne nuit pas à la plante tant qu'elle attire aussi des insectes qui activent la pédale.
- > La fleur de rafflésie (**document 6**), comme les fleurs d'arum de nos sous-bois, attire des diptères par leur odeur putride. Ces derniers sont trompés puisqu'il n'y a pas de récompense associée.
- > Symétriquement, l'exemple de la fleur de linaire montre comment certains insectes (des bourdons en l'occurrence) peuvent profiter de la ressource en nectar sans réaliser le service de pollinisation. On se rapportera à l'**exercice 2 p. 263** pour des données plus détaillées sur cet exemple.
- > Enfin, la pollinisation par le vent est abordée avec le **document 8** et la pollinisation du noisetier. Ce type de pollinisation est très fréquente chez de nombreux arbres de nos régions (fagacées, bétulacées, conifères) et majoritaire chez les poacées (dont les céréales). Chez les arbres caducifoliés, on remarquera que l'émission du pollen et la maturité des stigmates est souvent antérieure à l'apparition des rameaux feuillés. Cela peut s'expliquer par une dispersion du pollen plus efficace en l'absence des obstacles que sont les feuilles.

Unité 4

- > Après la pollinisation, l'unité 4 fourni des éléments sur la formation des graines et leur dissémination. Le choix a été fait de s'appuyer sur des documents très visuel et très naturalistes tels qu'on pourra le faire lors d'une sortie de terrain. C'est aussi pourquoi les espèces choisies sont, pour la majorité d'entre elles, très communes en France métropolitaine. On insiste sur la diversité des modes dissémination en fournissant de nombreux exemples. Notamment, la dissémination par des animaux est abordée à travers des exemples montrant la diversité des types de transport de fruits et graines possibles : épizoochorie, endozoochorie et comportement de cache.
- > Le **document 1** offre une analyse visuelle « de la fleur au fruit » chez deux espèces communes (cerisier et coquelicot), s'apparentant à une dissection virtuelle. Les deux espèces ont été choisies notamment parce qu'elles sont très différentes du point de vue du nombre de graines (une seule chez le cerisier contre un nombre très élevé chez le coquelicot) et du type de fruit (fruit charnu de type drupe pour la cerise, capsule à déhiscence poricide pour le coquelicot).
- > Ce document est l'occasion de placer le vocabulaire spécifique et notamment de montrer que l'ovaire se transforme en fruit tandis que les ovules se transforment en graines. On pourra ainsi s'assurer que les élèves ne confondent pas fruits et graines. On pourra aussi prendre pour exemple des fruits alimentaires (éventuellement en organisant une séance de dissection) afin de s'assurer de la bonne compréhension de ce vocabulaire. Les élèves doivent comprendre, à l'issue de cette double page, que la graine est la structure de dissémination universelle des plantes à fleurs (sa structure sera vue dans l'unité suivante) et que le fruit contribue de multiples manières (selon l'espèce) à cette dissémination.
- > Le **document 2** est justement l'occasion de montrer la diversité morphologique des fruits et de faire saisir aux élèves que le type de fruits est souvent associé à un mode de dissémination. Un travail équivalent à celui réalisé pour cette photo (ensemble diversifié de fruits à associer à une diversité de modes dissémination) peut être produit avec les élèves à partir des fruits réels disponibles à la saison du cours. C'est un exercice de réflexion pour les élèves autour des structures du fruit qui peuvent favoriser une dissémination par le vent, par digestion différentielle du fruit (avec maintien du pouvoir germinatif de la graine) ou par accrochage sur une fourrure ou un plumage.
- > Le **document 3** fournit des exemples de dissémination par endozoochorie, épizoochorie, anénochorie et hydrochorie dans la flore de France métropolitaine. On pourra faire remarquer la présence de chair autour des pépins de pommes, de bractées avec des crochets chez la bardane, de pappus ramifié chez le pissenlit ou encore d'un réceptacle flottant chez le nénuphar.

- > Le **document 4** fournit un extrait d'une étude de terrain en Russie très complète sur les animaux disséminateurs de graines dans la faune sauvage européenne. Le tableau présente l'avantage important de permettre de dépasser l'image trop simplifiée de la relation bilatérale entre une plante et un animal disséminateur. On constate ici que de nombreuses plantes communes ont en réalité une diversité d'animaux contribuant leur dissémination mais chacun avec des caractéristiques différentes (l'accent étant mis ici sur la distance de transport variable selon l'animal). Source : Evstigneev, O. I., Korotkov, V. N., Murashev, I. A., & Voevodin, P. V. (2017). « Zoothochory and peculiarities of forest community formation: A review. » *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2 (1), 1-16.
- > Enfin, le **document 5** illustre un lien entre les caractéristiques des fruits et leurs animaux disséminateurs dans une forêt tropicale du Gabon. On constate ainsi que, même à l'intérieur d'une catégorie, celle des fruits charnus, on peut identifier des sous-catégories puisque chaque fruit semble avoir évolué (taille, couleur, qualité) pour attirer et récompenser une catégorie de disséminateurs (et il est probable qu'il y a eu une coévolution du côté des animaux en retour).

Unité 5

- > L'unité 5 termine ce chapitre sur la reproduction des plantes à fleurs par la dernière étape critique du cycle : la germination des graines. Après avoir décrit page de gauche la structure de deux graines communes (pois et pomme), on s'intéresse page de droite aux modalités physiologiques et biochimiques de la germination du caryopse d'orge.
- > Le **document 1** illustre la germination d'une graine de lentilles, laquelle est facile à obtenir en quelques jours sur du papier humide à partir de lentilles du commerce. Le texte fournit les informations essentielles pour comprendre les conditions nécessaires à une graine pour passer d'un mode de vie ralenti à une phase de développement et de croissance rapide.
- > Le **document 2** compare sous forme de photos et de schémas les graines de pois et de pommes (pépins). Avant de s'intéresser aux différences, il est nécessaire d'insister sur les points communs remarquables entre toutes les graines : elles sont constituées d'un tégument, de réserves (dans les cotylédons ou en dehors) et d'un embryon.
- > Le **document 3** fournit les analyses biochimiques des constituants de ces deux graines. La faible teneur en eau s'explique par la forte déshydratation nécessaire à la conservation des graines. Elle est similaire chez les deux espèces. En revanche, on constate une forte hétérogénéité dans les macromolécules biologiques constituant les réserves : dix fois moins de lipides dans le pois que dans le pépin de pomme, tandis que les glucides sont deux fois plus importants dans le premier.
- > Le **document 4** présente le caryopse d'orge, où l'on retrouve une structure similaire aux graines présentées page de gauche si ce n'est qu'il y a une enveloppe supplémentaire, celle du fruit.
- > Les **documents 5 et 6** permettent de comprendre que l'acide gibberellique contribue à l'activation de l'amylase, laquelle permet l'utilisation des réserves amylacées du caryopse.
- > Le **document 7** renforce l'importance de l'acide gibberellique en montrant que l'incubation d'albumen d'orge une solution de cette hormone permet, par comparaison avec une expérience témoin, une perte de matière sèche plus rapide (donc une utilisation des réserves), la mise à disposition de l'embryon de sucres simples et de protéines, lesquelles lui seront nécessaires pour sa croissance.

> La figure ci-dessous résume les différentes étapes de la mobilisation des réserves de l'albumen au moment de la germination du caryopse d'orge.

A : amidon

B : α -amylase

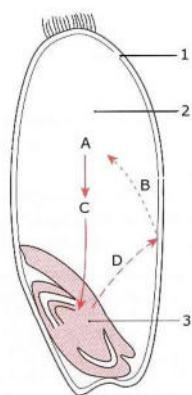
C : glucides divers (maltose, glucose)

D : Acide gibberellique (GA)

1: Couche à aleurone (contenant notamment des enzymes)

2 : Réserve d'amidon (*albumen amylocé*)

3 : Embryon



> Sources bibliographiques :

- Yu, X., van de Voort, F. R., Li, Z., & Yue, T. (2007). « Proximate Composition of the Apple Seed and Characterization of Its Oil. » *International Journal of Food Engineering*, 3(5). doi:10.2202/1556-3758.1283
- Paleg, L. G. (1960). « Physiological effects of gibberellic acid: I. II. & III On carbohydrate metabolism and amylase activity of barley endosperm. » *Plant Physiology*, 35(3), 293.
- Enari, T. M., & Sopanen, T. (1986). « Mobilisation of endospermal reserves during the germination of barley. » *Journal of the Institute of Brewing*, 92(1), 25-31.
- Brown, R. (1946). « Studies on Germination and Seedling Growth: III. Early Growth in relation to certain Aspects of Nitrogen Metabolism in the Seedling of Barley. » *Annals of Botany*, 10(37), 73-96.

Corrigé des parcours « tâches complexes »

Unité 1

> Éléments de correction

La production attendue est un support visuel (poster ou une bande dessinée). On attend un titre, des éléments de texte et des éléments visuels.

Elle devra contenir :

- des définitions de la totipotence et des explications concernant les différentes modalités de la multiplication asexuée ;
- des éléments visuels (dessins, figures du manuel ou trouvées sur Internet pertinentes et adaptées) montrant :
 - . des structures impliquées dans la multiplication asexuée ;
 - . les étapes de la multiplication asexuée sur un exemple ;
 - . un ou plusieurs exemples d'applications.

Tous ces éléments devront être légendés, organisés et articulés de façon cohérente.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Présentation	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• La proportion de texte est trop importante devant les éléments visuels	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Le choix des éléments présentés est pertinent mais leur mise en cohérence visuelle est insuffisante	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Certains aspects de la multiplication asexuée ne sont pas traités : structures impliquées, modalités de multiplication, applications	Complets ou suffisants	
Communication Support visuel	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• La structuration du support visuel n'est pas lisible• Les éléments visuels ne sont pas correctement légendés	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Des maladresses dans la structuration du support visuel	Le support est correctement structuré pour répondre à la question

Unité 2

> Éléments de correction

La production attendue est une série de schémas. On veillera à ce que ces derniers possèdent un titre, soit correctement légendés, que les figures soient claires et faciles à comprendre.

Parmi les éléments attendus :

- un schéma légendé d'une plante à fleurs avec ses différentes structures impliquées dans la fécondation (stigmate, style, ovaire, grains de pollen, tube pollinique, gamètes mâles et femelles) ;
- l'origine du pollen (anthère des étamines), son dépôt sur le stigmate, sa germination sous forme de tube pollinique ;
- la progression des gamètes mâles vers l'ovule ;
- la rencontre des gamètes et la fécondation (qui ne peut être détaillée, car la double fécondation n'est pas au programme).

On pourra faire figurer les tubes polliniques sur une reproduction du schéma du document 5 pour montrer la compatibilité ou non des gamètes.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les informations tirées des documents ne sont pas organisées de façon logique	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Le choix des connaissances est pertinent mais leur mise en cohérence est maladroite	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Le choix des connaissances est pertinent mais leur mise en cohérence est maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Certaines étapes ne sont pas représentées• Certaines structures ne sont pas représentées	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Certaines étapes ne sont pas représentées• Certaines structures ne sont pas représentées	Complets ou suffisants	
Communication Schémas	Non conforme Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Titres et/ou légendes manquants ou insuffisants	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Des maladresses dans l'organisation des éléments visuels	Les schémas sont correctement structurés pour répondre à la question	

Unité 3

> Éléments de correction

La production attendue est un texte. On attend une rapide introduction et une rapide conclusion. Comme le suggère la question, le texte pourra par exemple être structuré en trois parties : importance de la pollinisation croisée, adaptation morphologique des fleurs à un mode de pollinisation, conséquence en termes de bénéfices pour les fleurs et pour les animaux pollinisateurs le cas échéant.

Sur le fond, l'évaluation portera sur la précision du vocabulaire utilisé, l'explication des mécanismes d'attraction et de récompense en s'appuyant sur les exemples, la démonstration de l'adaptation des morphologies au mode de pollinisation.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Démarche explicative	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les informations tirées des documents ne sont pas organisées de façon logique	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Le choix des connaissances est pertinent mais leur mise en cohérence est maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Certaines informations disponibles dans les documents n'ont pas été utilisées• La réponse à la question est incomplète	Complets ou suffisants	
Communication Texte	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• La syntaxe et la structuration des paragraphes ne permet pas de répondre à la question posée	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Des maladresses dans la structuration du texte ou la formulation des phrases	Le texte est correctement structuré pour répondre à la question

Unité 4

> Éléments de correction

La production attendue est un diaporama. On attend une page de titre, une rapide introduction et une rapide conclusion. Sur la forme, on attend que chaque diapositive ne traite qu'un aspect de la question. Sur le fond on peut imaginer une structuration qui aborderait dans l'ordre :

- l'origine anatomique des graines et des fruits ;
- une diapositive par mode de dissémination traité (on attend au moins trois modes différents).

Chaque diapositive devra être associée à un ou plusieurs exemples. Chaque mode dissémination devra être associé à des structures typiques possédés par le fruit concerné.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• La démarche ne permet pas de comprendre ce qui facilite la dissémination des graines	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les notions présentées ne sont pas illustrées par des exemples	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Certaines informations disponibles dans les documents n'ont pas été utilisées• Le lien entre le mode de dissémination et la structure du fruit n'est pas fait	Complets ou suffisants	
Communication Diaporama	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• La structuration du diaporama ne permet pas de répondre à la question	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• L'organisation du diaporama est confuse	Le diaporama est correctement structuré pour répondre à la question

Unité 5

> Éléments de correction

La production attendue est un poster. Le poster devra comporter un titre explicite, être organisé visuellement pour faciliter sa lecture ; il devra associer du texte et des figures légendées (photos éventuellement).

Sur le fond, le poster devra exploiter les informations fournies par les documents à double page, lesquelles peuvent être réparties, comme le demande la consigne, en trois parties :

- nature des réserves (description d'une graine, composition biochimique) ;
- conditions de germination ;
- utilisation des réserves par l'embryon.

> Support pour l'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les éléments fournis ne permettent pas une réponse pertinente la question	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• L'organisation des éléments sur le poster n'est pas cohérente	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Certaines informations disponibles dans les documents n'ont pas été utilisées• Tous les points demandés par la consigne ne sont pas traités	Complets ou suffisants	
Communication Poster	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• La structuration du poster ne permet pas sa lecture aisée	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Des maladresses dans l'articulation des textes et des figures du poster	Le poster est correctement structuré pour répondre à la question

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas »

Unité 1

Question 1

Décrivez trois modalités de multiplication asexuée naturelle (doc. 1 à 4).

D'après les documents 1 et 2, on constate que les pommes de terre produisent des organes spécialisés dans la multiplication asexuée : les tubercules. Ils possèdent des réserves, des yeux qui peuvent reformer des tiges, la capacité de rester dans le sol pour reproduire un nouveau plant l'année suivante.

Les végétaux, comme à la misère peuvent se bouturer (document 3) si un fragment de l'appareil végétatif tombe au sol dans un endroit humide et forme des racines. C'est une autre modalité de multiplication asexuée.

Enfin, la vigne peut produire de nouveaux pieds si l'une de ses branches est enterrée. C'est un phénomène nommé marcottage qui est également un exemple de multiplication asexuée

Question 2

En quoi la mise au point du microbouturage a-t-elle présenté des difficultés (doc. 5 à 7) ?

On peut constater qu'après les premières tentatives, il a fallu attendre 60 ans pour que les cultures de cellules permettent de maîtriser le microbouturage. Ceci est notamment due à la maîtrise du milieu de culture et à la compréhension de l'importance des hormones végétales dans le développement des microboutures puis des plantes adultes.

Question 3

Montrez que les humains tirent profit de la multiplication asexuée de différentes façons (doc. 1 à 7).

Toutes les modalités de multiplication asexuée sont potentiellement utiles aux humains. Ils utilisent les tubercules de pommes de terre comme semences. Ils peuvent multiplier les plantes par boutures ou microbouturage, ce qui permet de garder un génotype favorable et d'en faire un clone. Enfin, ils peuvent obtenir de nombreux pieds à partir d'un seul pied, comme c'est le cas avec le marcottage de la vigne.

Unité 2

Question 1

Choisissez une fleur dans votre environnement proche, prenez ses différentes parties en photo ou à défaut choisissez des photos de détails d'une espèce de fleurs sur Internet, et légandez les différentes structures (doc. 1 et 2).

Question 2

Expliquez l'importance des barrières à l'autofécondation (doc. 3 à 5).

Le brassage génétique produit par la reproduction sexuée permet aux organismes de maintenir une diversité génétique d'une génération à l'autre, à l'origine d'une plus grande adaptabilité des populations aux variations de l'environnement. Ce brassage génétique n'a lieu qu'à condition qu'une plante ne se féconde pas elle-même (ce qui est théoriquement possible puisqu'elles possèdent des organes mâles et organes femelles pour la plupart d'entre elles). En conséquence, les barrières à l'autofécondation permettent d'augmenter le brassage génétique en favorisant la pollinisation croisée.

Question 3

En quoi consiste l'auto-incompatibilité (doc. 5 et 6) ?

C'est un exemple de barrière à l'autofécondation. Dans ce cas, des grains de pollen possédant des allèles identiques à l'ovaire associé au stigmate sur lequel ils se déposent ne germeront pas ou formeront des tubes polliniques qui n'iront pas jusqu'à l'ovule.

Question 4

Décrivez les différentes étapes menant à la rencontre des gamètes chez les plantes à fleurs (doc. 1 à 6).

Lorsque les étamines sont à maturité, elles émettent des grains de pollen qui sont transportés jusqu'au stigmate d'un ovaire. S'ils sont compatibles, ils germent et forment un tube pollinique dans lequel se déplace un gamète mâle qui ira féconder le gamète femelle situé dans l'ovule lui-même situé dans l'ovaire.

Unité 3

Question 1

Analysez et interprétez les conséquences de la pollinisation par les insectes chez l'oignon (doc. 1).

On constate que lorsque les têtes d'oignon sont placées dans des cages à l'abri des insectes pollinisateurs, seulement 17,5 % de fleurs sont fécondés contre 70 % lorsque les pollinisateurs y ont accès. Ce taux de fécondation est associé au nombre de fruits et de graines. En effet, chez les têtes d'oignon encagées, on a six fois moins de fruits par tête, dix fois moins de graines par tête et 30 % de moins de graines par fruits.

On peut donc en conclure que la possibilité pour les insectes pollinisateur d'accéder aux têtes d'oignon contribue à augmenter la production de graines et de fruits.

Question 2

Expliquez en quoi une abeille paraît adaptée à la fonction de pollinisation des fleurs (doc. 2 et 3).

Les abeilles visitent les fleurs et y prélevent du nectar et du pollen. On constate sur la photo que le pollen se colle aux poils qui recouvrent le corps de l'abeille. Par ailleurs, la patte arrière de l'abeille présente des structures facilitant la collecte et le transport du pollen : un peigne et une brosse qui

permettent de collecter le pollen dispersé sur les poils du corps, une presse qui permet d'en faire des pelotes stockées et transportées sur les corbeilles.

Question 3

À partir d'exemples, montrez que l'attraction et la récompense des polliniseurs n'ont pas un caractère systématique chez les fleurs entomogames (doc.4 à 7).

Les fleurs entomogames, sont colorées, odorantes, elles produisent du nectar ou un pollen abondant ce qui attire les insectes. Le pollen et le nectar sont des récompenses potentielles pour ces insectes qui vont transporter du pollen d'une fleur à l'autre et participer ainsi à la pollinisation. Néanmoins, chez la rafflésie par exemple, les insectes sont attirés par l'odeur et la couleur, vont transporter du pollen. Il y a donc bien attraction mais il n'y a pas de récompense. Dans le cas de la linaire, la récompense est prélevée par le bourdon faisant un trou dans l'éperon nectarifère, mais le service de pollinisation n'est pas rendu.

Question 4

En quoi peut-on dire que les fleurs du noisetier sont adaptées à la pollinisation par le vent (doc. 8) ?

La formation des fleurs de noisetier a lieu avant la formation des feuilles, ce qui facilite le transport du pollen par le vent. Par ailleurs, les fleurs mâles de noisetier sont suspendues sous les branches et peuvent facilement osciller en fonction du vent et émettre alors un nuage de pollen qui va pouvoir être transporté vers les stigmates de la fleur femelle. Ces derniers sont la seule partie de la fleur que l'on observe : elle ne présente pas les couleurs très visibles et la taille importante des fleurs entomogames.

Question 5

Montrez qu'il existe une grande diversité des modes de pollinisation (doc. 1 à 8).

La pollinisation peut être réalisée de différentes façons. Dans les exemples présentés ici, la pollinisation est réalisée par des insectes ou par le vent. Dans la pollinisation par les insectes, on constate qu'il existe une grande diversité dans les modalités d'attraction (couleur, odeur, fourniture de récompense) et dans les récompenses proposées (pollen, nectar, rien du tout). Certaines plantes, comme la sauge, présentent des adaptations particulières favorisant le dépôt de pollen sur le corps lors de la visite de l'insecte pollinisateur. Pour la linaire, le nectar situé dans le fond d'un éperon oblige les insectes à pénétrer profondément dans la fleur pour se couvrir de pollen.

Unité 4

Question 1

Quelle structure de la fleur donne les graines ? Et les fruits ? (Doc. 1.)

Les ovules donnent les graines et la paroi de l'ovaire donne les fruits.

Question 2

Qu'est-ce qui détermine le mode de dissémination des graines (doc. 2 et 3) ?

Le mode de dissémination des graines dépend principalement des structures du fruit qui entoure ces dernières. Si ces structures sont charnues, sucrées et colorées (comme chez la cerise, la tomate et la pomme), on peut supposer que le mode de dissémination passera par un animal qui consommera le fruit et rejetttera les graines dans ses déjections. Si le fruit présente des aspérités, des petits crochets par exemple, on peut supposer qu'il s'accrochera à la fourrure d'un animal (comme la bardane). Si le fruit est léger, présente des structures plumeuses ou des surfaces facilitant son maintien dans l'air, il sera probablement transporté par le vent.

Question 3

Discutez de la diversité de la dissémination par les animaux (doc. 2 à 6).

Il existe de nombreuses modalités pour qu'un animal dissème une graine. Il peut transporter les graines malgré lui, lorsque le fruit s'accroche à sa fourrure, c'est l'exemple de la bardane. Il peut les transporter dans son tube digestif après avoir mangé le fruit et il les rejettéra dans ses déjections. Il peut enfin déplacer le fruit ou les graines pour les cacher et en faire des réserves. Les graines oubliées pourront alors germer.

Question 4

Listez les modes de dissémination présentée dans cette double page (doc. 1 à 5).

Dans cette double page, nous avons vu des exemples dissémination :

- par le vent (pissenlit, stipa, clématite, érable) ;
- par l'eau (lotus et nénuphar) ;
- par les animaux : châtaignier, noisetier, cerisier, plant de tomates, bardane, pommier, arbres forestiers du Gabon.

Unité 5

Question 1

Listez les conditions environnementales favorables à la germination (doc. 1).

Pour débuter leur germination, les graines ont besoin d'être fortement hydratées. Il est parfois nécessaire, selon les espèces, que les graines aient subi une période au froid et qu'elles soient exposées à la lumière.

Question 2

Quels sont les points communs et les différences des graines de pois et de pommes (doc. 2 et 3) ?

Concernant l'anatomie, les graines de pois et de pommes présentent la même structure générale : elles sont protégées par un tégument, elles contiennent un embryon et des cotylédons riches en réserves. En revanche, leur composition est différente : la graine de pommes contient plus de lipides et plus de protéines mais moins de glucides.

Question 3

Décrivez les mécanismes de mobilisation des réserves lors de la germination du caryopse d'orge (doc. 4 à 7).

On constate que, quelques jours après le début de la germination, l'activité de l'amylase augmente rapidement. La quantité d'amylase est d'autant plus importante que l'embryon produit de l'acide gibbérellique. L'acide gibbérellique provoque également une perte de matière sèche et une augmentation de la disponibilité des sucres simples ainsi que des protéines. L'embryon en secrétant cette phytohormone va donc être le siège de changements biochimiques lui permettant d'utiliser les réserves de la graine.

Question 4

Résumez les événements survenant lors de la germination des graines (doc. 1 à 7).

Après hydratation, l'embryon secrète de l'acide gibbérellique, une phytohormone qui permet d'activer l'amylase (enzyme transformant l'amidon en sucres simples) et de disposer des sucres simples et des protéines nécessaires au développement de la jeune plantule. La racine et la tige de l'embryon grandissent alors et finissent par percer tégument de la graine.

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

1. Les bourdons pollinisateurs visitent la fleur et, en accédant au nectar, se couvrent de pollen qu'ils vont pouvoir transporter d'une fleur à l'autre. En revanche, les bourdons voleurs peuvent accéder au nectar par un trou dans l'éperon sans se couvrir de pollen. Par conséquent, ils ne transportent pas de pollen d'une fleur à l'autre et ne réalisent pas la pollinisation.

2. Ce bourdon est un bourdon pollinisateur exclusivement jusqu'au 24 juillet. Ensuite, il devient principalement voleur, ce qui indique qu'il utilise les trous dans l'éperon. Ce bourdon a une trompe longue, il peut donc accéder au nectar dans le fond de l'éperon de la fleur lorsqu'il est pollinisateur. Pourtant il devient voleur dans la seconde partie l'été.

3. Le texte nous apprend que *B. occidentalis* n'est pas présent avant le 24 juillet. Son arrivée coïncide avec le début des activités « voleuses » des bourdons. Auparavant, les ensembles des visites des bourdons sont des visites pollinisatrices.

4. On peut supposer que les visites du mois de juillet assurent la pollinisation des linaires et permettent peut-être de maintenir leur reproduction sexuée. Toutefois, il paraît évident que les visites de voleurs consommant du nectar sans rendre le service de pollinisation à partir du mois d'août nuisent aux linaires en limitant la formation des graines par pollinisation croisée.

5. La concordance de l'arrivée de *B. occidentalis* avec l'apparition de comportements voleurs des autres bourdons peut laisser supposer que cette espèce est responsable de ce changement de comportement. On peut supposer par exemple qu'il est capable de trouver l'éperon nectarifère,

ouvrant ainsi la possibilité pour les autres espèces de se procurer du nectar sans entrer dans la fleur par en haut et donc sans polliniser.

Si les bourdons de cette espèce ont le même comportement sur les fleurs de myrtilles, il est probable qu'ils limitent la pollinisation des myrtilles car, là encore, les autres espèces habituellement pollinisatrices pourront être voleuses de nectar (en utilisant les trous réalisés par *B. occidentalis*) et ne réaliseront pas la pollinisation croisée. La production de fruits, les myrtilles, peut alors chuter.

Exercice 3

1. Un pollen possédant les mêmes allèles que l'ovaire sur lequel il se pose ne pourra pas former de tube pollinique suffisamment long pour que les gamètes mâles atteignent l'ovule.

2. On constate que l'absence de fusion des gamètes est surtout importante lorsque des gamètes mâles et des gamètes femelles possèdent les mêmes allèles (document 1). Le document 2 nous apprend que le tube pollinique des pollens incompatibles ont une croissance importante, certes plus faible que les pollens compatibles mais non nulle. En revanche, le document 3 nous apprend que le cacaoyer perd par abscission les fleurs qui ont été pollinisées par des pollens incompatibles (dans des proportions légèrement plus faibles que celles qui sont non pollinisées). En revanche, les fleurs pollinisées avec des pollens compatibles ne tombent pas.

3. D'après le document 4, on constate que deux phytohormones, l'éthylène et l'acide abscissique, sont produites en plus de grandes quantités quelques heures après la pollinisation lorsqu'elle a eu lieu avec un pollen incompatible. Or ces deux phytohormones sont impliquées dans l'abscission des fleurs. On peut donc supposer que les pollens compatibles bloquent l'action de ces hormones tandis que les pollens incompatibles ne les bloquent pas voire les favorisent, ce qui déclenche l'abscission des fleurs.

Exercice 4

1. L'expérience témoin (arabette sauvage à la lumière) montre que la germination des graines est maximale quelle que soit la concentration d'acide gibbérellique, y compris lorsqu'elle est nulle. L'arabette mutante exposée à la lumière a un taux de germination atteignant 100 % pour des valeurs de concentration en acide gibbérellique comprises entre 1 et 10 µM. On peut déduire de ces deux expériences, qu'à la lumière, l'apport d'acide gibbérellique permet de compenser l'absence de production interne de l'arabette mutante. L'arabette sauvage produit sans doute son « propre » acide gibbérellique.

2. L'arabette mutante à l'obscurité a besoin de concentrations d'acide gibbérellique comprises entre 10 et 100 µM. En revanche, l'arabette sauvage à l'obscurité a besoin de concentrations en acide gibbérellique encore supérieures. Cela peut paraître surprenant. On peut supposer, que la graine d'arabette sauvage est capable de produire de l'acide gibbérellique et l'ensemble des conditions nécessaires à germination si elle est à la lumière. En revanche, à l'obscurité, il semble que l'apport d'acide gibbérellique ne suffise pas à moins qu'il soit très concentré à favoriser la germination.

Exercice 5

Éléments apportés par le document

On constate sur le dessin représenté ici que la plante mère émet une structure souterraine – une tige nommée rhizome – à partir de laquelle des feuilles peuvent émerger. On peut imaginer, dans une seconde phase, une rupture du rhizome et une autonomie de la nouvelle plante formant ainsi un nouvel individu issu de multiplication asexuée.

Exercice 6

Éléments apportés par le document

Dans cet exemple, on constate que les souris des bois retrouvent les glands de chêne qu'elles ont cachés en grande majorité à proximité de l'arbre le premier jour et à des distances plus importantes après 30 jours. On peut supposer qu'une partie des glands cachés loin de l'arbre ne seront jamais retrouvés et contribueront ainsi à la dissémination.

Exercice 7

Éléments apportés par le document

Chez ces deux espèces, on observe une imbibition très rapide : dans les 20 premières heures après le début de la germination. La teneur en eau atteint rapidement les 60 %. Chez la graine de tomate, la teneur en eau reste stable ensuite autour de 60 % puis ré-augmente légèrement jusqu'à 80 % entre 80 et 140 heures après le début de la germination. Chez l'avoine en revanche, le seuil de 80 % de teneur en eau est atteint 40 heures après le début de la germination. On constate donc des différences importantes entre les deux espèces vis-à-vis de l'hydratation de la graine ayant lieu pendant la germination.

Exercice 8

On constate que les geais consomment de grandes quantités de glands, principalement au moment de la saison de la chute de ces fruits, de septembre à décembre (doc. 1). Lorsqu'ils ont le choix, les geais transportent préférentiellement les glands de chênes (doc. 2). Ces glands sont transportés parfois sur de longues distances avant d'être mangés. Cette distance est souvent d'autant plus grande que le geai parvient à transporter beaucoup de glands (doc. 3). Les glands transportés sont enterrés dans de façon visible non aléatoire : sur les bords de zones au sol rugueux (mais pas dans les zones au sol lisse) ou à proximité d'objets horizontaux (doc. 4 et 5). On peut émettre l'hypothèse que les objets horizontaux ou les frontières entre types de sols servent de repères visuels aux geais et facilitent ainsi la recherche des glands qu'ils ont enterrés. Enfin, on constate que les glands enterrés à 5 cm de profondeur ont un taux de germination bien supérieure aux glands déposés à la surface (doc. 6).

On peut déduire de ces informations que si les geais consomment beaucoup de glands, ils en transportent et en enterrant également plusieurs milliers par oiseaux et par saison (doc. 3). L'action d'enterrer les glands favorise leur germination (doc. 6). Si on ajoute cela à la distance parcourue qui peut atteindre plus de 100 mètres (doc. 3), on peut considérer le geai comme un agent disséminateur important du chêne. En conséquence, cette interaction est à bénéfices mutuels : le geai se nourrit des glands produits par le chêne, le chêne bénéficie de l'action disséminatrice du geai lorsqu'il cache les glands dans des conditions favorables à leur germination.

Chapitre 11. La domestication des plantes

Ce chapitre aborde à la fois à des questions de biologie, de génétique, de biotechnologie, d'écologie et d'évolution, mais trouve de nombreuses ramifications dans les sciences humaines : géographie, histoire, ethnologie etc. La domestication des plantes est un sujet nécessitant certes quelques connaissances botaniques mais surtout une bonne compréhension du rôle de la sélection (naturelle et/ou artificielle) dans l'évolution des populations. Les liens avec l'évolution humaine sont également l'occasion de montrer la multiplicité des pressions de sélection menant à l'évolution (et la coévolution) des populations humaines et de leurs plantes alimentaires. Le choix a été fait de traiter des conséquences de la domestication et plus généralement de la sélection artificielle sur la diversité génétique des plantes cultivées avant d'évoquer les méthodes de sélection contemporaine. En effet, la diversité génétique étend le matériau fondamental sur lequel s'exercent les programmes d'amélioration des plantes ; il semblait donc nécessaire de les aborder de prime abord.

L'**unité 1** rappelle que la détermination de l'origine des plantes cultivées ne va pas de soi. Elle nécessite d'importantes études s'appuyant sur des données botaniques et archéologiques notamment. La diversité des plantes cultivées, son origine et les conséquences de sa diminution sont abordées dans l'**unité 2** à travers l'exemple des tomates (page de gauche) et des bananes (page de droite). L'**unité 3** présente les modalités de formation de nouvelles variétés en s'appuyant sur quelques exemples, notamment des exemples de biotechnologies récentes. Comme toute interaction biotique, l'alimentation humaine contribue à la sélection de caractères. L'**unité 4** fournit des exemples, notamment à travers le nombre de copies des gènes de l'amylase (page de gauche) et la diversité du métabolisme des acides gras oméga-3 selon les régimes alimentaires (page de droite).

Thème 3

De la plante sauvage à la plante domestiquée

Connaissances	Capacités, attitudes
Les pratiques culturales (par exemple pour la production de graines) constituent un enjeu majeur pour nourrir l'humanité. La sélection (empirique ou programmée) exercée par l'être humain sur les plantes cultivées au cours des siècles a retenu des caractéristiques différentes de celles qui étaient favorables à leurs ancêtres sauvages. Cette sélection s'est opérée au cours de l'établissement d'une relation mutualiste entre plantes et êtres humains. > Unité 1	Comparer une plante cultivée et des populations naturelles voisines présentant un phénotype sauvage. > Unité 1 Identifier la diversité biologique de certaines plantes cultivées (tomate, chou, pomme de terre par exemple). > Unité 2 Comprendre les enjeux de société relatifs à la production des semences. > Unités 2 et 3
Aujourd'hui, de nombreuses techniques favorisent la création de plus en plus rapide de nouvelles variétés végétales (par hybridation, par utilisation des biotechnologies...). La production de semences commerciales est devenue une activité spécialisée. > Unité 3 et Objectif Oral	Identifier des caractères favorisés par la domestication (taille, rendement de croissance, nombre des graines, précocité, déhiscence, couleur...). > Unités 2 et 3 Recenser, extraire et organiser des informations sur des exemples d'utilisation de biotechnologies pour créer de nouvelles variétés : transgénèse, édition génomique... > Unité 3
Une espèce cultivée présente souvent de nombreuses variétés (forme de biodiversité). Cette diversité résulte de mutations dans des gènes particuliers. L'étude des génomes montre un appauvrissement global de la diversité allélique lors de la domestication. La perte de certaines	Recenser, extraire et exploiter des informations concernant des mécanismes protecteurs chez une plante sauvage et les comparer à ceux d'une plante cultivée. > Unité 2 Recenser, extraire et exploiter des informations

<p>caractéristiques des plantes sauvages (comme des défenses chimiques ou des capacités de dissémination) et l'extension de leur culture favorisent le développement des maladies infectieuses végétales. Ces fragilités doivent être compensées par des pratiques culturales spécifiques. L'exploitation des ressources génétiques (historiques ou sauvages si elles existent) permet d'envisager de nouvelles méthodes de cultures (réduction de l'usage des intrants, limitation des ravageurs par lutte biologique). > Unité 2</p> <p>La domestication des plantes, menée dans différentes régions du monde, a eu des conséquences importantes dans l'histoire des populations humaines. Elle a contribué à la sélection de caractères génétiques humains spécifiques. > Unité 4</p>	<p>relatives aux risques induits par l'homogénéisation génétique des populations végétales (sensibilité aux maladies : crise de la pomme de terre en Irlande, conséquence d'une infection virale chez la banane...). > Unité 2</p> <p>Analyser des informations sur la quantité d'amylase salivaire ou sur les gènes de synthèse des omégas 3 dans les populations humaines et établir le lien entre ces éléments et le régime alimentaire de ces populations. > Unité 4</p>
--	--

Compétences et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
<p>Pratiquer des démarches scientifiques</p> <ul style="list-style-type: none"> Formuler et résoudre une question ou un problème scientifique. Observer, questionner, formuler une hypothèse, en déduire ses conséquences testables ou vérifiables, expérimenter, raisonner avec rigueur, modéliser, argumenter. Interpréter des résultats et en tirer des conclusions. Comprendre qu'un effet peut avoir plusieurs causes. Discerner, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 4 • Unités 1 et 4 • Unités 1, 2 et 4 • Unités 1 et 3 • Unité 1
<p>Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre</p> <ul style="list-style-type: none"> Garder trace de ses recherches (à l'oral et à l'écrit) et mémoire de ses acquis précédents. Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 4 • Unités 1 à 4
<p>Pratiquer des langages</p> <ul style="list-style-type: none"> Communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant. Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique. Utiliser des outils numériques 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 4 • Unités 1 à 4 • Unités 1 à 4

Choix pédagogiques

Unité 1

- > Cette unité propose un angle historique de la compréhension des domestications avec, en page de gauche, un texte évoquant les travaux de De Candolle (1882) et Vavilov (1920) – vision biogéographique historique des domestications – et en page de droite quelques données sur l'approche archéologique permettant d'identifier les foyers de domestication.
- > C'est également l'occasion d'introduire la notion de syndrome de domestication, le rôle de l'action humaine dans la différence des caractères entre les plantes cultivées domestiquées et leurs parents sauvages. Autre notion importante de cette double page : l'idée que les événements de domestication sont multiples et ont finalement eu lieu peu ou prou dans toutes les régions du monde où existaient des activités agricoles.
- > Le **document 1** rappelle l'importance des plantes dans l'alimentation humaine, et en particulier des graines et fruits : céréales, fruits et légumes, légumineuses, noix et amandes, huiles végétales.
- > Le **document 2** est un texte rappelant les démarches apparues au XIX^e siècle pour éclaircir l'origine des plantes cultivées. On peut rappeler que, jusqu'au début du XIX^e siècle, cette origine paraissait bien mystérieuse puisque les plantes cultivées étaient très différentes botaniquement des plantes sauvages (et ne leur paraissaient pas apparentées, tout au moins en Europe) et nécessitaient une intervention humaine (les pratiques culturales) pour se maintenir d'une génération à l'autre. La démarche d'Alphonse de Candolle, bibliographique et pluridisciplinaire, est remarquable aussi bien sur le plan méthodologique que pour les résultats qu'il a obtenus. D'autant que de nombreuses confusions existaient sur l'origine des plantes, notamment véhiculées par des légendes ou des approximations linguistiques.
- > Les travaux de Vavilov, agronome soviétique russe, avait clairement pour but de mettre au point de nouvelles variétés aux caractéristiques agronomiques intéressantes. Mais ce faisant, ces travaux l'ont clairement amené à s'intéresser de façon plus fondamentale à l'histoire des plantes cultivées.
- > Le **document 3** fournit un exemple – accessible à double titre – de comparaison entre une plante sauvage et son parent cultivé et domestiqué : la carotte. En effet c'est une plante dont les formes sauvages sont fréquentes en France, y compris dans les zones urbaines (friche en particulier) et la forme domestique est par ailleurs bien connue des élèves. Il n'est pas difficile pour les enseignants de se procurer des individus sauvages qu'il faudra déterrasser avec la racine et des carottes commerciales avec leurs fanes pour proposer aux élèves d'effectuer une comparaison morphologique.
- > Le **document 4** présente quelques-uns des foyers de domestication de plantes alimentaires avec leur datation approximative. Notons que la notion de centre de domestication (c'est-à-dire des régions du monde concentrant un certain nombre de foyers) est aujourd'hui désuète. En effet, il existe peu de régions du monde avec des activités agricoles anciennes où il n'y a pas eu de domestication, même si les plantes concernées sont aujourd'hui peu connues. Par ailleurs, pour de nombreuses plantes, les foyers de domestication sont relativement diffus car le processus de domestication s'est étalé sur de très longues périodes de temps et a été simultané avec des échanges commerciaux, des migrations humaines et des hybridations avec des formes sauvages multiples.
- > Le pommier est à ce titre un exemple intéressant (voir **exercice 3 p. 284**) : originaire de l'ouest de la Chine, il a été introduit en région méditerranéenne et en Europe par les routes de la soie. Il s'est hybridé avec les formes sauvages présentes le long de cette route. Ainsi, dans les formes domestiques des pommiers contemporains, on trouve non seulement des contributions génétiques des pommiers sauvages chinois, mais également de ceux du Moyen-Orient et d'Europe. De la même façon, les échanges plusieurs fois millénaires entre les peuples des Andes (actuel Pérou) et ceux de Méso-Amérique (actuel Mexique) sont à l'origine de phénomènes complexes de domestication chez le haricot ou chez la tomate. En effet, les processus de sélection artificielle (plus ou moins volontaires) ont été contemporains des échanges et d'hybridations multiples avec les différentes formes sauvages.

- > Les **documents 5 et 6** présentent l'exemple classique des blés. Cet exemple a été choisi d'abord parce qu'il est très bien documenté, ensuite parce que c'est l'une des plus anciennes domestications connues (avec l'orge) et enfin parce que les caractères (rachis solides et grains venus) sur lesquels s'est exercée la domestication sont accessibles dans les données archéologiques et accessibles aux néophytes.
- > Le **document 6** montre le caractère très progressif de la domestication. On pense aujourd'hui que les processus de domestication des céréales dans le croissant fertile se sont déroulés sur plus de 1000 ans. Ce qui remet en cause l'idée d'une « révolution néolithique » brutale et soudaine. Les données présentées montrent que les formes domestiques du blé ne deviennent majoritaires dans les blés cultivés que 2000 à 3000 ans après les plus anciennes traces de domestication.
- > Il peut être utile de rappeler aux élèves qu'il est possible de cultiver une forme sauvage et que, par conséquent, plante cultivée n'est pas synonyme de plante domestiquée. On réserve ce dernier terme à des plantes qui ont subi, par sélection artificielle, au cours des générations, des modifications de leurs caractéristiques de façon à être plus utile aux humains (facilité de culture, facilité de récolte, meilleure qualité nutritionnelle ou alimentaire, etc.).
- > Le **document 7** présentent la notion essentielle de « syndrome de domestication ». Il est remarquable de constater que chez toutes les plantes alimentaires domestiquées, on observe des caractéristiques convergentes issues du processus de domestication. Les principales d'entre elles sont listées dans ce tableau.

Unité 2

- > L'unité 2 illustre quelques-unes des caractéristiques de la diversité génétique des plantes alimentaires : la réduction de diversité au cours du processus de sélection artificielle, l'importance de la diversité sauvage (des proches parents sauvages des plantes domestiques) comme réservoir pour l'amélioration des plantes, l'importance de la diversité dans les interactions avec les bioagresseurs. La page de gauche s'intéresse à l'exemple de la diversité des tomates, la page de droite au lien entre la diversité des bananiers et la maladie de Panama.
- > Le **document 1** rappelle à quel point les processus de sélection artificielle ont mené à une très grande diversité de variétés cultivables et/ou cultivées. La photo montre également sur quels critères la sélection artificielle s'est portée pour la diversification variétale des tomates : taille, forme générale, couleur, présence de côtes ou non, maintien de l'insertion sur le pédoncule à maturité ou non, etc.
- > Le **document 2** est un document classique comparant, pour de nombreuses espèces, la diversité génétique (mesurée par la diversité nucléotidique) entre l'ensemble des populations sauvages et l'ensemble des populations domestiquées d'une espèce donnée. On constate qu'il y a une réduction systématique de la diversité entre le réservoir sauvage et le réservoir domestique. Ce qui n'est pas surprenant, si l'on se rappelle que le passage de l'un à l'autre s'est nécessairement effectué par sélection artificielle, processus qui réduit la diversité en ne favorisant que la reproduction des individus choisis. On remarque également, que la perte de diversité est en proportion très variable d'une espèce à l'autre, relativement faible chez les céréales (riz et maïs), elle est très importante chez les cucurbitacées (concombres et pastèques).
- > Le **document 3** liste, toujours avec l'exemple de la tomate, quelques-uns des allèles intéressants chez les espèces sauvages et qui ont pu être utilisés pour participer à la formation de nouvelles variétés (on nomme **introgression** le fait d'introduire par croisements successifs un allèle dans une variété existante). Ce document peut servir d'appui à une réflexion plus générale sur l'importance de préserver la biodiversité sauvage. En effet, ces espèces qui ne sont pas directement comestibles peuvent néanmoins posséder des caractères dont les générations futures auront besoin pour leurs futurs travaux d'amélioration variétale. Ce document peut également être utilisé avec les documents de l'unité 3 (pour compléter par exemple le document 2). Une réflexion sur la protection des ressources

génétiques des plantes cultivées pourra être réalisée par exemple autour d'une étude de l'intérêt du *Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture* www.fao.org/plant-treaty/fr/.

> Le document 4 présente un exemple précis de comportement différent de deux tomates, l'une sauvage et l'autre domestiquée, vis-à-vis de larves de doryphores. On constate que la présence de poils et certains composés chimiques chez les formes sauvages leur permet de mieux se défendre contre les bioagresseurs. C'est une constatation assez générale : les plantes domestiquées ont généralement des défenses réduites (qui ont été contre sélectionnées car souvent elles réduisent la digestibilité ou l'appétence) et par conséquent ces plantes ont davantage besoin que les formes sauvages de protection de la part des humains qui les cultivent.

> Voici, sur le même sujet, un document complémentaire concernant le pommier et l'un de ses principaux bio agresseurs, le carpocapse (*Cydia pomonella*), un papillon dont la chenille (le ver de la pomme) se développe à l'intérieur de la pomme la rendant impropre à la consommation.

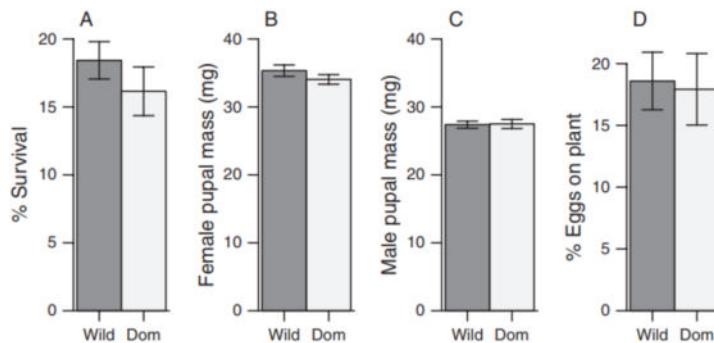


FIG. 4. Mean (± s.e.) percentage survival to pupation (A), female pupal mass (B) and oviposition preference (C) of codling moth (*Cydia pomonella*) on wild and domesticated (Dom) apples.

Reproduit de : Whitehead, S. R., & Poveda, K. (2019). Resource allocation trade-offs and the loss of chemical defences during apple domestication. *Annals of botany*, 123(6), 1029-1041.

> Le document 5 présente quelques données sur la diversité des bananes. Il nous apprend que s'il existe une assez forte diversité dans les bananes cultivées en général, les variétés faisant l'objet d'un commerce international (celles qui sont exportées) appartiennent quasiment toutes à la variété Naine Cavendish. Cette information a des conséquences importantes au regard des documents suivants.

> Le document 6 nous apprend que la maladie Panama pose des problèmes dans les plantations destinées à l'exportation depuis les années 60, avec une souche TR1 qui a mené un changement de variétés. Remarquons que le bananier se multiplient uniquement par multiplication asexuée, ces variétés sont des variétés clones, par conséquent il n'existe pas de diversité génétique intravariétale permettant d'identifier des individus plus résistants à une maladie donnée. En conséquence, lorsqu'un parasite est adapté à l'une de ces variétés clones, la seule option est de trouver une variété de remplacement. La principale faiblesse de la production de bananes destinées à l'exportation est qu'elle repose sur l'utilisation d'une seule variétés clone (d'abord Gros Michel, puis aujourd'hui Cavendish), c'est-à-dire qu'à l'échelle mondiale, il n'existe pas de diversité génétique pouvant opposer une résistance à la propagation d'un parasite donné. Cet événement qui s'est donc déjà produit dans les années 60, se reproduit aujourd'hui avec une nouvelle souche de la maladie de Panama, la souche TR4, qui affecte les bananes Cavendish.

> Le document 7 permet de comparer la sensibilité de différentes variétés de bananes (toujours des variétés clonées) en présence de la souche TR4. On constate une sensibilité différentielle très marquée d'une variété à l'autre avec des variétés, comme la variété Williams qui ne semble pas être sensible au champignon.

Unité 3

- > Cette unité aborde la mise au point de nouvelles variétés, ce qui est couramment nommé « l'amélioration des plantes ». La page de gauche est consacrée à la diversité, indispensable pour pouvoir exercer une sélection. La page de droite s'intéresse à des biotechnologies contemporaines utilisées dans les programmes de sélection.
- > Les pratiques de sélection artificielle, au moins aussi anciennes que la domestication, ont été empiriques et involontaires pour l'essentiel jusqu'au xix^e siècle. Depuis le xix^e siècle, avec l'amélioration des connaissances en génétique en particulier, la maîtrise des techniques de reproduction comme le microbouturage *in vitro* (voir chapitre 10, unité 1), les processus d'amélioration végétale se sont spécialisés et professionnalisés. Aujourd'hui, dans les pays industrialisés, ce travail d'amélioration végétale est pour l'essentiel délégué à des structures spécialisées (organismes de recherche publique ou privée, entreprises semencières). Ceci est particulièrement vrai lorsque la mise au point de nouvelles variétés a recours à des biotechnologies.
- > Notons toutefois qu'il existe toujours à travers le monde une part importante du travail d'amélioration végétale qui est réalisée au champ (on parle de sélection massale ou phénotypique) et qu'en France notamment, certains agriculteurs produisent et sélectionnent leurs propres semences dans des programmes d'amélioration reposant sur des échanges de semences entre paysans et sur une sélection au champ de variétés populations (c'est-à-dire présentant des génotypes relativement hétérogènes). Ces variétés sont souvent bien adaptées au contexte local, très résilientes aux aléas (météo et bioagresseurs), moins exigeantes en intrants, mais plus difficiles à caractériser et donc à commercialiser. Voir à ce sujet l'**objectif oral p. 278**.
- > Rappelons, qu'en France, une nouvelle variété de semence peut être commercialisée si elle est inscrite au catalogue officiel. Cette inscription exige que la variété réponde à trois critères (nommés DHS) : distinction (elle doit être différente de ce qui existe déjà au catalogue), homogénéité (le phénotype doit être homogène entre les individus), stabilité (le phénotype doit être stable dans le temps d'une génération à l'autre). Ces critères qui sont au départ une protection des échanges (l'acheteur doit savoir ce qu'il achète), crée une contrainte forte sur l'innovation variétale. Par ailleurs, toute variété commercialisée en France peut librement être utilisée par quiconque pour faire un programme de sélection / amélioration.
- > Cette unité est également une occasion de travailler avec les élèves sur les questions de diversification et sélection. La sélection artificielle étant pédagogiquement très utile pour expliquer la sélection naturelle. On peut rappeler que la sélection artificielle était un argument fort de Darwin en faveur de la sélection naturelle (son livre *L'Origine des espèces* commence d'ailleurs par des exemples de sélection artificielle).
- > Le **document 1** explique les processus de sélection artificielle ne diffèrent des processus de sélection naturelle que dans leurs modalités. Le principe d'évolution des populations des espèces cultivées (et élevées concernant les animaux) reste le même que celui qui a cours dans l'évolution biologique en général : la diversité préexistante dans les populations est sélectionnée du fait d'une reproduction différentielle (seuls certains individus pourront se reproduire, en l'occurrence ceux choisis par le sélectionneur). La différence avec la sélection naturelle va reposer sur :
 - l'origine de la diversité (et donc des caractères qui donneront lieu à la sélection). Voir **documents 2 et 3** ;
 - les modalités d'association des allèles (croisements plus ou moins spontanés entre variétés voire entre espèces) ;
 - les critères de sélection des individus qui contribueront à la génération suivante (les sélectionneurs privilégient les critères intéressants : amélioration qualitative ou quantitative de la production, résistance aux maladies, etc.) ;

– les modalités de sélection qui peuvent faire appel à des technologies plus ou moins avancées (voir par exemple **document 4**).

> Le **document 2** liste les différentes sources de diversité pouvant être utilisées dans les programmes d'amélioration des plantes pour obtenir de nouveaux caractères qui seront ensuite sélectionnés. Les trois premières (variétés existantes, espèces sauvages apparentées, mutations spontanées) ont toujours contribué à la diversification des espaces agricoles. Les mutations induites et les croisements avec des espèces éloignées sont plutôt des sources de diversité possibles grâce à l'émergence des biotechnologies.

> Le **document 3** donne un exemple de plantes aujourd'hui commercialisées dont le caractère d'intérêt a été obtenu suite à des programmes de mutations induites, c'est-à-dire nécessitant l'utilisation d'agents mutagènes (UV ou irradiation par exemple) pour faire apparaître aléatoirement des caractères qui seront par la suite sélectionnés.

> Le **document 4** présente une technologie aujourd'hui très utilisée : la section assistée par marqueurs. Elle présente l'énorme avantage d'accélérer les programmes de sélection, qui, sans cet outil, durent généralement plusieurs années voire plusieurs décennies.

> Enfin, les **documents 5 et 6** donnent quelques éléments sur l'édition génomique à l'aide de l'outil Crispr-cas9. Cette biotechnologie, dont l'application ne se limite pas à l'agronomie, est extrêmement puissante puisqu'elle permet des modifications génomiques précises (suppression de séquences, remplacement de séquences, insertion de séquences). On insistera sur les débats ouverts par les possibilités offertes par cette biotechnologie (voir ressources complémentaires).

Unité 4

> Cette unité aborde la question des pressions de sélection en retour qu'exerce l'alimentation sur les populations humaines. En effet, s'agissant d'une relation mutualiste, nous avons vu dans les unités précédentes que les humains exercent à travers les processus de domestication et plus généralement de sélection artificielle une pression évolutive sur les plantes cultivées. Ici, il s'agit au contraire de montrer que le régime alimentaire d'une population humaine contribue à l'évolution de celle-ci. Deux exemples principaux sont traités : en page de gauche l'alimentation amylacée (riche en amidon) des populations se nourrissant de produits agricoles (la majorité des populations du monde) ; en page de droite, l'adaptation historique au changement de la teneur en acides gras oméga-3 des régimes alimentaires avec le passage à l'agriculture.

> Le **document 1** rappelle l'importance de l'amidon de l'alimentation humaine en fournissant quelques exemples classiques.

> Le **document 2** illustre le document 4 en montrant une femme Yakoute, un peuple semi nomade vivant notamment d'élevage extensif de rennes en Sibérie. Leur alimentation est pauvre en amidon.

> Le **document 3** montre la corrélation entre le nombre de copies du gène AMY1 et la teneur en amylase de la salive. Ce document est utile pour expliquer qu'une pression de sélection sur le nombre de copies de ce gène permet, selon le régime alimentaire, de modifier la teneur en amylase (et donc de favoriser la digestion de l'amidon et son exploitation comme source d'énergie alimentaire).

Source : Perry, G. H., Dominy, N. J., Claw, K. G., Lee, A. S., Fiegler, H., Redon, R., ... & Carter, N. P. (2007). Diet and the evolution of human amylase gene copy number variation. *Nature genetics*, 39(10), 1256-1260.

> On constate dans le **document 4** que le nombre de copies du gène AMY1 est variable d'une personne à l'autre (il semble se répartir selon une loi normale). Toutefois, en comparant des populations ayant un régime alimentaire riche en amidon et les populations ayant un régime alimentaire pauvre en amidon on constate, qu'en moyenne, le nombre de copies du gène AMY1 est plus élevé chez les

premières (autour de six copies contre quatre copies dans les zones populations). En mettant en relation cette information avec le document 3, on comprend que la production d'amylase est plus élevée dans les populations ayant un régime alimentaire riche en amidon. Cette différence de phénotype ayant une base génotypique, on peut supposer qu'une pression de sélection exercée par le régime alimentaire a favorisé des individus capables de mieux digérer l'amidon dans le contexte où celui-ci était davantage présent dans leur alimentation.

Source : *Ibid*

Pour information, les peuples à régime pauvre en amidon, mentionnés dans ce document ont les régimes alimentaires suivants :

Nom du peuple	Localisation	Régime alimentaire traditionnel
Biaka	République centrafricaine et Congo (Afrique)	Produits forestiers (chasseurs-cueilleurs forestiers) : viande de brousse, tubercules, fruits, insectes et mollusques
Mbuti	Congo (Afrique)	
Datog	Tanzanie (Afrique)	Principalement carné (éleveurs extensifs)
Yakout	Sibérie orientale (Asie)	

On trouvera davantage d'informations sur cet exemple dans la ressource suivante :

acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/evolution/accompagnement-pedagogique/accompagnement-au-lycee/terminale-2012/un-regard-sur-levolution-de-lhomme/evolution-dans-la-ligne-humaine/quelques-aspects-genetiques-de-levolution-des-populations-humaines-homo-sapiens-sapiens/culture-et-selection-naturelle-au-cours-de-lhistoire-des-populations-humaines/amylase/approche-amylase

> Le **document 5** (extrait de Brown *et al.* 2004, référence complète ci-après) illustre une tendance observée dans la plupart des populations du monde depuis plusieurs milliers d'années par la comparaison de squelettes : la morphologie de la mâchoire inférieure se modifie de façon concomitante avec une diminution de l'importance des muscles masticatoires. L'hypothèse explicative courante serait une diminution de la pression de sélection liée à la capacité de mastiquer des aliments. En effet, la proportion de viande crue et d'aliments végétaux très lignifiés a fortement diminué avec le développement de l'agriculture et la généralisation de la cuisson des aliments. Par conséquent, la possession de muscles masticatoire puissant ne serait plus un avantage sélectif.

> Il n'est pas exclu que le développement des mâchoires soit le produit d'une plasticité phénotypique (elle-même pouvant être le produit l'évolution) plutôt qu'un caractère sélectionné. Le facteur déterminant serait l'alimentation pendant les premières années de la vie (les muscles de la mastication étant d'autant plus forts à l'âge adulte que les mâchoires ont été sollicitées jusqu'à l'adolescence). En conséquence, la morphologie de la mâchoire ne serait que partiellement héritable et sous l'influence principalement de facteurs environnementaux. L'argument principal en faveur de cette hypothèse est l'importante variation, parfois au sein des mêmes familles, du développement de la mâchoire. Cette seconde hypothèse, est également avancée pour expliquer le manque de place existant dans la cavité buccale chez de nombreuses personnes pour le développement des deuxièmes et troisièmes molaires (dents de sagesse).

Sources :

- Bergman, J. (1998). Are wisdom teeth (third molars) vestiges of human evolution. *TJ arch*, 12, 297-304.
- Brown, P., & Maeda, T. (2004). Post-Pleistocene diachronic change in East Asian facial skeletons: the size, shape and volume of the orbits. *Anthropological Science*, 112(1), 29-40.
- Hillson, S. (2014). *Tooth development in human evolution and bioarchaeology*. Cambridge University Press.

- > La page de droite documente l'exemple de l'adaptation métabolique à la teneur en acides gras polyinsaturés dans l'alimentation. Cet exemple, très étudié, est aujourd'hui assez riche en données. Malheureusement, celles-ci sont souvent difficiles d'accès pour des élèves de lycée, notamment pour les connaissances en génomique qu'elles exigent.
- > Le **document 6** rappelle l'importance des acides gras polyinsaturés dans l'alimentation et pour la santé humaine. Pour rappel, la population française contemporaine est en moyenne en carence d'acides gras oméga-3 dans son alimentation.
- > Le **document 7** explique ce que sont biochimiquement ces acides gras. Les élèves pourront, le cas échéant, faire le lien avec leurs connaissances de chimie.
- > Le **document 8** que l'on retrouve souvent dans les publications scientifiques sur ce thème (par exemple Buckley *et al.*, 2017 ou Mathias *et al.*, 2012, références complètes ci-après) permet de faire le lien entre les régimes alimentaires et la diversité des acides gras oméga-6 et oméga-3 présents dans l'organisme humain. On constate notamment la variation possible des voies métaboliques selon les apports alimentaires. En conséquence, on peut en déduire que selon le régime alimentaire d'une population, l'activité des enzymes FADS1 et FADS2 devra s'adapter pour maintenir les concentrations adéquates des différents acides gras polyinsaturés. Compte tenu de l'importance physiologique de ces derniers, on peut supposer qu'une pression de sélection importante s'exerce sur l'activité de ces enzymes. En particulier, ce document nous apprend que les premières étapes des voies de biosynthèse de ces acides gras sont d'autant plus importantes que le régime est riche en aliments végétaux. En effet, les produits animaux, et les produits de la mer en particulier, fournissent des acides gras proches des acides gras de fin de voie métabolique.

Sources :

- Buckley, M. T., Racimo, F., Allentoft, M. E., Jensen, M. K., Jonsson, A., Huang, H., ... & Jørgensen, M. E. (2017). Selection in Europeans on fatty acid desaturases associated with dietary changes. *Molecular biology and evolution*, 34(6), 1307-1318.
- Mathias, R. A., Fu, W., Akey, J. M., Ainsworth, H. C., Torgerson, D. G., Ruczinski, I., ... & Chilton, F. H. (2012). Adaptive evolution of the FADS gene cluster within Africa. *PloS one*, 7(9).

> Le **document 9** est une illustration des conséquences des changements alimentaires sur le génotype des populations européennes, en particulier sur l'haplotype portant les allèles des enzymes FADS1 et FADS2. On peut déduire de ce document que l'haplotype D est devenu plus fréquent dans les populations européennes consécutivement à l'augmentation des aliments végétaux. Les allèles des enzymes FADS 1 et FADS2 devant être mieux adapté à la réalisation des premières étapes métaboliques liées à l'apport des acides gras polyinsaturés des aliments végétaux.

Source : Ye, K., Gao, F., Wang, D., Bar-Yosef, O., & Keinan, A. (2017). Dietary adaptation of FADS genes in Europe varied across time and geography. *Nature ecology & evolution*, 1(7), 1-11.

Buckley *et al.* proposent la représentation visuelle ci-dessous pour montrer comment la culture de céréales à modifier les apports en acides gras polyinsaturés est exercée en conséquence une pression de sélection sur les différents allèles des enzymes FADS1 et FADS1.

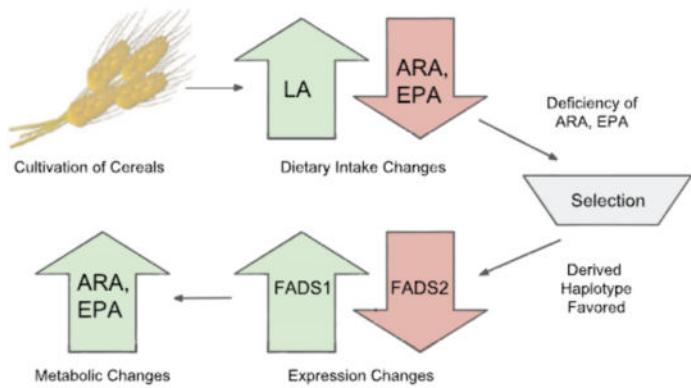


FIG. 6. Summary model. The adoption of an agricultural diet would have increased LA and decreased ARA and EPA consumption, potentially causing a deficiency in LC-PUFAs. Selection would have then favored the derived haplotype which is associated with increased FADS1 and decreased FADS2 expression, as well as decreased LA and increased ARA and EPA levels.

Reproducteur de : Buckley, M. T., Racimo, F., Allentoft, M. E., Jensen, M. K., Jonsson, A., Huang, H., ... & Jørgensen, M. E. (2017). Selection in Europeans on fatty acid desaturases associated with dietary changes. *Molecular biology and evolution*, 34(6), 1307-1318.

LA : C18 :2 (oméga 6 abondant dans les aliments végétaux. ARA : C20 :4 (oméga 6 abondant dans la viande). EPA : C20 :5 (oméga 3 abondant dans les produits de la mer)

> Dans la littérature scientifique, on trouve d'autres exemples sur d'autres populations humaines.

- C'est le cas de l'adaptation du métabolisme des acides gras polyinsaturés au régime alimentaire inuit (riche en poissons et produits de la mer) :

Fumagalli, M., Moltke, I., Grarup, N., Racimo, F., Bjerregaard, P., Jørgensen, M. E., ... & Christensen, C. (2015). Greenlandic Inuit show genetic signatures of diet and climate adaptation. *Science*, 349(6254), 1343-1347.

- Autre exemple concernant les populations africaines. Il y a 85 000 ans, il y a eu sélection d'allèles de FADS permettant aux populations africaines (auparavant cantonnées près des Grands Lacs et des littoraux) d'être plus indépendante de l'alimentation en poissons (utilisation d'aliments végétaux) qui leur aurait permis de conquérir le reste du territoire africain et de sortir l'Afrique :

- Mathias, R. A., et coll., *Op. cit.*
- Fu, W., Akey, J. M., Ainsworth, H. C., Torgerson, D. G., Ruczinski, I., ... & Chilton, F. H. (2012). Adaptive evolution of the FADS gene cluster within Africa. *PloS one*, 7(9).

Ressources complémentaires

Unité 1

- Colloque de la Société Botanique de France, 2015 « La domestication des végétaux » par exemple les deux conférences :

– Comprendre l'origine des plantes cultivées, une longue histoire (S. Rebular)

www.youtube.com/watch?v=8yRZBzG8nZ4&list=UUIlzpqqUc-freKPVYwgOA&index=15

– La domestication : un mutualisme entre hommes et plante (M.-A. Selosse)

www.youtube.com/watch?v=SCoY5FQQFQE&list=UUIlzpqqUc-freKPVYwgOA&index=16

- Rebular S. *Le défi alimentaire*. Belin éducation, 2018. Chapitre 5 : « Aux origines : la domestication des plantes et des animaux. »

- Guillaume, J. *Ils ont domestiqué plante et animaux*. Quae, 2011.

Unité 2

FAO, Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture.

www.fao.org/plant-treaty/fr/

Rebular S. *Le défi alimentaire*. Belin éducation, 2018. Chapitre 7 : « L'amélioration des plantes cultivées » ; Chapitre 10 : « L'érosion et la conservation de l'agro-biodiversité ».

Unité 3

Colloque Académie des sciences, 2017. « Les problèmes éthiques associés à la modification des organismes par la technologie CRISPR-Cas9. » www.academie-sciences.fr/fr/Colloques-conferences-et-debats/ethiques-crispr-cas9.html

GNIS pédagogie, *La sélection assistée par marqueurs*. www.gnis-pedagogie.org/sujet/seLECTION-assistEE-marqueurs/

Minet, P., 2016. « Débat sur des outils génétiques inédits ». Le Temps. www.letemps.ch/sciences/debat-outils-genetiques-inedits

Rebular S. *Le défi alimentaire*. Belin éducation, 2018. Chapitre 7 : « L'amélioration des plantes cultivées » ; « Les plantes génétiquement modifiées » et Chapitre 10 : « L'érosion et la conservation de l'agro-biodiversité ».

Corrigé des parcours « tâches complexes »

Unité 1

> Éléments de correction

La production demandée est un exposé oral. On attend une courte introduction et une courte conclusion. Les élèves pourront s'appuyer s'ils le souhaitent sur des supports visuels.

Le développement pourrait être structuré de façon chronologique : recherche des indices (botaniques, archéologiques, historiques, géographiques, génétiques) ; mise en cohérence des indices et propositions de scénario de domestication. On veillera à ce que les hypothèses proposées soient bien présentées comme des hypothèses justement.

> Support d'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Ne présente pas explicitement la différence entre les indices et les scénarios hypothétiques	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Certains indices essentiels ou des liens de cause à effet sont oubliés rendant le scénario très incertain.• Les informations ne sont pas (ou partiellement mises en relation)	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Ne localise pas géographiquement les événements• N'explique pas le processus de sélection artificielle à l'origine de la domestication	Complets ou suffisants	
Communication Diaporama	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• L'exposé n'est pas correctement structuré• L'exposé ne précise pas l'origine des informations citées• L'exposé ne s'appuie pas sur les supports visuels	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Quelques maladresses dans la structuration de l'exposé• L'exposé est correct mais mal articulé avec les supports visuels	Le discours est bien structuré et cohérent par rapport aux figures présentées

Unité 2

> Éléments de correction

La production demandée est un exposé oral. On attend une courte introduction et une courte conclusion. Les élèves pourront s'appuyer s'ils le souhaitent sur des supports visuels.

On attend les éléments de contenu suivants dans le développement :

- importance de la diversité génétique comme source de caractères nouveaux pour l'amélioration végétale (exemples concernant la tomate, analyse des documents de la page de gauche) ;
- risques liés à la perte de diversité génétique (sensibilité aux bioagresseurs en particulier).

> Support d'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les atouts de la diversité génétique n'apparaissent pas clairement	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Les liens de cause à effet ne sont pas clairs (rôle de l'action humaine).	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Ne s'appuie pas sur les documents pour montrer l'importance de la diversité• Ne donne pas d'exemple de risques liés à la perte diversité	Complets ou suffisants	
Communication Diaporama	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• L'exposé n'est pas correctement structuré• L'exposé ne précise pas l'origine des informations citées• L'exposé ne s'appuie pas sur les supports visuels	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Quelques maladresses dans la structuration de l'exposé• L'exposé est correct mais mal articulé avec les supports visuels	Le discours est bien structuré et cohérent par rapport aux figures présentées

Unité 3

> Éléments de correction

La production demandée est un exposé oral. On attend une courte introduction et une courte conclusion. Les élèves pourront s'appuyer s'ils le souhaitent sur des supports visuels.

On attend les éléments de contenu suivant dans le développement :

- la mise au point de nouvelles variétés de plantes repose sur la sélection artificielle ;
- la mise au point de nouvelles variétés de plantes nécessite de disposer d'une grande diversité de caractères que l'on peut intégrer à la variété à améliorer ;
- la mise au point de variétés de plantes nécessite un travail d'observation et de sélection important des individus présentant les caractéristiques recherchées.

> Support d'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Ne précise pas l'origine des caractères que l'on peut utiliser pour mettre au point de nouvelles variétés	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Ne montre pas l'intérêt des technologies contemporaines	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Ne s'appuie pas sur les documents de la double page• N'oppose pas clairement les techniques qui favorisent la diversité de celles qui contribuent à la sélection	Complets ou suffisants	
Communication Diaporama	Non conforme	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• L'exposé n'est pas correctement structuré• L'exposé ne précise pas l'origine des informations citées• L'exposé ne s'appuie pas sur les supports visuels	Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Quelques maladresses dans la structuration de l'exposé• L'exposé est correct mais mal articulé avec les supports visuels	Le discours est bien structuré et cohérent par rapport aux figures présentées

Unité 4

> Éléments de correction

La production attendue peut être un exposé oral ou un poster. On attend dans tous les cas qu'elle s'appuie sur des données précises et des scénarios interprétatifs, et donc sur une analyse et une interprétation des documents de la double page. Les supports visuels paraissent nécessaires pour traiter ce sujet.

Le propos pourra être organisé en présentant d'abord les données et les faits, puis dans un second temps en proposant des interprétations et les processus permettant d'expliquer les observations. On attend des élèves qu'ils expliquent clairement le mécanisme de sélection naturelle qui s'exerce sous l'influence de l'alimentation sur les populations humaines.

> Support d'évaluation

Niveaux de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Ne s'appuie pas sur les faits et présente les scénarios hypothétiques comme des certitudes	Démarche pertinente mais maladroite. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• N'articule pas clairement ce qui appartient aux données ce qui est appartient aux interprétations	Démarche à la fois pertinente et cohérente.
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissance et/ou d'extraction d'information des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Ne s'appuie pas sur les documents la double page• Ne montre pas le rôle de la sélection naturelle dans l'évolution des populations humaines.	Complets ou suffisants	
Communication Diaporama, poster	Non conforme	Le propos n'est pas correctement structuré	Des maladresses dans la structuration	Le discours est bien structuré et cohérent par rapport aux figures présentées

Propositions corrigées de parcours pas-à-pas

Unité 1

Question 1. Comparez dans un tableau les formes sauvages et domestiques de la carotte et du blé (doc. 3 et 5).

	Formes sauvages	Formes domestiques
Carotte	Racines de petite taille, blanches, goût amer	Racines de grande taille (hypertrophiées), riches en sucres, de couleur orange, riches en bêta-carotène, goût amer absent
Blé	Rachis fragile et cassant, les grains gardent leurs glumelles à maturité (grains vêtus)	Rachis solide, les grains perdent leurs glumelles à maturité (grains nus)

Question 2. Comment appelle-t-on l'ensemble des caractères qui distinguent les formes domestiques et des formes sauvages (doc. 7) ?

Le syndrome de domestication

Question 3. Décrivez et expliquez les évolutions des proportions des formes de blé au Proche-Orient (doc. 6).

On constate que, lorsque le site archéologique est ancien, les formes de blé retrouvées sont principalement des formes sauvages, avec environ 25 % de blé présumé domestique sur le site de Qaramel (10200 BP). En revanche, plus le site est récent, plus la proportion de blé domestique ou présumé domestique est importante. Sur le site de Kosak Shamali (6 500 BP) on trouve ainsi plus de 90 % de blé domestique ou présumé domestique.

Question 4. Montrez que les formes sauvages des parents du blé sont adaptées à la vie sauvage tandis que le blé domestique est utile aux humains (doc. 5 et 7).

Le rachis fragile des blés sauvages favorise leur dissémination, les glumelles qui restent sur le grain à maturité permettent leur protection. À l'inverse, les rachis solides sur les blés domestiques facilitent leur récolte, tandis que les grains nus facilitent le battage, la formation de farine et la digestibilité des grains.

Question 5. Écrivez un court texte présentant quelques données permettant d'identifier l'origine des plantes cultivées (doc. 2 à 7).

Pour retrouver l'origine des plantes cultivées, on peut s'appuyer sur l'étude de la diversité des plantes domestiques et de leurs parents sauvages (doc. 1 et 4). La comparaison botanique entre parents sauvages et parents cultivés permet également de faire des hypothèses sur les plus proches parents sauvages (doc. 3 et 5). Les données archéologiques nous apprennent comment les formes domestiques ont pu progressivement dominer les formes sauvages dans les cultures (doc. 6 et 7).

Unité 2

Question 1. Comparez la diversité des formes sauvages et des formes domestiques de la tomate (doc. 1 à 4)

La diversité morphologique des tomates est très importante (doc. 1). Néanmoins, cette diversité a diminué au cours du processus domestication entre les formes sauvages et les formes domestiquées (doc. 2). La diversité génétique des formes sauvages constitue un réservoir de caractères (absorption du fer, résistance aux nématodes et doryphores, couleur jaune orange, forte teneur en sucre, etc.) potentiellement utilisable pour l'amélioration des plantes (doc. 3 et 4).

Question 2. Pourquoi peut-on dire que les tomates sauvages présentent des atouts pour les humains mêmes lorsqu'elles sont peu comestibles (doc. 3 et 4) ?

Parce qu'elles possèdent des caractéristiques potentiellement utiles pour les humains : résistance aux maladies, taille du fruit, qualités nutritionnelles, etc.

Question 3. Quelle est la conséquence du mode de multiplication de la banane sur sa diversité génétique (doc. 5) ?

Les bananiers se multiplient de façon végétative. Par conséquent l'ensemble des bananiers d'une variété donnée possède le même génotype. Ce sont des variétés clones dans lesquelles la diversité génétique est nulle.

Question 4. Pourquoi les maladies affectant les bananiers d'exportation sont-elles particulièrement inquiétantes (doc. 5 et 6) ?

Il existe très peu de variétés utilisées pour l'exportation (très majoritairement Naine Cavendish aujourd'hui). Or ces variétés ont elle-même une diversité génétique nulle. Par conséquent, un parasite, tel que celui responsable de la maladie de Panama, s'il est adapté à ce génotype, peut se propager dans toutes les plantations où cette variété est utilisée, menaçant ainsi toute la production de bananes d'exportation.

Question 5. Que peut-on espérer pour se débarrasser de la maladie de Panama (doc. 6 et 7) ?

On peut espérer que l'on trouve des variétés résistantes à la maladie et présentant des caractéristiques intéressantes pour la production de bananes par ailleurs (longue conservation notamment).

Question 6. Écrivez un court texte faisant un bilan de l'importance de la diversité génétique chez les plantes cultivées (doc. 1 à 7).

D'après les documents de la double page, on constate que la diversité génétique des plantes cultivées est une richesse puisqu'elle est un réservoir de caractéristiques potentiellement utiles pour mettre au point de nouvelles variétés et ainsi lutter contre de nouvelles maladies ou améliorer les variétés existantes.

Unité 3

Question 1. Donnez des exemples de diversité utilisée par les sélectionneurs (doc. 2 et 3).

Les sélectionneurs peuvent utiliser de très nombreuses sources de diversité pour réaliser le travail d'amélioration des plantes. Cette diversité peut provenir des variétés existantes, des parents sauvages des plantes cultivées ou de la sélection de mutations spontanées. Par ailleurs, ils peuvent également provoquer des mutations (mutations induites) ou tenter des croisements avec des espèces éloignées.

Question 2. Expliquez en quoi la sélection artificielle peut être un travail extrêmement lourd et en quoi il peut être facilité par la sélection assistée par marqueurs (doc. 1 et 4).

Lorsque l'on dispose d'un nombre très important de plantes variées de la même espèce (diversité de phénotypes résultant d'une diversité de génotypes) dont on veut extraire quelques individus qui possèdent simultanément tous les caractères recherchés, il est nécessaire de les étudier et de les analyser individuellement, ce qui peut constituer un travail d'observation extrêmement lourd, d'autant que beaucoup de caractères du phénotype ne sont visibles qu'à l'âge adulte voire après formation des fruits.

La sélection assistée par marqueurs permet, sur la base d'analyses génétiques, d'étudier sur des plants très jeunes les caractéristiques génétiques présentes et éviter ainsi d'avoir à attendre le développement complet de la plante.

Question 3. Qu'apporte spécifiquement l'édition génomique par Crispr-Cas9 (doc. 5 et 6) ?

Il est possible d'éditer (couper, modifier, remplacer) n'importe quel fragment d'ADN, ce qui permet d'agir très précisément sur des modifications du génome.

Question 4. Écrivez un court texte décrivant les étapes d'un programme de mise au point de nouvelles variétés (doc. 1 à 6).

La mise au point de nouvelles variétés repose d'abord sur l'identification des caractères que l'on souhaite obtenir. On augmente alors la diversité d'une variété que l'on souhaite améliorer (par croisement avec d'autres variétés ou des espèces sauvages apparentées par exemple). À partir de la descendance diversifiée obtenue, on choisit quelques individus présentant les caractéristiques intéressantes (sélection artificielle) et qui vont contribuer à la génération suivante. En réitérant ces deux étapes (diversification puis sélection), on peut arriver à obtenir des individus ayant une combinaison de caractères intéressants qui seront à l'origine d'une nouvelle variété.

Unité 4

Question 1. Expliquez comment une alimentation riche en amidon peut au fil des générations, modifier la teneur en amylase de la salive (doc. 1 à 4).

On constate, que la teneur en amylase de la salive peut augmenter si le nombre de copies du gène AMY1 porté par une personne est important (doc. 3). Il semble que les personnes ayant un régime alimentaire riche en amidon possède davantage de copies du gène AMY1 que celles qui ont un régime pauvre en amidon (doc. 4). On peut faire l'hypothèse, que le nombre de copies du gène dans les populations ayant régime alimentaire riche en amidon a été sélectionné au fil des générations. En effet, si, dans une population, une personne digère mieux l'amidon (parce qu'elle a davantage de copies du gène), elle aura un avantage sélectif (meilleur taux de survie, meilleur taux de reproduction) qui sera à l'origine d'une augmentation de la proportion d'individus possédant ce caractère dans la génération suivante.

Question 2. Quelles hypothèses pouvez-vous faire pour expliquer la modification de la morphologie de la mâchoire inférieure chez les humains depuis quelques milliers d'années (doc. 5) ?

On observe une diminution de taille de la mâchoire inférieure chez les humains depuis plusieurs milliers d'années qui résulte probablement d'une réduction de la puissance des muscles masticateurs. On peut imaginer, qu'aujourd'hui, la nécessité de muscles masticateurs puissants est moindre qu'il y a 6000 ans, notamment parce que la cuisson des aliments est devenue fréquente et que les végétaux sélectionnés sont plus faciles à mastiquer que les végétaux sauvages.

Question 3. Expliquez en quoi la modification du régime alimentaire a pu contribuer à modifier les allèles des enzymes FADS portées par les Européens (doc. 7 à 9).

Les enzymes FADS sont impliqués dans le métabolisme des acides gras oméga-3 et oméga-6. Or selon les régimes alimentaires, les proportions des différents acides gras de ces deux catégories ne sont pas les mêmes. En conséquence, les voies métaboliques de ces acides gras doivent s'adapter aux différents régimes alimentaires. Chez les Européens, au cours du Néolithique, il y a eu un changement d'alimentation depuis une alimentation plus riche en viande (issue de la chasse) vers une alimentation plus riche en végétaux d'origine agricole. Or ce régime alimentaire fournit des acides gras oméga-3 et omégas-6 devant subir des réactions supplémentaires dans les voies de synthèse. Les individus qui possédaient les allèles des enzymes FADS permettant d'adapter les voies de biosynthèse à ces nouveaux régimes alimentaires ont été favorisés (meilleure survie, meilleure reproduction). Les allèles sont devenus plus fréquents dans les générations suivantes et ce sont ainsi répandus dans les populations européennes.

Question 4. Écrivez un court texte pour expliquer comment l'alimentation contribue à l'évolution humaine (doc. 1 à 9).

L'alimentation exerce une pression de sélection sur les populations humaines. En effet, dans une population donnée, avec une alimentation donnée, les individus capables d'exploiter au mieux cette alimentation (meilleure santé, meilleure survie, plus de descendants) pourront transmettre, si le caractère est génétique, cette capacité à leurs descendants. Lesquels auront également un avantage sélectif et à leur tour plus de descendants. C'est ainsi qu'au fil des générations les caractères avantageux concernant l'adaptation à un régime alimentaire seront favorisés et deviendront plus fréquents dans la population.

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

1. L'ensemble des caractères qui différencient une plante cultivée domestique de son plus proche parent sauvage est nommé syndrome de domestication.

2. Chez la téosinte, la protection des grains évite qu'ils soient détruits par des animaux et permet leur dissémination après passage dans le tube digestif de ceux-ci. La désarticulation des épis facilite la dissémination des grains et augmente les chances pour ces derniers de rencontrer des conditions favorables. Enfin, les nombreuses ramifications de la tige permettent de décaler la maturité des grains, augmentant encore les chances de rencontrer des conditions favorables.

Concernant le maïs, l'absence de protection des grains favorise leur digestion, la solidité des épis évite que les grains ne se dispersent avant la cueillette. La tige unique permet de concentrer toutes les ressources de la photosynthèse dans peu d'épis et évite d'avoir des épis de maturité différente sur le même pied.

3. Dans le document 2, on constate, par rapport aux anticorps anti-actine qui servent de témoin, que le gène tga-1 est davantage exprimée dans la téosinte que dans le maïs. Cette expression est particulièrement importante à partir d'un épi de 12 mm et culmine lorsque l'épi fait environ 16 mm.

4. On peut supposer que ce gène a été involontairement l'objet d'une sélection artificielle par les premiers paysans ayant réalisé la domestication de la téosinte en maïs. En effet, en choisissant, dans les populations de téosinte, celles dont les protections du grain étaient moins importantes (caractère qui a pu être recherché car les grains étaient alors plus digestes), ils ont sélectionné ce caractère au fil des générations. Les grains ainsi choisis ayant servi de semences pour les générations de maïs suivants, la sélection artificielle d'une génération à l'autre a permis progressivement d'obtenir du maïs aux grains nus.

Exercice 3

1. Une plante domestiquée diffère de son plus proche parent sauvage parce qu'elle possède des caractères différents de celui-ci, généralement utiles aux humains (plus grande taille, meilleure qualité nutritionnelle, facilité de culture, etc.).
2. D'après l'arbre, on constate que le plus proche parent sauvage du pommier domestique (*Malus domestica*) est le premier d'origine chinoise *Malus sieversii*.
3. Non, *Malus sieversii* n'est pas le seul pommier sauvage à avoir contribué au génotype des pommiers domestiques. Les analyses génétiques montrent que le pommier domestique possède également des séquences provenant de *Malus orientalis* et *Malus sylvestris*.
4. On peut proposer le scénario suivant d'après les données génétiques : le pommier domestique aurait été domestiqué dans la région du Tian Shan en Chine, puis transporté à travers les routes de la soie, peut-être sous forme de pommes dont les pépins auraient donné des pommiers dans les différentes régions traversées par ces routes. Les pommiers domestiques grandissant le long de la route de la soie se sont hybridés avec les pommiers locaux, *Malus orientalis* en Asie centrale et au Moyen-Orient puis *Malus sylvestris* en Europe. Au fil des échanges et des générations, le pommier domestique a ainsi acquis des séquences génétiques de ses différents parents.
5. On constate que la migration du pommier domestique le long de la route de la soie a contribué à des hybridations entre les différentes espèces de pommier. Il y a donc une « pollution » génétique des pommiers sauvages en contact avec les pommiers domestiques.

Exercice 4

On constate que sur les plants mutants qui ne synthétisent pas les anthocyanes, les altises sont davantage présentes et provoquent davantage de lésions sur la plante (en comparaison avec un plan témoin capable de produire les anthocyanes). On peut donc supposer que les anthocyanes, sont une protection contre les altises. Il peut donc être intéressant de sélectionner lors d'un programme de création variétale spécifiquement des plants produisant beaucoup d'anthocyanes.

Exercice 5

1. Le lait apporte des protéines (dont la composition d'acides aminés est équilibrée par rapport aux besoins nutritionnels humains), des matières grasses, du calcium et des vitamines (A et D en particulier).
2. On peut considérer que la capacité à digérer le lait permet, en période de disette ou de famine, de disposer d'une ressource alimentaire facile à obtenir dans les régions d'élevage. En conséquence, les personnes capables de digérer le lait à l'âge adulte ont un avantage sélectif en période de disette et dans les régions d'élevage. Digérer le lait à l'âge adulte est donc une adaptation dans ce contexte.
3. On peut faire appel à des mécanismes de sélection naturelle où la pression de sélection serait la nourriture disponible et le caractère variant d'une personne à l'autre la capacité à digérer le lait à l'âge adulte. Si on imagine une population d'origine dans laquelle certains adultes digèrent mieux le lait que d'autres. Ces personnes, à condition de disposer de lait, ont pu avoir une meilleure survie et un meilleur taux de reproduction. Leur capacité à digérer le lait, si elle est transmissible à la descendance, a ainsi pu devenir plus fréquente dans la génération suivante et progressivement se répandre comme un caractère favorable jusqu'à devenir majoritaire puis dominante dans la population.

Exercice 6

On constate que la diversité génétique des tomates aux Pays-Bas, comparé à la diversité des formes sauvages, a considérablement diminué jusque dans les années 1960. En revanche, on observe une augmentation de la diversité après 1960. On peut expliquer cette augmentation de diversité par l'utilisation de formes sauvages dans la formation de nouvelles variétés intégrant ainsi la diversité sauvage dans les variétés contemporaines. Cette utilisation de formes sauvages a notamment permis d'intégrer dans les variétés contemporaines des résistances aux maladies puis des améliorations du goût et de l'aspect.

Exercice 7

- 1.** Pour multiplier les pommes de terre, les agriculteurs utilisent des tubercules de l'année précédente. C'est donc un exemple de multiplication végétative. Les individus « filles » sont donc génétiquement identiques aux individus « mère ». Ensemble, ils forment un clone.
- 2.** Les variétés cultivées de pommes de terre sont donc des variétés clones, sans diversité génétique.
- 3.** Le parasite, le mildiou, s'il était adapté au génotype de la pomme de terre a pu contaminer très rapidement l'ensemble des pommes de terre du pays, puisqu'elles avaient toutes le même génotype. Il n'y avait pas d'individus plus résistants qui auraient pu limiter la propagation du parasite ou être utilisés par les paysans pour produire des tubercules malgré la présence du mildiou.

Chapitre 12. Le climat au Cénozoïque

À partir de données de l'évolution climatique du passé proche (150 ans), le chapitre 12 introduit, un thème clef du programme de terminale puisqu'il intervient à la fois dans l'enseignement de spécialité et dans l'enseignement scientifique du tronc commun. Dans ce premier chapitre, les élèves découvrent comment, à partir des indices biologiques, chimiques et géologiques, il est possible de reconstituer le climat en un lieu donné ou à l'échelle du globe. Le chapitre remonte le temps en traitant d'abord des 150 dernières années (**unité 1**), puis de l'Holocène et de son climat globalement chaud (**unité 2**), puis du Pléistocène et des alternances glaciaires-interglaciaire (**unité 3**). L'**unité 4** permet de comprendre comment la place de la Terre dans le système solaire (évoquée en 1^{re} en enseignement scientifique) joue un rôle important dans le climat. Dans l'**unité 5**, les indices évoqués précédemment sont remobilisés pour reconstituer le climat très contrasté du Cénozoïques. L'**unité 6** permet de mettre en évidence le rôle clef de la géodynamique sur le climat global.

Thème 4. Les climats de la Terre, comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain

Connaissances	Capacités, attitudes
D'environ 1°C en 150 ans, le réchauffement climatique observé au début du XXI ^e siècle est corrélé à la perturbation du cycle biogéochimique du carbone par l'émission de gaz à effet de serre liée aux activités humaines. > Unité 1	Mettre en évidence l'amplitude et la période des variations climatiques étudiées à partir d'une convergence d'indices. Mobiliser les connaissances acquises sur les conséquences des activités humaines sur l'effet de serre et sur le cycle du carbone. > Unité 1
À l'échelle du Quaternaire, des données préhistoriques, géologiques et paléo-écologiques attestent l'existence, sur la période s'étendant entre -120 000 et -11 000 ans, d'une glaciation, c'est-à-dire d'une période de temps où la baisse planétaire des températures conduit à une vaste extension des calottes glaciaires. Les témoignages glaciaires (moraines), la mesure de rapports isotopiques de l'oxygène dans les carottes polaires antarctiques et les sédiments font apparaître une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires durant les derniers 800 000 ans. > Unités 2 et 3	Rassembler et confronter une diversité d'indices sur le dernier maximum glaciaire et sur le réchauffement de l'Holocène (changement de la mégafaune dans les peintures rupestres, cartographie des fronts morainiques, construction et utilisation de diagrammes polliniques, terrasses, paléoneveaux marins...). > Unité 2
Les rapports isotopiques montrent des variations cycliques coïncidant avec des variations périodiques des paramètres orbitaux de la Terre. Celles-ci ont modifié la puissance solaire reçue et ont été accompagnées de boucles de rétroactions positives et négatives (albédo lié à l'asymétrie des masses continentales dans les deux hémisphères, solubilité océanique du CO ₂) ; elles sont à l'origine des entrées et des sorties de glaciation. > Unité 4	Comprendre et utiliser le concept de thermomètre isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ dans les glaces arctiques et antarctiques, $\delta^{18}\text{O}$ dans les carbonates des sédiments océaniques) pour reconstituer indirectement des variations de températures. > Unités 2 et 3
Globalement, à l'échelle du Cénozoïque, et depuis 30 millions d'années, les indices géochimiques des sédiments marins montrent une tendance générale à la baisse de température moyenne du globe. Celle-ci apparaît associée à une baisse de la concentration atmosphérique de CO ₂ en relation avec l'altération des matériaux continentaux, notamment à la suite des orogénèses du Tertiaire. De plus, la variation de la position des continents a modifié la circulation océanique. > Unités 5 et 6	Mettre les variations temporelles des paramètres orbitaux, définis par Milankovitch, en relation avec les variations cycliques des températures au Quaternaire. > Unité 4

Compétences travaillées et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
Pratiquer des langages <ul style="list-style-type: none"> Utiliser un logiciel de traitement de données. Communiquer à l'écrit sous forme d'un texte Communiquer à l'écrit par un schéma Utiliser un logiciel de simulation Utiliser les SIG 	<ul style="list-style-type: none"> Unités 3 et 4 Unité 4 Unité 1 Unités 4 et 6 Unité 3
Pratiquer des démarches scientifiques <ul style="list-style-type: none"> Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution Interpréter des résultats expérimentaux des données et en tirer des conclusions Observer, expérimenter, calculer Comprendre le lien entre un phénomène naturel et le langage mathématique 	<ul style="list-style-type: none"> Unité 1 et 2 Unité 2 Unité 3 Unités 2, 3, 5 et 6
Concevoir, créer, réaliser <ul style="list-style-type: none"> Concevoir et mettre en œuvre un protocole 	<ul style="list-style-type: none"> Unités 1 et 2
Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre <ul style="list-style-type: none"> Identifier les techniques pour garder une trace : faire un tableau. 	<ul style="list-style-type: none"> Unités 2 et 6
Adopter un comportement éthique et responsable <ul style="list-style-type: none"> Identifier les impacts (bénéfices nuisances) des activités humaines sur l'environnement à différentes échelles Appliquer des règles de sécurité au laboratoire 	<ul style="list-style-type: none"> Unité 1 Unités 1 et 2

Choix pédagogiques

Unité 1

- > En étudiant les impacts de l'élévation de la température et de la concentration atmosphérique en CO₂ sur l'évolution d'écosystèmes continentaux et marins, on replace dans un contexte plus biologique des données déjà abordées dans l'enseignement scientifique du tronc commun de terminale.
- > Les **documents 1 et 2** permettent d'étudier l'impact de l'évolution du climat sur les biomes montagnards. Ils permettent de définir la notion de biome (terme exploité dans tout le thème) et d'analyser leur répartition selon l'altitude, le froid et le stress hydrique lorsque l'eau est sous forme de glace. Ils peuvent être l'occasion de faire un rappel sur les adaptations des angiospermes à la vie fixée, vues dans le chapitre 8. Les deux premières cartes montrent l'évolution de 1876 à 2000, où l'on voit clairement une diminution de la surface des biomes de la ceinture subalpine, de la forêt mixte au dépend de la forêt décidue. Le graphique du **document 2** montre que ce phénomène s'accompagne d'un déplacement des biomes vers des altitudes plus élevées. Ceci correspond donc bien à la manifestation d'un effet du réchauffement climatique global à l'échelle d'une chaîne de montagnes. La troisième carte montre les prévisions d'évolution de ces biomes dans des conditions favorables. c'est-à-dire qui correspondent à un scénario d'évolution climatique de type Giec RCP2.6 ou 4.5 , avec un taux de CO₂ dont la stabilisation permet que l'augmentation de température globale ne dépasse pas +2°C à la fin du siècle (vu en enseignement scientifique terminale) . La quatrième carte montre les effets d'un forçage radiatif lié aux gaz à effet de serre (GES) supérieur aux prévisions du scénario Giec RCP4.5 (climat tempéré chaud sans saison sèche et à été chaud). On voit alors que, dans que la majorité des cas, les étages alpins et boréaux ont disparu aux dépens d'une forêt tempérée. On distingue même l'apparition de zone arides au niveau de l'Autriche.
- > L'**activité numérique** proposée permet d'observer les mêmes données à l'échelle globe entier et de visualiser ainsi la réduction des surfaces occupées par les toundras et les forêts de conifères dans l'hémisphère Nord. Elle permet aussi d'étudier l'aridification de certaines régions et la remontée de certaines essences végétales vers le Nord. En ne travaillant que sur la région alpine définie dans les cartes du document 1, il est possible de réaliser des profils d'élévation au travers des Alpes, sur lesquels les élèves pourront placer l'évolution altimétrique des biomes au cours du temps.
- > L'expérience simple proposée dans le **document 3** (protocole téléchargeable) permet de modéliser l'effet du rejet de GES sur le pH de l'eau (douce, marine et celle qui percole à la surface du globe). Il est possible de remplacer le bullage (réalisé par l'élève qui souffle dans le tube en verre) par n'importe quel moyen de production de CO₂ : dissolution de carbonate par l'acide, combustion d'un composé riche en carbone comme celui qui est proposé dans l'activité expérimentale de la p. 306.
- > Le **document 4** aborde l'équilibre entre le CO₂ atmosphérique et le CO₂ océanique. Il montre comment l'accroissement de la concentration atmosphérique en CO₂ peut induire une diminution du pH. Il explique aussi l'équilibre de formation/dissolution du carbonate de calcium (calcite, potentiellement étudiée en enseignement scientifique 1^{re} dans le chapitre sur les cristaux du vivant).
- > Les données précédentes sont exploitées dans le **document 5** pour montrer que les communautés de certains écosystèmes peuvent être affectées de manière différente. Les études montrent que si les organismes créateurs d'habitats sont touchés (moule, cnidaires), la biodiversité peut être affectée. Certaines communautés sont remplacées par d'autres communautés d'organismes moins sensibles (espèces opportunistes, généralistes écologiques, etc.). Les études montrent que les organismes qui réalisent la photosynthèse (algues, coraux symbiotiques, foraminifères, etc.) résistent mieux à la diminution de pH, notamment en termes de calcification. Rappelons que les foraminifères (dont il sera beaucoup question dans ce thème) élaborent leurs loges en créant à l'aide de pompes à proton un faible pH à l'extérieur de la cellule, ce qui favorise la précipitation du calcaire. Cependant les coraux solitaires sont plus sensibles que les organismes coloniaux. Lorsque l'on généralise les effets de

l'acidification des eaux, il est donc important de préciser que cela peut être bénéfique ou sans effets pour certaines espèces et très grave pour d'autre (ces notions seront reprises dans le chapitre 14).

> Les graphiques du **document 6**, issus des comptes rendus du Giec (cf. chapitre 14 et enseignement scientifique) servent à introduire les composantes dont on va avoir besoin dans les chapitres suivants. La composante solaire (impact de l'insolation sur les anomalies) sera réutilisée pour la compréhension de l'impact du système solaire et des paramètres orbitaux. On observe que l'insolation varie de manière régulière : des facteurs autres que ceux liés à la planète Terre et aux humains agissent donc sur le climat (unités 4 et 5 et chapitre 13). L'impact géodynamique (impact du volcanisme) sera largement abordé dans le chapitre 13. La composante humaine (4^e graphique, qui est directement cité dans le programme) sera exploitée dans le chapitre 14 et en enseignement scientifique.

> Dans son ensemble, ce document montre une corrélation entre l'accroissement de l'importance des anomalies thermiques et la composante humaine. L'histogramme montre que ce sont principalement les rejets liés à la cimenterie et à la combustion des combustibles fossiles qui sont corrélés de l'accroissement de la température. Un lien peut alors être fait avec l'enseignement scientifique de terminale, en posant la question suivante : cette corrélation est-elle synonyme de causalité ? La réponse est non : ce sont les travaux des climatologues qui fournissent le cadre théorique permettant de passer de la corrélation à la causalité et de conclure que les émissions de gaz à effet de serre par les humains sont responsables du changement climatique actuel.

Unité 2

> Cette unité aborde l'Holocène, période où *Homo sapiens* peuplait et perturbait déjà les écosystèmes (par exemple dès l'avènement de la riziculture en milieu humide, qui était fortement productrice de méthane). L'Holocène suit la dernière période glaciaire et correspond à une période de radoucissement qui a débuté il y a 11 700 ans « b2k » (années b2k : années avant l'an 2000, à ne pas confondre avec les années « BP », before present, c'est-à-dire avant 1950). L'unité va montrer ce redoux grâce à des indices trouver dans les sédiments continentaux (tourbe) ou dans des sédiments océaniques (foraminifères).

> Les **documents 1 à 3** s'attachent à la recherche d'indice dans la tourbe. Le **document 1** explique comment se forme la tourbe à partir des sphagnes. Les photos montrent le biome actuel associé à cette tourbière des Vosges et permet d'évoquer les formes végétales qui seront ensuite observées dans l'extrait de tourbe (gymnospermes, angiospermes et herbacées).

> Le **documents 2** est un extrait de pollen de la tourbière du doc. 1. On y observe du noisetier (qui résiste au froid mais craint la sécheresse, cf doc. 3), des poacées (qui résistent au froid et à la sécheresse, cf doc. 3), du carex et du saule (habituellement présents dans les terrains humides). L'extraction de pollen est très simple à réaliser (protocole disponible en numérique) et l'analyse des associations végétales est systématiquement dans les sujets d'ECE (cf par exemple exercice 8 p. 317).

> Le diagramme de la grande pile (**documents 3**) se retrouve fréquemment dans les exercices et sujets de bac. Ici, il montre qu'au début de l'Holocène, la végétation a radicalement changé et qu'on est passé d'espèces de steppe froide (pollens d'herbacées majoritaires et arbres résistants au froid) à des espèces préférant les climats tempérés chauds relativement humides et sans gelées printanières. À la seconde moitié de l'Holocène, le climat change à nouveau et devient plus sec. Un exercice utilisant le logiciel gratuit Paléobiomes disponible au téléchargement sur le site de l'Institut Français de l'Éducation sur la plateforme Acces <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/paleo/paleobiomes/enseigner/logiciel-paleobiomes2>) permet notamment de réaliser des analyses et des diagrammes polliniques à partir de nombreux sites européens.

> En milieu marin, les foraminifères sont utilisés pour connaître le climat. Le **document 4** montre ce qu'est un foraminifère et à quoi peut ressembler son test constitué de calcite. On rappelle que ce test se forme à partir des éléments présents dans l'eau (cf doc. 4 de l'unité précédente), notamment le dioxygène présent dans l'eau qui va s'associer au CO₂ pour former l'ion carbonate. Ce rappel est justifié, car il va permettre d'expliquer le fractionnement isotopique des isotopes 18/16 de l'oxygène : il est nécessaire que l'élève sache d'où vient cet isotope. Un autre élément important à signaler sur les foraminifères est qu'il en existe deux grands groupes : les foraminifères planctoniques qui viennent en zone photique et sont sensibles aux variations saisonnières de la température de l'eau, et les foraminifères benthiques, en général plus massifs, qui enregistrent les variations de la température de l'eau à plus grande échelle de temps. Il est donc préférable d'utiliser ces derniers pour connaître l'évolution du climat.

> Le **document 5** explique comment on utilise le fractionnement isotopique de l'oxygène pour connaître la température au moment de la formation du test du foraminifère. Le graphique de gauche montre l'évolution du rapport isotopique de l'oxygène δ¹⁸O au cours de l'Holocène dans les carbonates de l'Atlantique Nord. Le diagramme de droite corrèle la température et la valeur du δ¹⁸O de l'eau : plus le rapport isotopique dans les carbonates est élevé plus la température est basse. Le δ¹⁸O est donc un thermomètre isotopique qui permet de lire l'évolution de la température enregistrée ici pendant l'Holocène. Ainsi, on peut observer qu'à plusieurs reprises l'eau du fond de l'Atlantique nord a été plus chaude ou plus froide qu'actuellement, la température oscillant entre 5 et 10 °C, alors que la valeur actuelle est de 7°. L'activité numérique proposée avec le fichier Excel téléchargeable permet d'une part de faire travailler les élèves sur un tableur et, d'autre part, de reconstituer le climat sur un autre prélèvement.

> Une autre utilisation possible des foraminifères concerne les associations faunistiques, qui dépendent de la température de l'eau. Des extraits de carottages océaniques sont parfois disponibles dans les académies grâce aux retours des enseignants embarqués sur les bateaux océanographiques. Ici, les deux extraits de sédiments présentés dans le **document 6** montrent des associations présentes dans des sédiments âgés de 10 000 ans prélevés à 67°N et 37°N. L'analyse des foraminifères présents montre qu'à l'époque, on retrouvait à plus haute latitude des foraminifères actuellement présents en plus basse latitude. La température des eaux du fond à la latitude du sud de l'Espagne était proche de celle que l'on trouve actuellement au sud de la Mauritanie.

Unité 3

> Cette unité va, au travers de l'étude du climat du Pléistocène, permettre de rechercher les indices géologiques ou glaciaires propres aux climats froids. On peut compléter l'étude de ces indices avec la photo d'un des derniers glaciers alpins en ouverture de chapitre (p. 293).

> Le **document 1** montre les traces caractéristiques du passage d'un glacier.

La photo de gauche montre des stries glaciaires qui sont imprimées sur la roche par le passage d'une langue glaciaire qui charriaît des blocs rocheux et rabotait les roches encaissantes. L'aspect moutonné de la surface vient de l'abrasion opérée par la glace sur le substrat qu'elle recouvre. Cette abrasion produit une fine poussière (farine glaciaire) qui formera les loess (exercice 5, doc. 1, p. 315).

La photo de droite montre une coupe au travers une moraine. Elle permet de constater que cette formation sédimentaire détritique n'a pas subi de granoclassement. Elle est composée d'éléments hétérogènes et de taille variable emballés dans de la farine glaciaire. La photographie de la p. 293 permet d'observer les moraines frontales et latérales sur les bords de la langue glaciaire de la Mer de glace. Le schéma **document 2** permet de replacer dans un paysage glaciaire les différentes formations

qu'il est nécessaire de savoir interpréter puisqu'elles sont autant d'indices d'une glaciation dans le passé.

> Dans le **document 2**, l'activité proposée ici, associée à une activité numérique (Google Earth et kmz téléchargeable), permet aux élèves qui n'habitent pas dans un massif montagneux d'appréhender les dimensions des glaciers qui serpentaient au pléistocène dans les vallées Vosgiennes aujourd'hui verdoyantes. L'activité permet de déterminer le volume de glace dans la vallée de la Cleulie. La photo de gauche montre l'aspect en auge des vallées glaciaires, bien différentes des vallées creusées par des rivières. On y distingue aussi une moraine frontale et la moraine de fond qui tapisse toujours le fond de vallée.

> Le **document 3** introduit le vocabulaire qui sera exploité dans le chapitre suivant lorsqu'il s'agira de rechercher la trace de glaciations passées. Ce vocabulaire est également utile en terminale dans l'enseignement scientifique (glaciers alpins p. 45 du manuel Belin, fluctuation du volume des glaces p. 46, bloc erratique au cœur de Lyon p. 59).

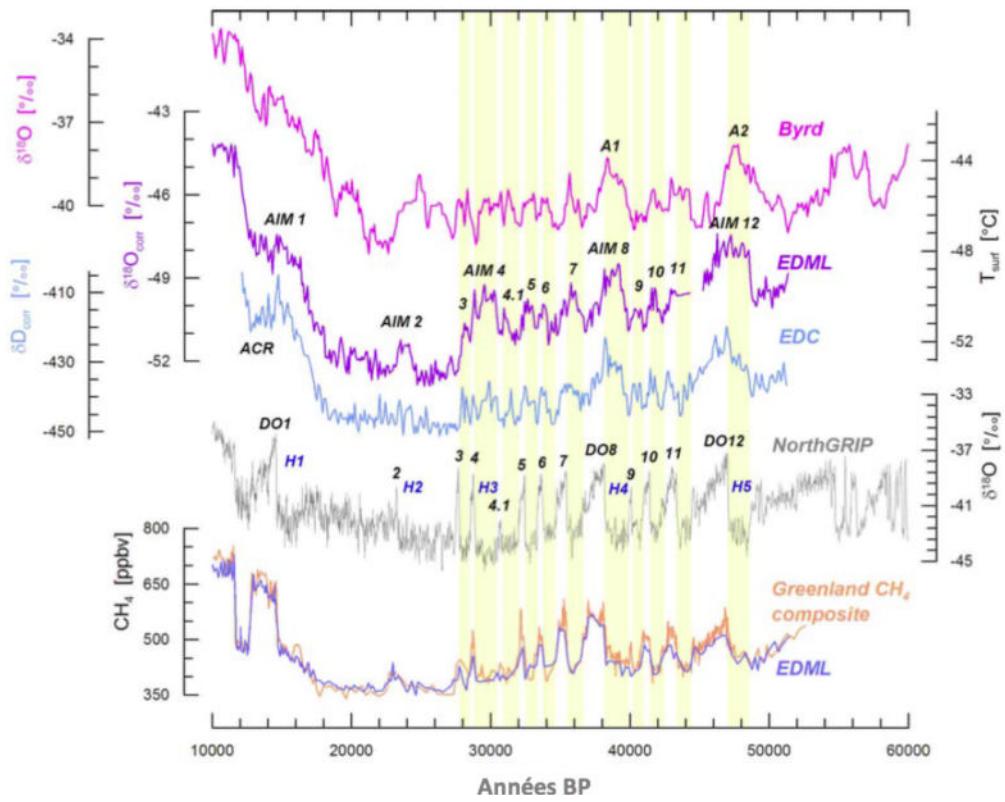
> Dans l'unité précédente, les élèves ont étudié comment, grâce aux rapports isotopiques de l'oxygène dans les carbonates, il est possible de retrouver les paléotempératures de formation des carbonates. Dans le **document 4**, ils exploitent les données isotopiques de l'oxygène et du deutérium (isotope lourd de l'hydrogène), qui présentent une ségrégation isotopique identique lors de l'évaporation de l'eau de mer et de la précipitation des pluies et de la neige. La correspondance entre le rapport isotopique et la température a été évaluée à partir de glace actuelle déposée à différentes températures, cela pour ces deux thermomètres isotopiques : δD et $\delta^{18}O$.

> Le **document 5** montre une carotte de glace et une fine coupe de glace au microscope. On distingue qu'après l'eau, on trouve aussi dans ces carottes des bulles de gaz, piégeant l'air, donc l'atmosphère au-dessus des pôles à l'époque où la neige s'est déposée. L'activité numérique avec le logiciel Paléobiome permet de mettre en évidence des variations des taux de gaz à effet de serre corrélables avec les fluctuations climatiques.

> Le **document 6** situe l'emplacement des carottages effectués en Antarctique puis donne les valeurs de concentration atmosphériques en CO_2 , $\delta^{18}O$ et δD mesurées à différents niveaux (et donc différents âges) dans les carottes glaciaires. Ces graphiques montrent qu'il y a une bonne corrélation entre la variation du $\delta^{18}O$ et du δD dans les glaces arctiques. Il est possible d'y observer de fortes diminutions régulièrement espacées de 100 000 d'années. En corrélant ces diminutions du rapport isotopique avec les paléo-thermomètres, on en déduit qu'elles correspondent à des périodes de refroidissement. Ce document met ainsi en évidence une succession d'alternances glaciaire-interglaciaire.

> Remarque

Bien que ce soit moins net que dans les glaces antarctiques, on retrouve dans les glaces du Groenland des alternances de périodes plus chaudes et plus froides dont certaines sont parfaitement corrélées avec celles de l'Antarctique : voir figure ci-dessous, d'après J. Jouzel, *Clim. Past Discuss.*, 9, 3711–3767, 2013. Cela montre que les phases de refroidissement et de réchauffement se déroulaient à l'échelle globale.



North GRIP : forage au Groenland ; Byrd, EDML, EDC : forages antarctiques

Unité 4

> Dans cette unité, on cherche à mettre en relation les alternances glaciaire-interglaciaire observées au Pléistocène avec les variations de paramètres orbitaux et les paramètres amplificateurs que sont la concentration atmosphérique en CO₂ et l’albédo. Les notions d’albédo, d’effet de serre et d’insolation sont connues grâce à l’enseignement scientifique (classe de 1^{re}) et sont ici remobilisées.

> Le **document 1** explique que l’orbite terrestre n’est pas toujours elliptique (excentricité), que l’angle d’inclinaison entre l’axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l’écliptique oscille de 3° (obliquité) et que la Terre est soumise à un effet toupie qui incline de manière différentielle les pôles (précession des équinoxes). La définition de ces trois paramètres orbitaux est précisée ainsi que leurs effets sur l’insolation.

► Remarque.

D’autres paramètres orbitaux agissent sur le climat comme, par exemple l’influence gravitationnelle de la planète Mars, qui a des conséquences sur l’intensité des moussons à une échelle longue (9 Ma).

> Les simulations proposées dans le **document 2** ont été réalisées avec le logiciel Build Your Own Earth (BYOE). D’autres activités sont proposées en numérique afin de compléter et d’enrichir les informations proposées dans ce document. On remarque ici l’influence en juillet de la forme de l’orbite et de l’inclinaison sur les températures au niveau de l’équateur : il fait plus chaud si l’orbite est circulaire ou si l’axe de rotation de la Terre est plus incliné. Ce document ainsi que l’activité numérique permettent d’établir une corrélation entre la température au niveau du sol et l’état des paramètres orbitaux. Le logiciel de simulation BYOE est par ailleurs exploité en enseignement scientifique (chapitre 3 du manuel Belin).

> Le **document 3**, réalisé à partir du logiciel Paléobiome 2, montre :

- que les variations de l'excentricité de l'orbite terrestre présentent deux cyclicités : l'une de fréquence 413 000 ans et l'autre fréquence 100 000 ans ;
- que l'obliquité présente une cyclicité de 41 000 ans ;
- que la précession un cycle notable tous les 26 000 ans.

L'activité numérique associée permet de comparer ces cycles aux températures enregistrés dans les sédiments océaniques.

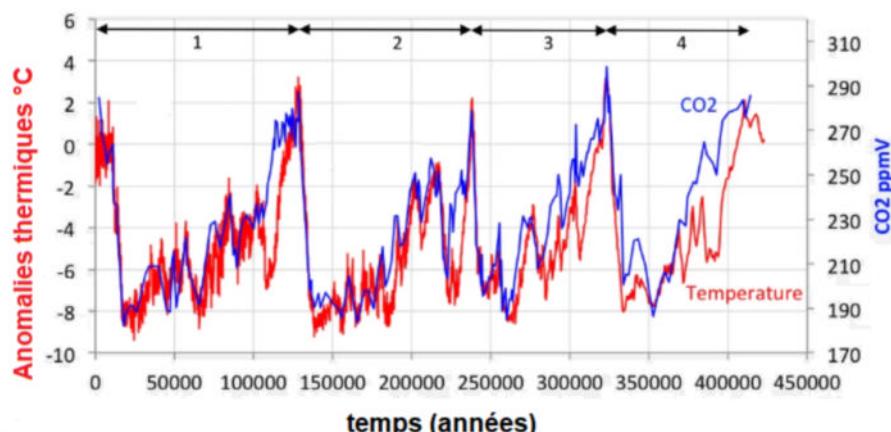
> Un rappel sur les notions de rétroaction (évoquées en enseignement scientifique) est proposé.

> Les données des **documents 4 et 5** associés à celles disponibles dans l'activité numérique proposées remobilisent les connaissances des élèves sur l'albedo. On compare dans le document 4 la Terre entre vue centré sur le pôle Nord entre l'actuel et le dernier maxima glaciaire du Pléistocène. La surface des glaces a beaucoup diminué pendant l'Holocène, si bien que les surfaces continentales au niveau cercle polaire sont verdoyantes et la mer bien bleue. L'albédo de ces surfaces est bas (0,15 à 0,2) contrairement à celui de l'inlandsis (0,6 à 0,9). Par leur fort albédo, les glaces favorisaient un refroidissement. Par leur faible albédo, les surfaces déneigées favorisent le réchauffement. Dans les deux cas, on parle de rétroaction positive.

> Le **document 6** est un rappel de la solubilité du CO₂ dans l'eau à différentes températures. Il permet de faire construire aux élèves une courbe de l'évolution de la solubilité du CO₂ dans l'eau en fonction de la température. On constate que la solubilité augmente quand la température diminue et inversement. Ceci a pour conséquences que le CO₂ présent dans les océans pendant les périodes froides va être abondamment dégazé vers l'atmosphère en période chaude. Ce phénomène de rétroaction positive amplifie l'effet de serre pendant les périodes chaudes.

> Ce document 6 est important pour faire comprendre aux élèves qu'il existe une latence naturelle entre le réchauffement et la libération du CO₂ par dégazage de l'eau. Naturellement, ce n'est pas le dégazage de CO₂ qui est l'élément déclencheur de la sortie d'un climat glaciaire. Ce sont par exemple les paramètres orbitaux qui, en modifiant l'insolation, réchauffent l'eau qui progressivement va dégazer et accroître le forçage des températures par le CO₂. Cet effet est bien visible sur les courbes proposées dans le document 6 de l'unité 3 pour le troisième interglaciaire (vers 300ka) où l'on distingue clairement que les thermomètres isotopiques dans les glaces de Vostock ou du Dôme C enregistrent le début du réchauffement avant que la concentration de CO₂ atmosphérique ne s'élève. De même, ce n'est pas la diminution de la concentration de CO₂ atmosphérique qui est le facteur déclencheur du refroidissement du climat. En revanche, la diminution de la température des eaux, consécutive à la baisse des températures globales, provoque la dissolution du CO₂ dans la mer et donc diminue sa concentration atmosphérique, d'où une nouvelle rétroaction positive qui se voit très bien dans le document 6 p. 299 lors du dernier interglaciaire.

Ci-dessous, un **document complémentaire** utilisable pour illustrer ce point :

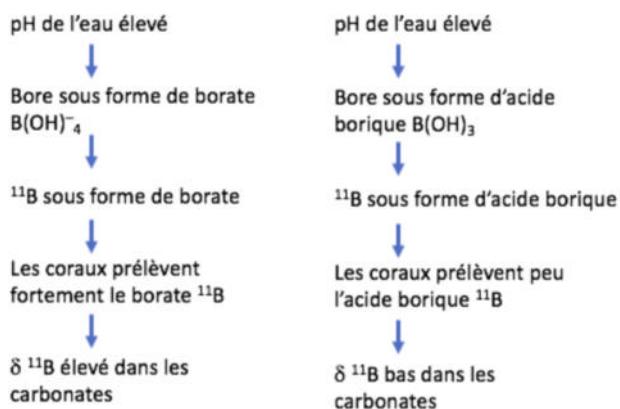


Données NOAA (www.ncdc.noaa.gov/paleo-search/).

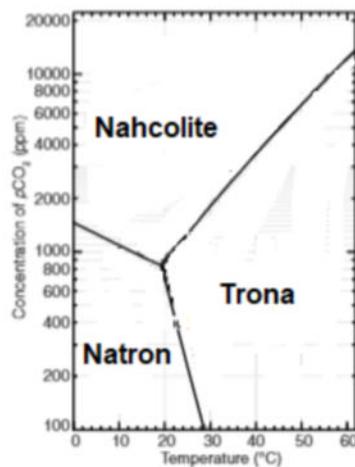
Unité 5

- > Dans cette unité, on va récolter des indices permettant de décrire les variations climatiques à l'échelle du Cénozoïque, avec un climat globalement chaud à l'Éocène puis un refroidissement à partir de l'Oligocène.
- > Le **document 1** montre les affleurements de Zumaia au Pays-Basque espagnol, célèbres par les deux clous d'or qu'ils contiennent (voir chapitre 5 et activité numérique « clous d'or ») et également car ils ont largement été filmés dans la série *Game of Thrones*. L'affleurement montre que, pendant le Thanétien (début du Cénozoïque), il y a une alternance régulière de dépôts calcaires et de dépôts marneux.
- > Les explications du **document 2** couplées aux schémas du **document 3** expliquent l'origine climatique de ces alternances. Lors des périodes humides, l'altération des roches (ici, celles des Pyrénées en surrection) est plus importante ; elle produit des argiles et des nutriments qui favorisent la prolifération de plancton calcaire. Ainsi, pendant ces phases hydrolysantes, des bancs marneux se déposent. Lors des périodes plus arides, l'altération est moins forte, les eaux sont moins riches en argile et en nutriments, d'autres communautés planctoniques se développent et sont responsables de la mise en place de banc calcaires.
- > Ces alternances pétrologiques correspondent à des alternances climatiques, ce qui souligne l'existence de climats contrastés mais régulier au début du Cénozoïque. Les datations montrent une répétition régulière des cycles avec des périodes à 100 000 et à 20 000 ans. Les alternances de marnes et de calcaires se poursuivirent dans les niveaux plus récents et sont aussi visibles au crétacé (voir chapitre 13).
- > Le **document 4** explique comment il est possible de corrélérer le nombre de stomates sur la face inférieure d'une plante et la concentration de CO₂ atmosphérique : plus le CO₂ est abondant, moins la densité de stomates est élevée. Des études expérimentales effectuées sur les feuilles de *Ginkgo biloba* actuelles permettent de mettre relation l'index stomatique et la pression partielle en CO₂ dans l'atmosphère. On peut ainsi corrélérer des mesures d'indices stomatiques à des pCO₂ sur des périodes plus anciennes, car on retrouve les feuilles fossilisées de *Ginkgo* pendant tout le Cénozoïque. Cette étude montre que, pendant le Paléocène, l'indice stomatique a fluctué, mais qu'au moment de la limite Paléocène-Éocène, une diminution importante fut observée. La pCO₂ était donc très forte à cette période, bien supérieure à l'actuelle et aux prévisions d'un climat futur « très anthropisé » (scénario RCP6.0 du Giec, voir chapitre 3 du manuel Belin d'enseignement scientifique terminale).
- > Le **document 5** montre que la concentration atmosphérique en CO₂ a beaucoup fluctué au Cénozoïque et que les concentrations au Pliocène sont relativement basses par rapport à celles de l'Éocène, où il faisait donc beaucoup plus chaud. Cette synthèse a été obtenue à partir de la compilation de nombreux travaux scientifiques portant sur les domaines d'étude très variés qui ont permis en reconstituant la concentration atmosphérique en CO₂ et d'estimer les paléotempératures au Cénozoïque.

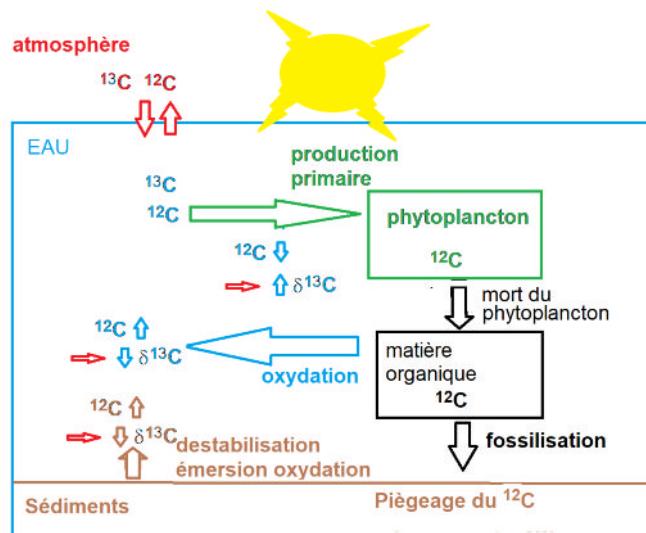
* Le fractionnement isotopique du bore enregistré dans les carbonates permet de connaître le pH de l'eau, donc indirectement le taux de CO₂.



* Les nahcolites : ce sont des carbonates (NaHCO₃) qui précipitent dans les dépressions évaporitiques des continents. Ils'agit d'indicateurs de climats chauds et de concentrations atmosphériques en CO₂ très élevées (> 680 ppmv à 20 °C). Dans d'autres conditions d'autres minéraux se forment, comme on le voit sur le diagramme de phase ci-dessous.



* **Le phytoplancton**: présent dans la zone photique des lacs et des océans, il accumule par photosynthèse le CO₂. Il le prélève dans l'eau puis l'assimile à sa matière organique et à son test. Or le carbone est présent sous deux formes isotopiques : ¹³C et ¹²C. Le δ¹³C s'établit de la même manière que le δ¹⁸O et avec le même standard de référence PDB1 (le carbonate du rostre de bélémnite Belemnites de la Pee Dee Formation de Caroline aux États-Unis). La photosynthèse sélectionne préférentiellement le ¹²C. Ainsi, tous les facteurs qui entraînent une variation de la production primaire ou/et l'oxydation de la matière organique piégée dans les sédiments sont enregistrés dans le δ¹³C. C'est un marqueur de plus en plus utilisé car il est peu sensible aux étapes du passage d'un sédiment à une roche (diagenèse) et il permet des corrélations entre les données des eaux douces et des eaux marines.



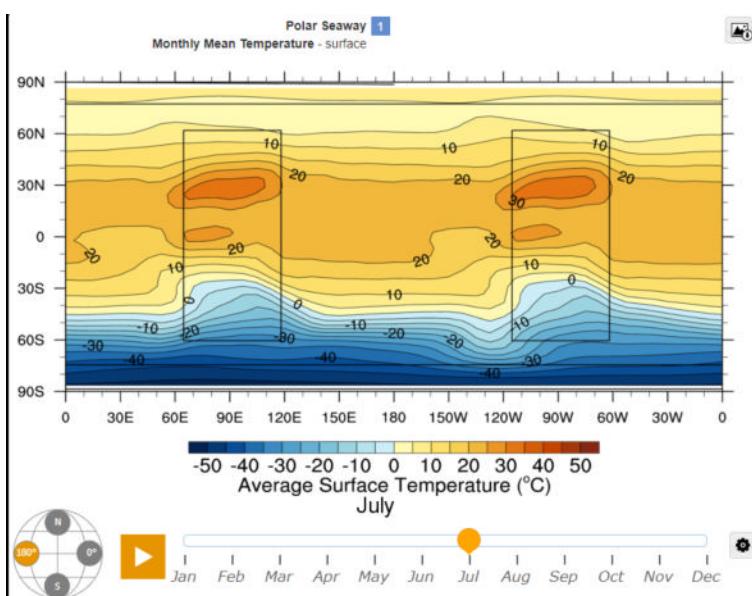
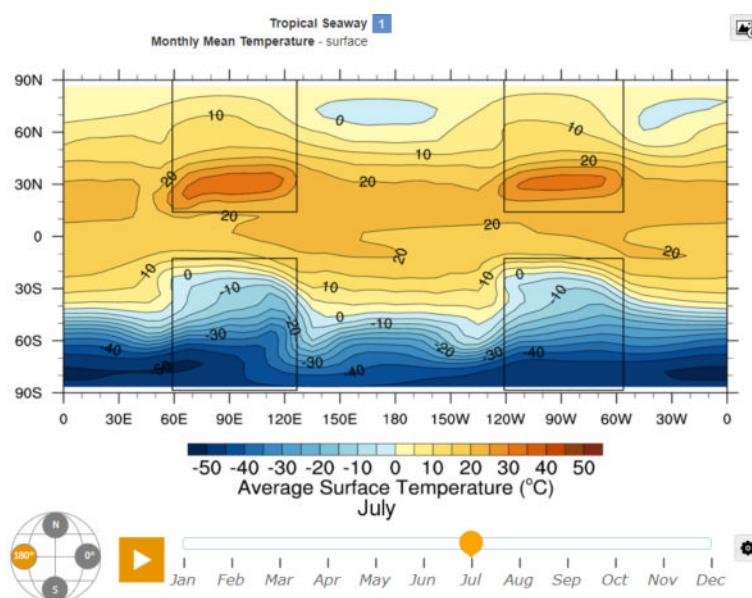
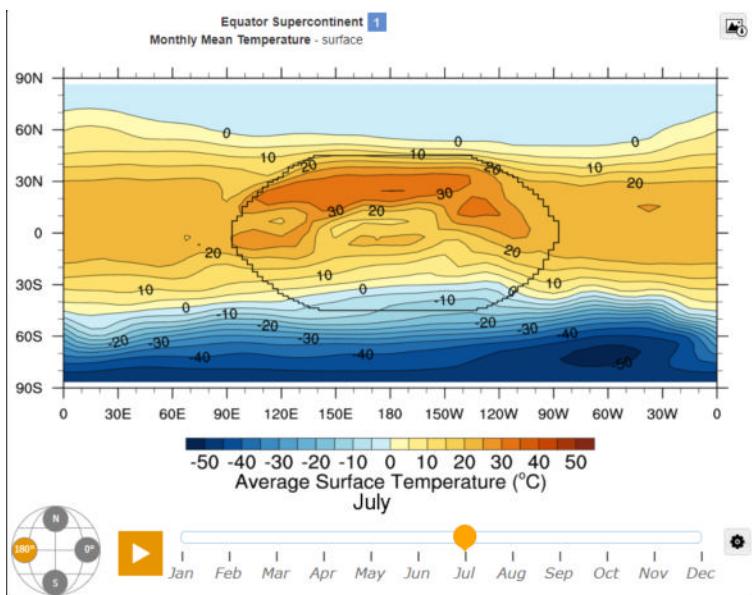
* **Les paléosols** : ils enregistrent l'intensité de la respiration (dégradation de la matière organique en conditions aérobie) des micro-organismes dans les sols, qui est sensible à la température.

Unité 6

Dans cette dernière unité, le rôle important de la géodynamique sur le climat est mis en évidence. Des notions des programmes SVT 2^e (altération des minéraux), de 1^e (géodynamique, magmatisme, orogenèse ...) et de T^{le} (sutures orogéniques, datation) sont remobilisées.

> Le document 1 explique comment la séparation entre la Tasmanie et l'Antarctique à la fin de l'Éocène a modifié le climat mondial. En modifiant le brassage des eaux, donc les transferts de chaleur au travers du globe, l'ouverture a favorisé la mise en place d'un courant froid circumpolaire autour de l'Antarctique. Ce courant a limité l'arrivée d'eaux en provenance des basses latitudes, qui réchauffaient l'Antarctique. Ce refroidissement a permis la mise en place progressive de l'inlandsis.

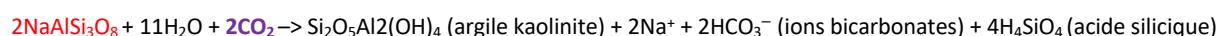
> L'activité numérique associée permet de montrer comment les courants marins froids ou chauds sont modifiés par l'emplacement des continents (voir captures d'écran ci-dessous).



> La carte de la chaîne alpine **document 2** rappelle l'étendue de la suture de cet ceinture orogénique mise en place à la fin du Crétacé et pendant le Cénozoïque. Il est l'occasion de rappeler que lors d'une orogenèse, les roches profondes sont exhumées (cf chapitre 7). Les affleurements cénozoïques exploités dans les **documents 3 et 4** sont situés à l'extrême sud-ouest de la chaîne alpine.

> Au Cénozoïque (Néogène), un important volcanisme s'est mis en place dans l'Atlas (**document 3**) et les basaltes ont rapidement été altérés par le climat chaud et hydrolysant. La photographie donne l'occasion de remarquer que l'altération des basaltes se fait, comme pour les granites, sous forme de boules, ce qui montre le rôle du ruissellement le long des zones de moindre résistance dans les coulées magmatiques. Grâce aux réactions présentées, l'élève découvre que l'altération des pyroxènes et des feldspaths consomme de grandes quantités de CO₂ (deux molécules de CO₂ par silicate altéré). Sur l'affleurement, on observe la production d'argiles et d'oxydes de fer, qui sont des indices d'un environnement altérant que l'on retrouvera dans certaines formations Paléozoïques (cf. chapitre 13).

> Avec ce document, on pourra montrer que l'altération de roches acides comme les granites consomme également du CO₂ atmosphérique, par exemple en présentant la **réaction d'altération d'un feldspath sodique :**



> Cette altération est suivie des processus de transport dans les oueds (**document 4**) et de dépôts au niveau de grandes plaines alluviales en aval des ceintures orogéniques. Cette image actuelle des plaines alluviales en climat chaud pourra être ré-exploitée dans le chapitre suivant pour reconstituer les paléoenvironnements et paléoclimats des périodes plus anciennes. La coupe du chenal dans la plaine surélevée peut permettre un travail de datation relative. Elle est l'occasion d'évoquer la vitesse des eaux susceptibles de transporter les gros éléments dans cet environnement aride et de conclure à l'existence de régions à climats très contrastés.

> Les rapports isotopiques du strontium ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr sont des indicateurs fiables de l'origine des produits altérés et donc des processus géodynamiques qui ont lieu pendant la sédimentation des carbonates (**document 5**). Ces derniers intègrent le strontium à la place du calcium dans leur réseau cristallin. Lorsque l'altération concerne des roches issues du manteau (par exemple lors de la formation de roches de la lithosphère océanique ou au niveau de points chauds) le rapport isotopique $\delta^{87}\text{Sr}$ est bas. Lorsque l'altération concerne des roches de la croûte continentale, le rapport $\delta^{87}\text{Sr}$ est élevé. Comme on le voit sur le graphique le rapport isotopique est bas pendant le Crétacé puis, dès l'exhumation des roches continentales profondes de la chaîne alpine, au Paléogène, on voit le rapport isotopique $\delta^{87}\text{Sr}$ s'élever fortement.

> Ainsi, un climat hydrolysant (c'est-à-dire donc non aride) au niveau d'une ceinture orogénique en formation se traduit par la formation de roches carbonatées à rapport isotopique $\delta^{87}\text{Sr}$ élevé. Il sera associé au piégeage abondant du CO₂ atmosphérique qui conduira, plus tard, à un refroidissement du climat. Des roches carbonatées à rapport isotopique $\delta^{87}\text{Sr}$ bas seront le signe d'une période de volcanisme intense produisant du CO₂ dans un premier temps. Ce dernier est susceptible d'être ensuite impliqué dans l'alternation des minéraux des roches magmatiques. En témoigne les traces de calcite retrouvées au niveau des ophiolites (cf chapitre 7) : cette dernière est issue de la précipitation du carbonate et du Ca²⁺ libérée lors de l'altération des pyroxènes.

Quelques ressources

> Les climats du globe

eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/climat/climats-de-la-terre/climats-du-globe

> Données sur l'Anthropocène

quaternary.stratigraphy.org/working-groups/anthropocene/

> Stratotype de l'Holocène

quaternary.stratigraphy.org/wp-content/uploads/2018/07/Walker-et-al.-2018_Episodes_online.pdf

Corrigé des parcours « tâche complexe »

Unité 1

> La forme attendue est un texte illustré. On attend que le texte présente une courte introduction, une courte conclusion répondant au problème et que les idées développées soient séparées et logiquement organisées. On attend aussi qu'il soit fait référence aux documents. Le(s) schéma(s) illustrant la réponse peut(vent) être le support de l'information et, dans ce cas, remplacer une partie de texte dans la réponse à la question. Il est alors nécessaire dans ce cas que les légendes soient bien renseignées.

> Pour les biomes continentaux, où le facteur limitant sera la température, on attend une réponse qui traite :

– de l'évolution des biomes alpins, d'après les deux premières cartes 1876-1900 et 1976-2000 (doc. 1) et le doc 2. Il faut observer l'évolution des surfaces colorées (et donc de la surface des biomes) et les replacer dans leur contexte environnemental (altitude/température/type de précipitation/disponibilité de l'eau pour les plantes).

– comprenant un schéma pouvant par exemple représenter sur une même montagne un pan avec les limites d'altitudes occupées par les biomes avant 1976 et l'autre pan avec celles occupées après 1976.

Ce type de schéma peut ensuite être refait pour répondre à la seconde partie de la question où deux scénarios climatiques sont comparés.

> Pour traiter la partie concernant les biomes marins, il faut mettre en relation la concentration atmosphérique de CO₂ et l'acidification des océans ; la température n'est pas ici prise en compte.

Il est possible de représenter sous forme d'un schéma en coupe d'un littoral (peu profond) l'évolution de la couverture du fond par les moules, les algues et les coraux dans deux conditions extrêmes (un pH inférieur à 8 et un pH supérieur à 8).

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	<p>Démarche maladroite et partielle à la question posée :</p> <ul style="list-style-type: none"> _ Ne compare pas les données passées ou liées aux conditions environnementales passées et les données futures liées aux extrapolations des modélisations _ Ne met pas en relation l'accroissement de la température et l'acidification des eaux avec les rejets anthropiques des GES du doc. 5. 	<p>Démarche pertinente</p> <ul style="list-style-type: none"> _ Presque tous les documents sont exploités _ La relation entre les effets anthropiques (doc. 5) est citée mais n'est pas reliée avec précisions aux effets décrits dans les Alpes et en milieu littoral 	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	<p>Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents.</p> <p>Par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> _ ne traite pas des biomes alpins et littoraux. _ ou ne traite pas des conditions antérieures et postérieures des modifications climatiques anthropiques _ ou n'explique pas pourquoi l'homme (doc. 5) est responsable de ces phénomènes 		Complet ou suffisant
Communication	Non conforme	<ul style="list-style-type: none"> _ Le texte ne précise pas l'origine des informations cités dans les documents Ou _ Il n'y a pas d'illustrations 	<ul style="list-style-type: none"> _ Le texte et les schémas n'incluent qu'une partie des éléments des documents ou _ Le texte et les schémas apportent les mêmes données sans se compléter 	Le texte complète les éléments apportés par les schémas qui sont bien légendés.

Unité 2

> La réponse doit être construite sous la forme d'un tableau. Des titres des colonnes sont attendus. Le contenu attendu est précisé dans la question.

> Pour réaliser le tableau, il faut partir du graphique du doc. 5 qui va permettre :

- de découper le temps en périodes montrant une évolution climatique ;
- de repérer sur le diagramme pollinique du doc. 3 les grandes variations à l'Holocène ;
- enfin d'interpréter à l'aide des indices des doc 2,3, 5 et 6 la température de l'eau ou de l'air.

> Éléments de correction

Période (années)	Indices climatiques	Méthodes utilisées
De – 2800 à nos jours	La température moyenne des eaux du fond diminue jusqu'à environ 7 °C Dans les Vosges, on note un refroidissement car les espèces dominantes supportent le froid (bouleau, épicéa) et les pollens de poacées sont nombreux	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (doc. 5) Associations pollinique (doc. 3) et extrait de pollen actuel (doc.2)
De – 5000 à – 2800	La température des eaux du fond s'élève progressivement jusqu' à atteindre 10 °C Dans les Vosges, la température est plus chaude car les espèces dominantes préfèrent les climats tempérés chauds (chênes, hêtre, noisetier)	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (doc. 5) Associations pollinique (doc .3)
De – 8000 à – 5000	La température des eaux est globalement stable 7 °C Dans les Vosges, la température est plus chaude car les espèces dominantes préfèrent les climats tempérés chauds (chênes, hêtre, noisetier).	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (doc. 5) Associations pollinique (doc. 3)
De – 11700 à – 8000	Les eaux du fond sont en moyenne un peu plus fraîches que maintenant sauf à deux épisodes où on observe un fort réchauffement de l'eau (environ 8-10 °C) Dans les Vosges, la température est plus fraîche que maintenant car on observe des pollens d'espèces qui supportent le froid (bouleau, épicéa)	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (doc. 5) Associations faunistiques (doc. 6)

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée : _ N'a pas corrélé la présence d'un taxon avec le climat ou le rapport isotopique avec le paléothermomètre _ Les données recueillies sont partielles ou non agencées de manière chronologiques	Démarche pertinente Presque tous les documents sont exploités, l'ordre est cohérent, les corrélations aussi	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents. N'a pas exploité les rapports isotopiques ou les associations faunistiques ou les pollens	Complet ou suffisant	
Communication	Non conforme	Il y a un tableau	Le tableau est correctement renseigné, il y a des titres aux colonnes / lignes	Le tableau est complet, renseigné avec un titre

Unité 3

> La forme demandée est un diaporama. On attend une introduction, une conclusion et des diapositives avec les images où les schémas dominent et où le texte est réduit à quelques phrases simples et pertinentes.

> Pour montrer que les indices de terrain permettent de reconstituer un climat, il est judicieux de mettre en relation ce que l'on trouve là où il existe encore des glaciers et là où ils ont disparu. Des images avant /après peuvent illustrer cette partie du diaporama, ou bien le « avant » peut être pris dans des exemples de montagnes encore englacées. On peut s'aider du doc.3 pour rechercher ces indices dans un contexte post-glaciation. Google Earth et la fonction « streetview » permettent d'obtenir des images *in situ*. La carte géologique de Gérardmer, disponible sur le site Infoterre ou sur Géoportail, situe les formations glaciaires. Il est donc aisé de les localiser ensuite dans le paysage.

> Pour reconstituer les conditions ayant permis la mise en place de glaciers dans les Vosges, il faut un climat froid. Les rapports isotopiques des glaces permettent de voir une alternance entre :

– des périodes où les valeurs des $\delta^{18}\text{O}$ et des δD sont élevées et qui sont corrélées avec des taux élevés de CO_2 , montrant des périodes de réchauffement.

– des périodes où les rapports isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et des δD sont bas, ce qui permet de situer la dernière glaciation dans les Vosges entre – 110 000 ans – 11 700 ans.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents Traite <i>soit</i> des indices <i>soit</i> des rapports isotopiques	Complet ou suffisant Traites des indices et des rapports isotopiques	
Communication	Non conforme	Sous forme de diapositives	Les diapositives ne sont pas chargées en textes et elles sont illustrées	Le diaporama correspond aux attentes

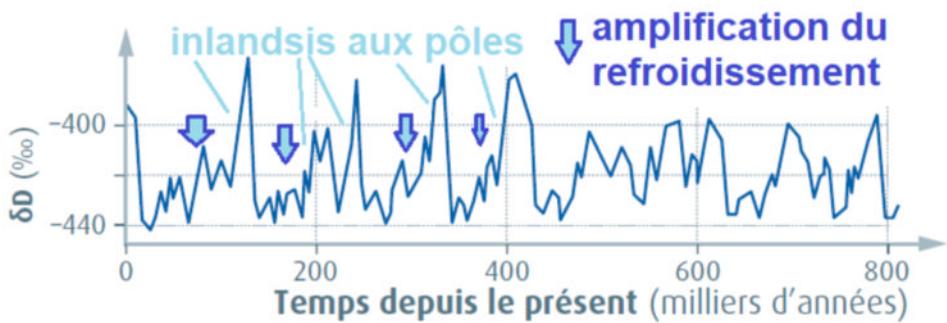
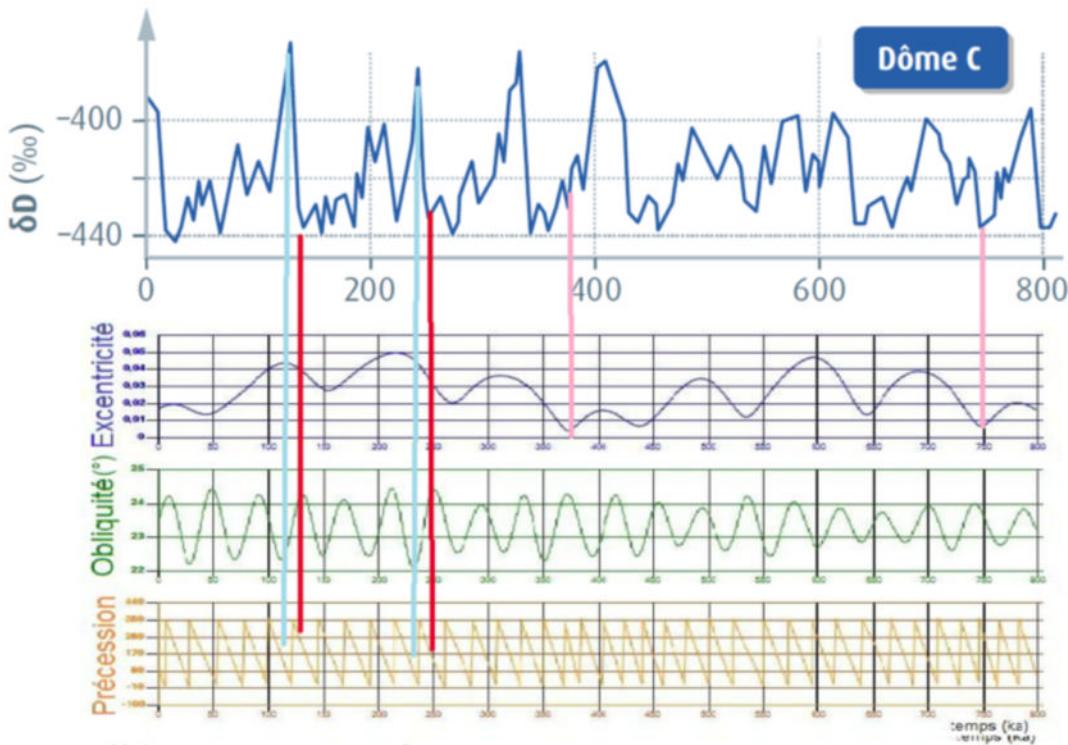
Unité 4

> Dans un premier temps, il faut comparer les fluctuations de la température en Antarctique ($\delta^{18}\text{O}$, δD) avec la fréquence des fluctuations des paramètres orbitaux. Il est donc nécessaire de définir la périodicité de chaque paramètre orbital (doc. 3 p. 301) et de superposer ces données sur le doc. 6 p. 299.

> Pour repérer les effets des rétroactions sur le climat, il faut replacer sur le graphique des températures les périodes où il a commencé à se former un important inlandsis sur les pôles (périodes de refroidissement), ce qui a amplifié progressivement le refroidissement.

> Éléments de correction

C'est le couplage entre les trois paramètres orbitaux qui est important pour comprendre les évolutions climatiques enregistrées au Pôle Sud. Les périodes où débutent le réchauffement (traits rouges) sont marqués par une obliquité importante, une excentricité qui s'amplifie et une précession élevée. À l'inverse, les périodes de bascule vers une période de refroidissement (traits bleus) sont marqués par une forte excentricité une faible obliquité et une précession moyenne. On observe également que pendant les périodes où l'excentricité devient la plus faible (traits roses) on est en période glaciaire. Ces trois paramètres évoluent cycliquement avec des fréquences propres qui peuvent, si elles sont en phase, renforcer leurs effets sur le climat, ou l'atténuer si elles sont déphasées.



> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Une seule notion a été traitée (paramètres orbitaux <i>ou</i> albédo)	Les informations issues de l'albédo et des paramètres orbitaux ont été mises en relation	<ul style="list-style-type: none"> _ Les informations des documents des unités 3 et 4 ont été mises en relation _ L'albédo et les paramètres orbitaux ont été traités en exploitant les connaissances antérieures
Contenu	Absent	Incomplet	Complet ou suffisant	
Communication	Non conforme	Pas de schéma	Des schémas illustrent le texte mais il y a redondance d'information entre les deux	Les schémas complètent parfaitement le texte sans redondance

Unité 5

- > La forme de la réponse est libre, elle doit donc être jugée pertinente pour répondre aux questions.
- > Concernant la première partie du Cénozoïque, un cycle de précession recoupe un banc marneux et un banc calcaire. Ceci permet de dire que ce paramètre orbital induit le passage régulier d'un climat altérant à un climat non altérant. On voit que l'épaisseur des couches n'est pas toujours identique, d'un couple calcaire/marne à l'autre. Cela suggère que les autres paramètres orbitaux peuvent entraîner des fluctuations de l'intensité de l'effet de la précession.
- > Pour la seconde partie du travail, une frise peut permettre de localiser à la fois le climas et les indices (indice stomatique, bore, nahcolites, plancton et paléosol) pour la totalité du Cénozoïque. Bien que le sujet n'y fasse pas explicitement référence, il serait très judicieux d'inclure dans les indices climatiques utilisés les données des unités 1 et 2 (pollens, foraminifères, isotopes, trace de glaciations ...), ce qui permettra de valoriser la capacité de synthèse.

> Support pour l'autoévaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Pas de mise en relation entre les indices et le climat	Mise en relation pertinente des données et de leur signification climatique	Mise en relation des informations des documents en exploitant les connaissances antérieures ou celles d'enseignement scientifique
Contenu	Absent	Incomplet	Tous les indices de l'unité sont exploités	Les indices de cette unité et des précédentes sont exploités
Communication	Non conforme	Conforme		Conforme et originale

Unité 6

- > Le format attendu est un tableau à double entrée. On attend des titres aux deux entrées.
- > Les documents utilisés doivent être notés, l'apport des connaissances sur les mécanismes géologiques étudiés en seconde et en première sont attendus dans l'explication des mécanismes géologiques retenus.

> Éléments de correction

Processus Effet	Rapidité	Contribution à un refroidissement	Contribution à un réchauffement
Disposition relative des plaques et des masses océaniques (doc. 1)	Mécanismes lents à se mettre en place	Si le brassage océanique favorable à une circulation circumpolaire autour d'un continent polaire <i>ou</i> Si absence de circulation équatoriale	Si brassage de toute la masse océanique <i>ou</i> Si aucun continent n'est au pôle et peut ainsi porter un inlandsis
Volcanisme (doc. 3)	Phénomène brutal et rarement long (sauf points chauds)	Par les poussières	<ul style="list-style-type: none"> – Par l'accroissement de la concentration atmosphérique en CO₂ – Par la diminution de l'albédo
Altération des laves (doc. 3 et 5)	Phénomène qui débute dès l'émission de la lave et qui peut durer très longtemps si la roche affleure	Par le piégeage du CO ₂	

Processus	Effet	Rapidité	Contribution à un refroidissement	Contribution à un réchauffement
Orogénèse (doc. 2, 4 et 5)		Phénomène lent qui dure longtemps	<ul style="list-style-type: none"> _ Mise en place de reliefs (effet de l'altitude et piégeage à nuages, ruissellement, transport, sédimentation) _ Piégeage du CO₂ par l'altération des roches crustales (photo d'ouverture de chapitre dans les Alpes, p. 293) 	

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Pas de mise en relation entre les indices et le climat	Mise en relation pertinente des données et de leur signification climatique	Mise en relation des informations des documents en exploitant les connaissances antérieures
Contenu	Absent	Incomplet Certains éléments ont été oubliés	Tous les indices géodynamiques de l'unité sont exploités	Les indices géodynamiques de cette unité et des précédentes sont exploités
Communication	Non conforme	Tableau complété	Tableau avec titres aux niveau des entrées	Conforme et bien renseigné

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas »

Unité 1

Question 1

Observez les cartes présentées (doc. 1) et interprétez l'évolution des biomes (doc. 2) de 1876 à 2000, puis de 2076 à 2100 en fonction des prévisions des évolutions climatiques.

De 1876 à 2000, on voit une réduction notable de la surface occupée par les biomes boréaux de la ceinture montagnarde et subalpine. En 2000, ces ceintures sont remontées de 150 mètres au sommet et de 390 mètres à la base par rapport à leur altitude en 1876.

Selon les prévisions favorables, cette ceinture boréale va pratiquement disparaître. Elle sera remontée de 240 mètres pour le sommet et de 410 mètres à la base plus élevées par rapport à leur altitude actuelle.

Si les prévisions sont défavorables, la quasi-totalité des biomes alpins, boréaux et tempérée froide (vert foncé) disparaît. La ceinture boréale remonte de plus d'1 km en altitude.

Question 2

À l'aide des informations contenues dans les doc. 3 et 4, expliquez comment le CO₂ interagit avec l'eau et quel est son effet sur l'équilibre des réactions physico-chimiques dans l'eau.

Une fois dissous dans l'eau, le CO₂ interagit avec 3 molécules d'eau pour former un ion carbonate pouvant interagir avec les ions Ca²⁺ pour faire de la calcite, mais aussi deux ions hydroniums. Plus la concentration en ions hydronium augmente sous l'effet de l'apport de CO₂, plus le pH diminue. C'est ce que l'on observe grâce au réactif coloré qu'est le rouge de créosol.

Question 3

Expliquez les conséquences de la dissolution du CO₂ dans l'eau sur les communautés des biomes marins.

Certains organismes ont du mal à fabriquer leur coquilles ou carapaces, car la baisse du pH peut dissoudre le calcaire. Les moules et la communauté des biomes des récifs coralliens est très sensible à la baisse du pH. D'autres organismes profitent de cette sensibilité pour proliférer (algues).

Question 4

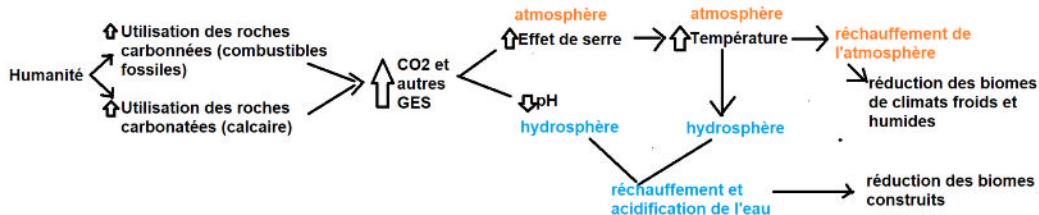
Trouvez dans le doc. 5 les arguments qui suggèrent que les humains sont responsables des perturbations de leur environnement.

Le seul graphique dont la pente suit une élévation régulière des anomalies thermiques depuis 1876 est celui qui est montre sa relation avec l'activité humaine. Ni le volcanisme, ni l'activité solaire ne sont corrélés avec les anomalies thermiques.

Le diagramme montre les émissions de CO₂ liées aux activités humaines. Ce gaz produit un fort effet de serre. Les travaux des climatologues montrent que ces émissions de gaz à effet de serre par les humains sont responsables du changement climatique actuel (vu en enseignement scientifique).

Question 5

Sous forme d'un schéma bilan, expliquez comment l'humanité est responsable de l'évolution de son environnement depuis 1876, précisez de quelle manière son activité modifie l'environnement.



Unité 2

Question 1

Expliquez pourquoi la tourbe peut enregistrer l'évolution du climat au cours du temps.

La tourbe se forme de façon continue du bas vers le haut grâce à l'accumulation de matière végétale. Cette matière piège dans un milieu anoxique les pollens des espèces présentes dans l'environnement. En s'accumulant, la tourbe enregistre ainsi les variations du biome qui l'entoure et donc le climat.

Question 2

À l'aide des données du diagramme pollinique de la grande pile (doc. 3), reconstituez le climat dans les Vosges à l'Holocène.

Au début de l'Holocène, on compte environ 30 % de pollens de poacées et d'armoises (plantes qui résistent à la sécheresse et aux grands froids), 65 % de plantes tels que le bouleau et l'épicéa (résistent au froid, mais le bouleau craint la sécheresse) et à peine 5 % de plantes comme le chêne, le hêtre et le noisetier qui sont plus sensibles au froid. Ceci indique que le climat était froid.

Puis, rapidement, la tendance s'inverse et pendant plus de la moitié de l'Holocène, le climat dans les Vosges s'adouci puisque les associations tempérées (chêne, noisetier et hêtres) constituent 95 % des pollens.

Ensuite, le climat s'est à nouveau refroidi sans pour autant être très froid : les associations de bouleau, épicéa dominaient, mais les espèces sensibles au froid étaient toujours présentes.

Plus près de nous, on observe un réchauffement puisque la quantité de pollen d'espèces sensibles au froid augmente.

Question 3

Expliquez comment les foraminifères peuvent permettre de reconstituer le climat et indiquez les précautions à prendre pour être certain de la validité de l'information enregistrée.

Il est possible d'enregistrer le climat à l'aide du rapport isotopique $\delta^{18}\text{O}$ des isotopes de l'oxygène, qui dépend de la température. Les isotopes de l'oxygène entrent dans la composition du test du foraminifère. Ils enregistrent donc le climat au moment de la formation du test.

Une autre approche est envisageable : elle consiste à distinguer parmi les espèces rencontrées dans un échantillon celles qui correspondent à une eau froide ou une eau chaude.

Il est préférable de choisir des foraminifères benthiques, qui vivent dans une eau profonde dont les variations des températures se font à grandes échelles de temps. Ces variations permettent d'observer des fluctuations climatiques et non les fluctuations météorologiques (qui sont, elles, enregistrées à la surface des océans).

Unité 3

Question 1

Parmi les éléments correspondants aux indices d'un paysage glaciaire (doc. 1 à 3), citez ceux qui correspondent à des éléments transportés et ceux qui resteront, en place soulignant ainsi l'emplacement de l'ancien glacier.

Éléments transportés : moraines, blocs erratiques.

Éléments qui resteront en place : relief et cirque glaciaire, vallée en auge, moraines, blocs erratiques, stries glaciaires, roches moutonnées, vallées suspendues.

Question 2

Évaluez le volume des glaces de la vallée glaciaire de la Cleulie (doc. 2) en réalisant l'activité numérique.

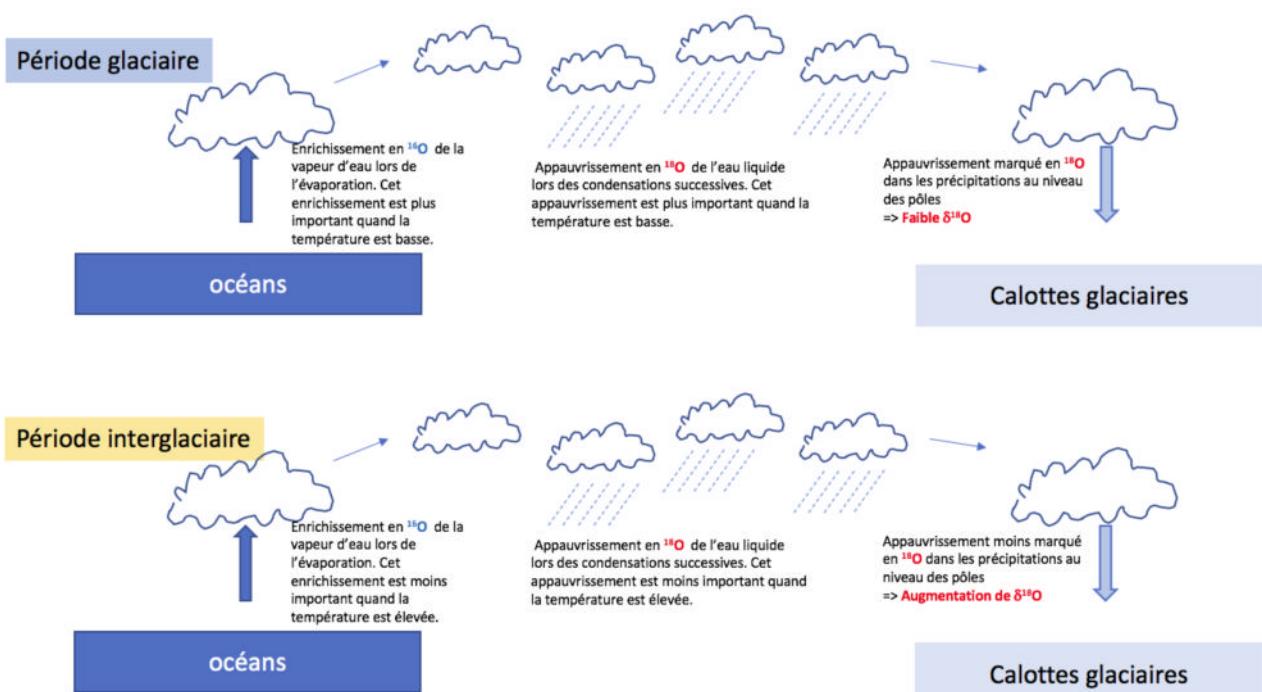
Longueur de la vallée : environ 20 km.

Surface occupée par la glace dans la vallée : prendre la formule de l'aire triangle isocèle ($\text{aire} = a \times h/2$, où a est la longueur de la base et h la hauteur) ; ici h est de 752 m et a d'environ 1,8 km

On trouve : aire = 0,6768 km² ; volume = 13,53 km³.

Question 3

Sous forme de deux schémas, représentez les étapes du fractionnement isotopique de l'oxygène de l'eau pendant la fabrication de la glace lors d'une période glaciaire et pendant une période interglaciaire. Justifiez alors que le rapport isotopique $\delta^{18}\text{O}$ des glaces soit plus élevé en période interglaciaire qu'en période glaciaire (doc. 4 à 6).



Unité 4

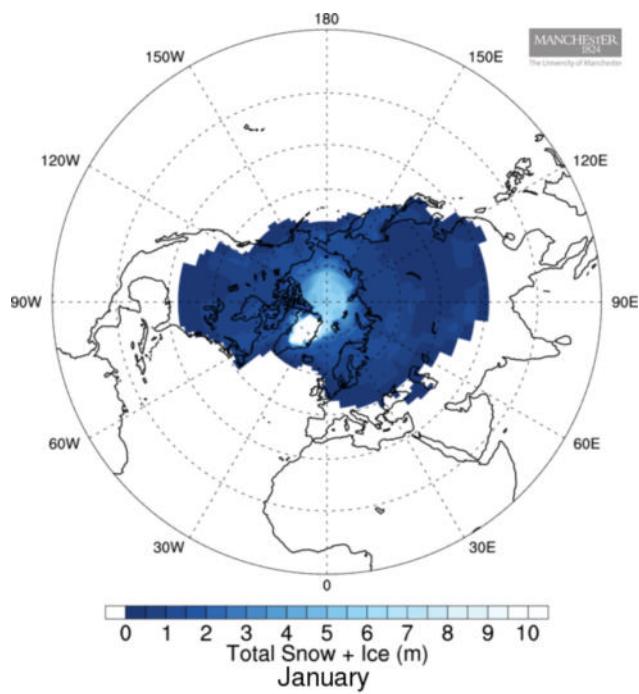
Question 1

Sous forme d'un tableau à double entrée, donnez pour chaque paramètre orbital : une définition simple et explicative (doc. 1), les effets sur le climat (doc. 1 et 2), la périodicité (doc. 3).

Paramètre orbital	Définition	Effet sur le climat	Périodicité (ans)
Excentricité	Passage de l'orbite de la Terre autour du Soleil d'un état sphérique à un état elliptique	La forme elliptique favorise le contraste entre les périodes où la Terre est proche du Soleil et celle où elle est loin. Elle s'oppose à une stagnation d'un climat à une certaine latitude.	120 000 et 400 000
Obliquité	Variation (entre 22 et 24,6°) de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique	Plus l'obliquité est forte plus le contraste saisonnier est important.	41 000
Précession	Mouvement de l'axe de rotation de la Terre qui modifie l'orientation des hémisphères par rapport au Soleil indépendamment de la saison	Influe sur le caractère froid ou doux des hivers et le caractère chauds ou frais des étés	Environ 20 000

Question 2

Réalisez l'activité numérique « Build Your Own earth » proposée doc. 2 afin d'étudier l'impact des paramètres orbitaux sur le climat et notamment, sur la couverture neigeuse il y a 21 000 et 11 000 ans.

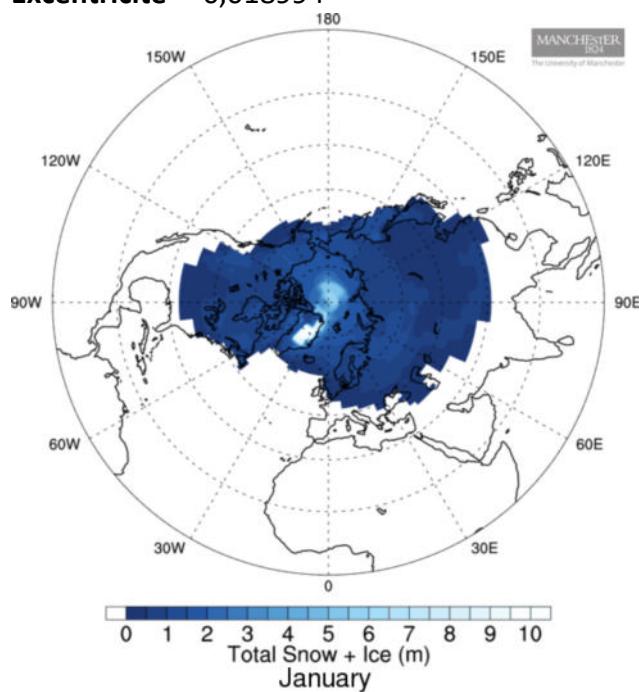


Earth: Orbital Parameters - 21,000 years ago

Total Snow + Sea Ice - surface

Obliquité 22,949

Excentricité 0,018994



Earth: Orbital Parameters - 11,000 years ago

Total Snow + Sea Ice - surface

Obliquité 24,2012

Excentricité 0,019529

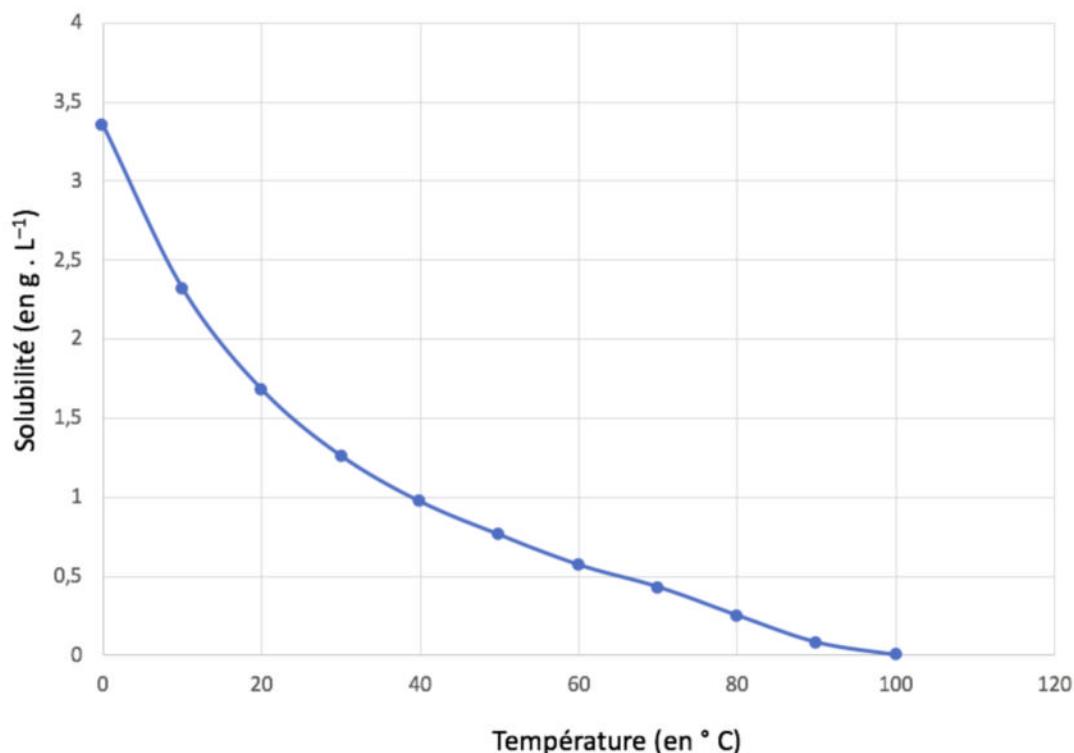
Question 3

Réalisez l'activité numérique avec le logiciel Paléobiome (doc. 3) afin de corrélérer les fluctuation des paramètres orbitaux et la température globale moyenne.

Voir éléments de correction de la tâche complexe

Question 4

Construisez la courbe de l'évolution de la dissolution du CO₂ dans l'eau en fonction de la température, puis expliquez quelles rétroactions peuvent agir lors d'une période glaciaire et lors d'une période interglaciaire.



Lors d'une période interglaciaire, la diminution de température induite par les paramètres astronomique est à l'origine de deux rétroactions positives :

- diminution de la solubilité du CO₂ => diminution de la concentration atmosphérique en CO₂ => diminution de l'effet de serre => diminution de la température ;
- augmentation de la surface des calottes glaciaires => augmentation de l'albédo => diminution de la température

Lors d'une période glaciaire, l'augmentation de température induite par les paramètres astronomique est à l'origine de deux rétroactions positives :

- augmentation de la solubilité du CO₂ => augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ => augmentation de l'effet de serre => augmentation de la température
- diminution de la surface des calottes glaciaires => diminution de l'albédo => augmentation de la température

Unité 5

Question 1

Comparez la signification climatique d'un banc calcaire et d'un banc marneux (doc. 1 à 3) et expliquez pourquoi, quelle que soit l'épaisseur de ce couple de bancs, il correspond globalement à la même durée de temps.

Un banc calcaire correspond à une période où l'altération des continents est faible avec peu de précipitations, et peu d'apport argileux en mer. C'est la signature d'un climat aride.

Un banc marneux, riche en argile est produit lors de périodes climatiques plus humides marquées par une altération intense.

Un couple banc marneux/banc calcaire correspond à un cycle de précession qui dure 20 000 ans.

Question 2

Proposez un protocole expérimental qui permettrait de calculer l'indice stomatique d'une feuille de ginkgo fraîchement coupée et expliquez comment vous détermineriez le taux de CO₂ actuel (doc. 4). Quelle sera selon vous la valeur de l'index stomatique mesuré ?

On peut utiliser la technique de l'emprunte foliaire avec verni ou le prélèvement d'épiderme. La préparation microscopique observée peut faire l'objet d'un comptage des cellules épidermiques et des cellules stomatiques, soit directement, soit à partir d'une capture d'image puis du logiciel Mesurim.

La détermination du nombre de chaque type cellulaire permet de faire le calcul de l'indice stomatique à l'aide de la formule proposée doc. 4. En fonction du rapport obtenu, on détermine graphiquement la concentration en CO₂ à l'aide du tableau.

La concentration atmosphérique actuelle en CO₂ est de l'ordre de 414 ppm. On doit obtenir une valeur d'indice stomatique proche de 8.

Question 3

À partir de la température moyenne actuelle, déterminez la température du début de l'Éocène (doc. 5) et proposez l'état, à cette période, les indicateurs géologiques utilisés par les scientifiques (doc. 4 et 5).

Si l'on part d'une température moyenne globale actuelle de 15°C, la température moyenne à l'éocène était donc supérieure à 27°C.

La concentration atmosphérique en CO₂ était supérieure à 1000 ppm, l'index stomatique était bas (6 %), le rapport isotopique du bore montre que le pH de l'eau était élevé (malgré la température de l'eau, la forte concentration atmosphérique induisait une dissolution importante du CO₂ dans l'eau), les nahcolites sont fréquents, le rapport isotopique du carbone montre un accroissement de la photosynthèse et les paléosols montrent une activité intense des micro-organismes.

Unité 6

Question 1

En quelques phrases, expliquez, à l'aide des informations (doc. 1) et de vos connaissances, pourquoi le continent antarctique ne s'est couvert d'un inlandsis qu'après 33 Ma.

Avant 33 Ma, on est à l'Éocène et il fait globalement plus chaud. Par ailleurs, on voit que des eaux chaudes descendant de l'équateur en longeant la côte est de l'Australie, elles baignent les côtes antarctiques et réchauffent le continent. Lors de la formation d'une ouverture entre la Tasmanie et l'Antarctique, la circulation d'eau froide peut faire le tour de l'Antarctique et, progressivement, les courants chauds n'atteignent plus la côte, ce qui produit le refroidissement du continent et la mise en place d'un inlandsis qui est toujours en place depuis.

Question 2

Expliquez comment l'altération des roches basaltiques peut participer à un refroidissement climatique (doc. 3).

L'altération de certains minéraux du basalte consomme du CO₂ atmosphérique.

Question 3

Expliquez quelle peut être la signification climatique d'un fort rapport isotopique $\delta^{87}\text{Sr}$ du strontium dans un calcaire.

Un fort rapport isotopique $\delta^{87}\text{Sr}$ est le résultat de l'altération d'un continent, donc la présence d'une ceinture otogénique, et donc du piégeage de CO₂ lors de l'altération des minéraux, un processus qui conduit à un refroidissement.

Question 4

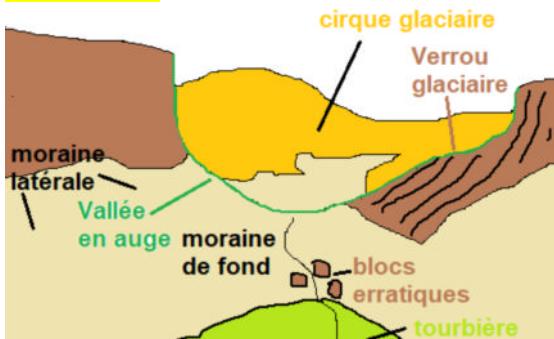
Mettez en relation les informations contenues dans les documents de l'unité pour expliquer que le rôle de la géodynamique sur le refroidissement global observé pendant le Cénozoïque.

Dans le doc. 1, on voit que le déplacement des plaques a favorisé la mise en place de l'inlandsis au pôle sud. Dans le doc. 2, on apprend qu'une vaste ceinture orogénique s'est mise en place au Cénozoïque. Dans les doc. 3 et 4, on apprend que les minéraux des roches peuvent être altérés et piéger du CO₂. Dans le doc. 5 on voit que cette altération concerne essentiellement les roches de la croûte continentale exhumées depuis la fin du Crétacé (dans la chaîne alpine).

Le piégeage du CO₂ dans les minéraux et les modifications de la circulation océanique ont contribuer à refroidir le climat au Cénozoïque.

Éléments de correction des exercices

Exercice 2



Pour évaluer le volume de glace, on peut prendre comme modèle pour la tranche de glacier la surface d'un demi ovale. La surface est donnée par la formule suivante :

$$1/2 [\pi \times (1/2 \text{ grand longueur}) \times (1/2 \text{ petite longueur})]$$

On a :

- grande longueur = distance AB ;
- petite longueur = différence d'altitude entre le bord supérieur de la vallée (on peut faire la moyenne des altitudes de A et B) et le fond (point C).

La surface est donc :

$$\begin{aligned} & 1/2 \times [\pi \times (1/2 \times 0,7) \times (1/2 \times ((2,315+2,312)/2) - 2,137)] \\ &= 1/2 \times [(\pi \times (1/2 \times 0,7) \times (1/2 \times 0,1765))] \\ &= \frac{1}{2} \times (\pi \times 0,35 \times 0,08825) \\ &= 0,0485 \text{ km}^2 \end{aligned}$$

Si l'on admet que le glacier a cette surface jusqu'au bout du cirque sur une distance de 1,5 km, son volume est de :

$$\begin{aligned} & 0,0485 \times 1,5 \\ &= 0,0727 \text{ km}^3. \end{aligned}$$

Si la vitesse de fonte est de $0,79 / 62 = 0,0127 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$, et que le volume était de $0,0727 \text{ km}^3$, sa fonte s'est déroulée pendant :

$$\begin{aligned} & 0,0727 / 0,0127 \\ &= 5,73 \text{ ans} \end{aligned}$$

Remarque

Dans ces calculs, on part du principe que le glacier a une épaisseur et une largeur homogène sur toute sa longueur, ce qui est une approximation. Par ailleurs, on assimile sa forme à un demi-ovale, ce qui est aussi une approximation.

Exercice 3

1. Dans la grotte de Lascaux, on trouve des chevaux, des cerfs et des aurochs. Ces 3 animaux vivaient dans des climats tempérés. Dans la grotte Rouffignac des mammouths, des bouquetins, qui vivent en climat froid ; glaciaires/ périglaciaire.

Ces deux grottes se situent à la même latitude (celle de la Dordogne). Ainsi, on peut dire qu'il y a 17 000 ans, le climat était tempéré (période interglaciaire) et que 5 000 années plus tard, le climat s'est refroidi (période glaciaire).

2. Les limites de cette approche sont :

- les limites de la datation (^{14}C du bois utilisé pour les pigments) ;
- les limites de détermination des exigences climatiques déduites en partie à partir du principe de l'actualisme.

Exercice 4

La température de l'eau enregistrée par les coquilles des gastéropodes marins montre une alternance entre des eaux à 10 ° et 25 °C. Cela s'explique car il s'agit de gastéropodes littoraux et que l'on se situe au bord de la Méditerranée. Les glaces continentales n'ont jamais gagné le littoral méditerranéen, mais dans les alpes proches il y avait des glaciers.

Les pollens montrent deux périodes où l'on observe des poacées, qui signent des climats plus froids et arides, et où la faune était constituée d'espèces que l'on retrouve actuellement en montagne (bouquetins, chamois). Ces deux périodes correspondent à celles où l'eau de mer était la plus fraîche (200 000 et 150 000 ans). Entre ces deux périodes, le climat est plus chaud avec des pollens d'arbres, des faunes de climat tempéré et des eaux à plus de 10 °C.

On en déduit : interglaciaire de 337 000 à 230 000 ans, période glaciaire vers 200 000 ans, puis réchauffement jusqu'à 150 000 ans où, à nouveau, une période glaciaire a eu lieu, avant un réchauffement enregistré dès 125 000 ans.

Exercice 5

Éléments que l'on peut tirer des documents :

- > Les lœss ont deux effets différents sur le climat. Ils s'opposent à la pénétration des rayons solaires dans l'atmosphère, donc s'opposent au réchauffement. En fertilisant les eaux, ils favorisent le piégeage du CO₂ et donc la diminution de l'effet de serre, ce qui conduit au refroidissement.
- > Lors des périodes glaciaires, les lœss sont produits par l'abrasion des glaciers. Plus il fait froid, plus l'étendue des glaciers est importante et donc plus il y a de lœss. Plus il y a de lœss, plus le climat se refroidit. Le lœss entraîne une rétroaction positive sur le refroidissement du climat.

Exercice 6

Éléments que l'on peut tirer des documents :

- > On distingue des grands maxima de l'irradiance solaire : entre 6 et 7 ka, entre 3,2 et 3 ka, vers 2 ka, il y environ – 500 ans, puis à + 500 ans et avant l'an 2000.
- I> Les minima sont nombreux entre – 6 et – 5 ka, vers – 4,5 ka, 3,5 ka, entre 3 et 2,5 ka, vers 1,5 ka, entre – 700 et – 500 ka et pendant une longue période de 700 à 1700 ans.
- > En comparant ces périodes avec celles des fluctuations de la température des eaux pendant l'Holocène, on observe que les maxima de l'irradiance solaire compris entre 7 et 6 ka peuvent être corrélés avec des maxima thermiques des eaux, des minima d'irradiance entre 5 et 4 ka, avant 4 ka ou vers – 500 ans sont corrélables avec des périodes froides.
- > On peut donc envisager que, si l'irradiance est faible, l'activité du Soleil amplifie le refroidissement provoqué par les paramètres orbitaux et que, si l'irradiance est forte, l'activité du Soleil amplifie le réchauffement provoqué par les paramètres orbitaux.
- > Inversement, une irradiance faible atténuerait le réchauffement provoqué par les paramètres orbitaux et une irradiance forte atténuerait le refroidissement provoqué par les autres paramètres orbitaux.

Exercice 7

Connaissances : **en gras**

Données issues des documents : *en italiques*

Le méthane est un gaz à effet de serre puissant à durée de vie moyenne, il est produit lors d'une dégradation incomplète de la matière organique.

Le méthane est piégé au sein des clathrates dans les sols ou les sédiments gelés des régions très froides (doc. 1). Ces clathrates sont stables dans des conditions où la pression et la température le permet doc.2. Par exemple, à 12 °C, les clathrates sont stables à une pression supérieure à 10MPa, alors qu'à 1 °C, la pression peut être de 3MPa seulement.

*Au large de la Norvège à l'**Holocène** (doc. 1), un glissement de terrain a provoqué une diminution de la pression sur les clathrates et libéré du méthane. Ce rejet est probablement la cause du maximum thermique du début de l'**Holocène**.*

De façon naturelle, de petites quantité de méthane sont émises par le perglisol sur les continents ou les sédiments marins (doc.1). Elles traversent la colonne d'eau ou le sol et se retrouvent dans l'atmosphère. Depuis 2010, des concentrations très importantes de méthane sont mesurées dans l'atmosphère au-dessus de l'océan arctique (doc. 3) au niveau des sédiments littoraux et du pergelisol de Sibérie. Ces mesures sont le signe d'un réchauffement du climat sibérien qui favorise la déstabilisation des clathrates.

La libération de ce méthane à cause de l'élévation des températures va accroître l'effet de serre et amplifier ce réchauffement.

Exercice 8

On demande ici à l'élève de réaliser des préparations microscopiques de pollens coloré à la fuschine, de réaliser une détermination à l'aide de la clé fournie, de compter les pollens caractéristiques des climats chauds ou des climats froids afin d'associer une étiquette à chaque échantillon.

La mise en forme recommandée est un dessin ou une capture d'image des pollens caractéristiques avec des légendes qui précisent les caractères distinctifs des pollens (pores, sillons, ballonnets)

Les aides majeures proposées en numérique sont :

- deux documents présentant les extraits de pollens ;
- le protocole de réalisation d'une préparation microscopique de pollen ;
- un tableau des résultats du comptage ;
- un tableau de secours avec le calcul des pourcentages.

Éléments d'évaluation

Proposer une stratégie pour résoudre une situation problème	
<p>On attend du candidat une stratégie réaliste et cohérente avec la recherche à mener et les ressources, précisant ce qu'il fait, comment il le fait et ce qu'il attend.</p> <p><u>L'examinateur évalue au fil de l'étape A.</u></p> <p><u>Aide mineure</u> : le candidat est sur la bonne voie mais l'évaluateur lui demande une argumentation sur la stratégie ou utilise quelques questions ouvertes pour souligner une imprécision dans la stratégie.</p> <p><u>Aide majeure</u> : l'évaluateur réoriente la stratégie proposée et/ou ajoute explicitement un élément qui manque (exemple : un témoin) pour qu'elle conduise à des résultats exploitables.</p> <p>On acceptera et on valorisera toute idée de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>réalisation</u> de préparation microscopique pour déterminer la nature des pollens présents. - <u>comptage (%)</u> pour avoir une évaluation plus pertinente de l'abondance des espèces. - <u>on s'attend à trouver des pollens d'espèces tempérées à l'Holocène et des espèces de climat froid au Pléistocène.</u> 	<p>Niveau A = seul ou avec <u>une aide mineure</u>, il obtient une stratégie opérationnelle.</p> <p>Niveau B = avec <u>plus d'une aide mineure</u>, il obtient une stratégie opérationnelle.</p> <p>Niveau C = avec <u>une aide majeure</u>, il obtient une stratégie opérationnelle.</p> <p>Niveau D = malgré <u>toutes les aides</u> apportées il est incapable de mettre au point une stratégie opérationnelle.</p>
Mettre en œuvre un protocole pour résoudre une situation problème	
<p>On attend du candidat qu'il mette en œuvre le protocole : maîtrise du matériel, respect des consignes et gestion correcte du poste de travail.</p> <p>Seules aides majeures :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'examinateur réalise le geste à la place du candidat : <u>réalisation des réglages du microscope, détermination des espèces, calculs de pourcentage</u>. - L'examinateur intervient pour imposer au candidat les conditions de travail et les règles de sécurité. <p>Le rangement du poste de travail est comptabilisé comme une aide mineure.</p> <p>Toutes les autres aides doivent être considérées comme mineures.</p>	<p>Niveau A = seul ou avec <u>une aide mineure</u>, il obtient des résultats exploitables.</p> <p>Niveau B = avec <u>plus d'une aide mineure</u>, il obtient des résultats exploitables.</p> <p>Niveau C = avec <u>une aide majeure</u>, il obtient des résultats exploitables.</p> <p>Niveau D = malgré <u>toutes les aides</u> apportées il n'obtient pas de résultats exploitables. <i>Un document de secours</i> est indispensable.</p>
Présenter les résultats pour les communiquer.	
<p>On attend du candidat qu'il présente une production :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>techniquement correcte</u> (soignée, lisible, appropriée, ...); - <u>bien renseignée</u> (informations complètes et exactes); - <u>bien organisée</u> et donc <u>pertinente</u> (informations traduites dans le sens du problème à traiter). <p>Une préparation présente des pollens d'espèces tempérées et l'autre présente des pollens d'espèces de climat froid.</p>	<p>Niveau A = trois critères</p> <p>Niveau B = deux des trois critères</p> <p>Niveau C = un seul des trois critères</p> <p>Niveau D = rien à valoriser</p>
Exploiter les résultats obtenus pour répondre au problème	
<p>On attend du candidat qu'il :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>exploite</u> l'ensemble des résultats (= je vois); - <u>intègre</u> des notions (issues des ressources et de la mise en situation) (= je sais); - <u>construise</u> une réponse au problème posé explicative et cohérente intégrant les résultats (= je conclus). <p>L'extrait de pollen tempéré appartient à l'Holocène et l'autre au Pléistocène</p>	<p>Niveau A = trois critères</p> <p>Niveau B = deux des trois critères</p> <p>Niveau C = un seul des trois critères</p> <p>Niveau D = rien à valoriser</p>

Chapitre 13. Les variations climatiques au Paléozoïque et au Mésozoïque

Pendant les 290 Ma du Paléozoïque puis les 185 Ma du Mésozoïque, soit 475 Ma le climat a bien évidemment changé. De la sortie du Précambrien jusqu'au début du Cénozoïque, de nombreux événements géologiques ont eu lieu (orogénèses, formation et disparition d'océans, etc.). Ces manifestations géodynamiques ont eu, comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, un impact sur le climat. Par ailleurs, pendant ces 475 Ma, la vie s'est considérablement développée et, dès le Silurien, les surfaces continentales étaient colonisées par des organismes à présent inféodés à l'atmosphère. Ces derniers, qu'ils soient terrestres ou aquatiques, ont laissé des traces de leur présence qui nous permettent de reconstituer les paléoenvironnements. De plus, certains ont interagir avec l'atmosphère et ont contribué à modifier le climat.

Ce chapitre, qui ré-exploite bon nombre d'indices et méthodes vues dans le chapitre précédent, va nous faire remonter le temps. Nous commencerons par étudier le climat du Crétacé supérieur, réputé chaud, puis les dernières centaines de millions d'années du Paléozoïque, qui montrent des traces d'un refroidissement. Ce chapitre fera aussi référence au chapitre 7 « Les traces du passé mouvementé de la Terre » et aux éléments des programmes des classes antérieures, car il permet de synthétiser l'influence des facteurs biotiques et abiotiques sur les paléobiomes, et ainsi de reconstituer l'évolution climatique de notre planète.

Thème 4 Les climats de la Terre : comprendre le passé pour agir aujourd’hui et demain	
Connaissances	Capacités, attitudes
<p>Au Mésozoïque, pendant le Crétacé, les variations climatiques se manifestent par une tendance à une hausse de température. > Unités 1 et 2</p> <p>Du fait de l'augmentation de l'activité des dorsales, la géodynamique terrestre interne semble principalement responsable de ces variations. > Unité 3</p> <p>Au Paléozoïque, des indices paléontologiques et géologiques, corrélés à l'échelle planétaire et tenant compte des paléolatitudes, révèlent une importante glaciation au Carbonifère-Permien. > Unité 4</p> <p>Par la modification du cycle géochimique du carbone qu'elles ont entraînée, l'altération de la chaîne hercynienne et la fossilisation importante de matière organique (grands gisements carbonés) sont tenues pour responsables de cette glaciation. > Unité 5</p>	<p>Exploiter la carte géologique du monde pour calculer les vitesses d'extension des dorsales aux périodes considérées. Utiliser les connaissances acquises sur la géodynamique interne et la tectonique des plaques pour comprendre leur rôle sur le climat et mettre en relation la nature des roches formées avec les paléoclimats du Crétacé. > Unité 3</p> <p>Reconstituer l'extension de la glaciation permienne à partir de la distribution des tillites. > Unité 4</p> <p>Reconstituer un paléoclimat local à partir d'une variété d'indices paléontologiques ou géologiques en tenant compte de la paléo-latITUDE Unités 1, 4 et 5</p> <p>Exploiter des bases de données pour reconstituer les paléoceintures climatiques. > Activité expérimentale 1</p> <p>Exploiter les équations chimiques associées aux transformations d'origines géologiques pour modéliser les modifications de la concentration en CO₂ atmosphérique. > Unité 2</p> <p>Mobiliser les acquis antérieurs sur le cycle du carbone biosphérique et les enrichir des connaissances sur les réservoirs géologiques (carbonates, matière organique fossile) et leurs interactions. > Unités 2 et 5</p>

Compétences travaillées (et quelques capacités associées)	Place dans le chapitre
Pratiquer des langages <ul style="list-style-type: none"> Utiliser un logiciel de traitement de données Communiquer à l'écrit sous forme d'un texte Communiquer à l'écrit par un schéma Utiliser un logiciel d'acquisition, de simulation et de traitement de données Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique 	<ul style="list-style-type: none"> Unités 2 et 3 Unités 4 et 5 Unité 3 Unités 4 et 5 Unité 2
Pratiquer des démarches scientifiques <ul style="list-style-type: none"> Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution Interpréter des résultats expérimentaux des données et en tirer des conclusions Observer, expérimenter, calculer Comprendre le lien entre un phénomène naturel et le langage mathématique 	<ul style="list-style-type: none"> Unités 1 et 4 Unité 2 Unité 2 Unité 1
Concevoir, créer, réaliser <ul style="list-style-type: none"> Concevoir et mettre en œuvre un protocole 	<ul style="list-style-type: none"> Unités 2 et 3
Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre <ul style="list-style-type: none"> Planifier et organiser son travail 	<ul style="list-style-type: none"> Unité 2
Adopter un comportement éthique et responsable <ul style="list-style-type: none"> Appliquer des règles de sécurité au laboratoire 	<ul style="list-style-type: none"> Unité 3

Choix pédagogiques

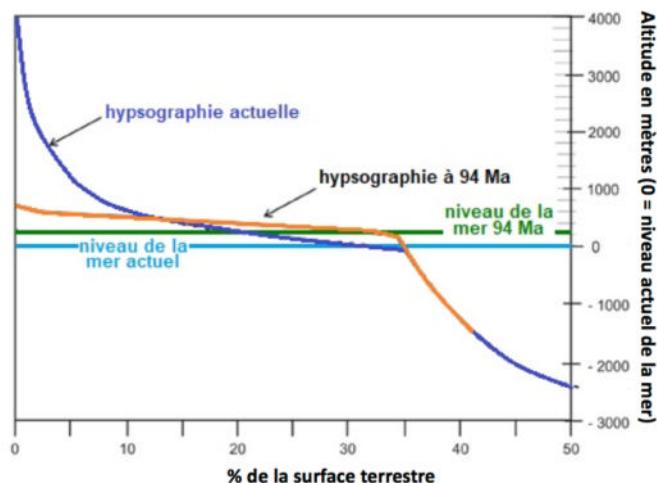
Unité 1

> Cette unité plante le décor du Crétacé supérieur en présentant des biomes présents à différentes localisations du globe.

> L'Antarctique a migré progressivement au cours du début de l'ère secondaire pour se placer au niveau du pôle sud au début du Crétacé. Il n'en n'a plus bougé ensuite. Le **document 1** associé à l'activité Excel montre que, pendant le Crétacé supérieur, il y avait en Antarctique une flore d'angiospermes diversifiée (nombreux pollens). Comme le montre le carottage étudié ici, cette flore remplace progressivement la flore de bryophytes et de ptéridophytes qui dominait jusque-là. La présence d'angiosperme à ces hautes latitudes permet de penser que le climat aux pôles était plus chaud qu'actuellement. Il faut néanmoins souligner auprès des élèves que, si les plantes dont les traces ont été retrouvées existent encore actuellement dans l'hémisphère Sud à de plus basses latitudes, la végétation polaire crétacée devait nécessairement être adaptée à un contraste saisonnier important entre l'hiver, où la photosynthèse devait être active, et l'été, où il faisait presque nuit.

> Le **document 2** concerne un paléoenvironnement littoral du début du Crétacé inférieur. Des pistes de déplacement (traces de pattes et de queues d'ornithopodes et de théropodes) ont été imprimées dans un sédiment qui était mou et non consolidé. À quelques mètres de là, des traces tabulaires de sauropodes sont aussi observable. La consolidation en relief de la trace de pas est la signature d'un fond vaseux. Les microfossiles retrouvés dans le sédiment sont un assemblage d'oogones de characées et de foraminifères benthiques littoraux. Ces grands vertébrés devaient donc se déplacer dans une vase saumâtre non consolidée.

> Le **document 3** est une reconstitution de cet environnement d'après les indices précédents. On distingue des étendues marécageuses dans lesquelles des dinosaures se déplacent. Le sédiment est mou ; certaines traces montrent qu'ils ont du mal à se déplacer dans cette vase saumâtre et non consolidée. Les spécialistes s'accordent de plus en plus sur le fait que nombre d'entre eux adoptaient des modes de vie et de déplacement proches de ceux des crocodiliens, profitant ainsi de la poussée d'Archimète pour contrebalancer le jeu de la gravité sur leur imposante masse. L'environnement Crétacé présentait très peu de reliefs, ils étaient tous érodés depuis longtemps. Les profils hypsographiques étaient très plats, comme le montre le document ci-dessous.



Les rivières y formaient donc des méandres et les terres étaient recouvertes de zones marécageuses continentales et littorales. Cet environnement aquatique, siège d'une forte évaporation et évapotranspiration induisait une forte humidité atmosphérique. De plus, les marécages et les phytophages produisaient beaucoup de méthane. Rappelons que la vapeur d'eau et méthane sont des gaz à effet de serre très puissants.

> Les travaux de modélisation modernes montrent que pour obtenir un gradient de températures entre les pôles (**doc. 1**) et l'équateur (**doc. 2**) compatibles avec les traces fossiles retrouvées sur le globe, des quantités importantes de vapeur d'eau sont suffisantes si elles sont associées à un taux de gaz à effet de serre de 8 fois le niveau préindustriel en équivalent CO₂. Rappelons que le pouvoir de réchauffement global (PRG) du méthane est 28 fois plus élevé que celui du CO₂ et que le PRG du protoxyde d'azote est 256 fois plus élevé que celui du CO₂ (voir manuel d'enseignement scientifique terminale, chapitre 3 p. 71). Le réchauffement du climatique n'implique donc pas nécessairement de gigantesques quantités de CO₂ : le méthane et le protoxyde d'azote produits par la dégradation de la matière organique dans ces environnements inondés couplé à l'humidité de l'atmosphère peuvent induire un fort réchauffement climatique.

> Le **document 4** montre un échantillon de roche sédimentaire abondamment formée au Crétacé : un black shale (schistes noir) ; ces derniers sont très abondants à l'affleurement dans les Alpes. Ce type de sédiment argileux et riche en matière organique est la roche mère de nombreux gisements pétroliers d'âge Crétacé.

> Le **document 5** situe l'emplacement des nombreux gisements d'hydrocarbures mis en place au Crétacé moyen et supérieur. On y observe de nombreux gisements issus d'environnements marins et lacustres, ce qui souligne à nouveau l'importance des étendues inondées et anoxiques à l'époque et la réduction de la surface des terres émergées.

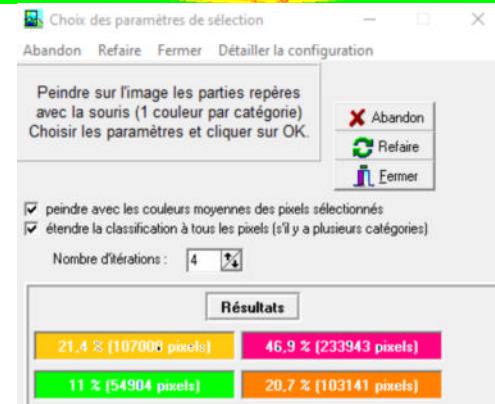
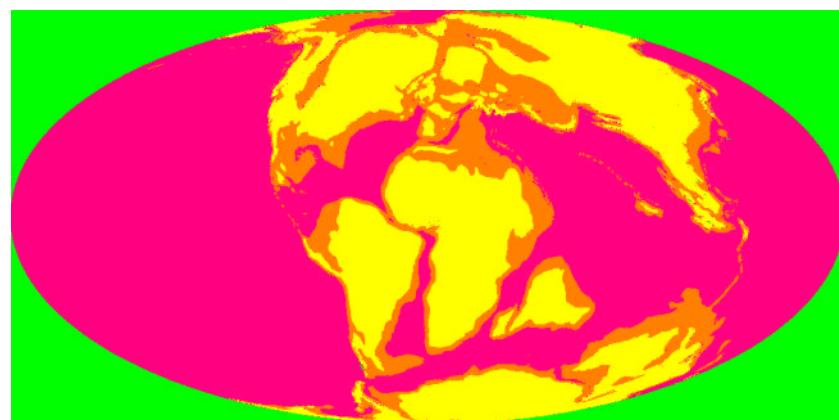
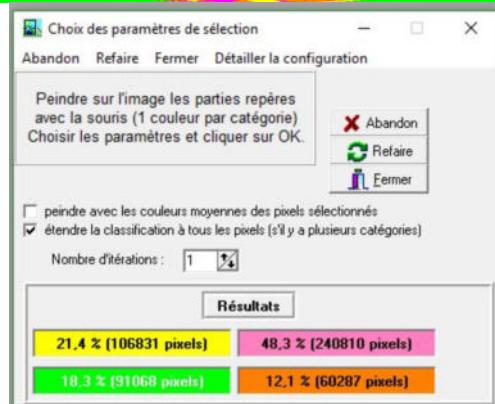
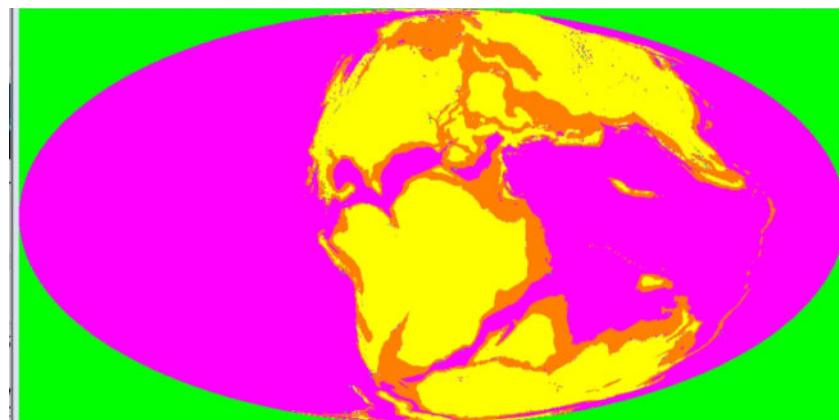
> Le **document 6** rappelle les conditions environnementales favorisant ces gisements de matière organique. Leur formation nécessite un fort développement de la végétation en milieu continental et un enfouissement par apport d'argiles par exemple (qui s'opposent à leur oxydation). Cet apport détritique est à relier à une forte humidité qui permet l'érosion. Au Crétacé, les ceintures orogéniques sont altérées, mais l'altération des carbonates (karstification) est importante et libère des argiles présentes dans ces roches. De plus, la fracturation continentale à l'origine des océans en formation facilite l'altération des roches des épaulements de rift (marge Brésil/Angola par exemple, voir doc. 5). Dans les dépressions subsidentes en formation, souvent sans communication régulière avec l'océan se mettent en place des bassins euxiniques, où la chaleur stratifie fortement les eaux et constitue des zones anoxiques profondes et persistantes. On voit que les conditions climatiques favorables à la mise en place de tels environnements s'étendaient vers les hautes latitudes puisque des gisements de charbons sont décrits en Sibérie, au Canada, en Australie et au Groenland.

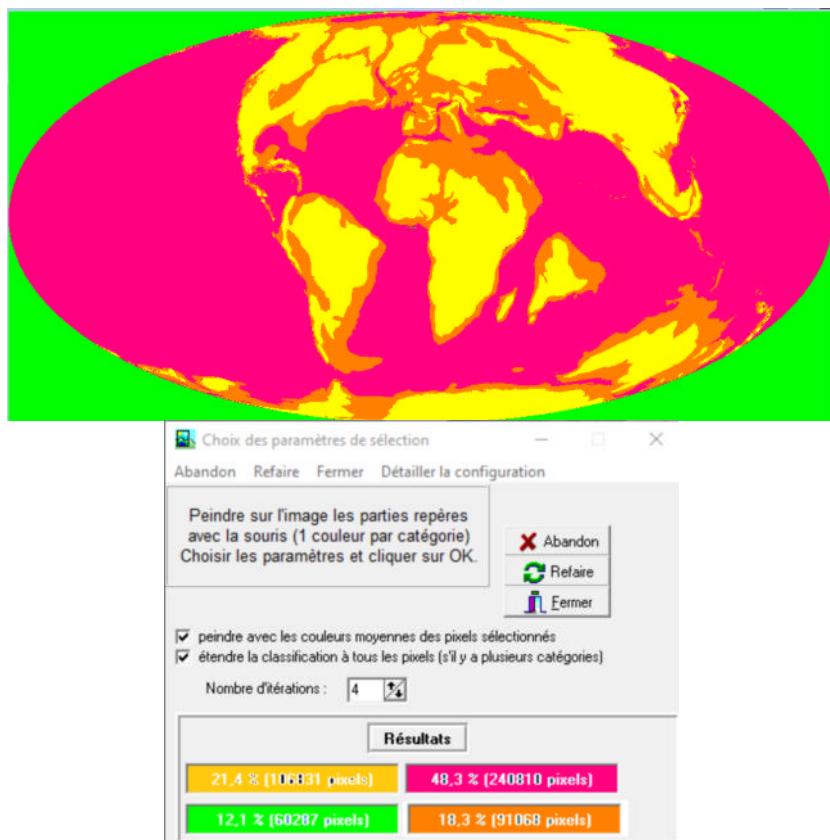
> Le **document 7** indique l'évolution des paléotempératures déterminées par le δ¹⁸O des carbonates des tests des foraminifères benthiques de l'Albien au Maastrichtien. Les mesures sont celles effectuées dans les carottages atlantiques, mais les tendances qui se dégagent se retrouvent à l'échelle du globe. On observe ainsi que la température des eaux de l'Atlantique était élevée (entre 10 et 20 °C) de l'Aptien au Santonien, avec des pics notables (+ 30 °C) entre l'Aptien et l'Albien et du Turonien au début du Campanien, puis elle a diminué.

Le Crétacé n'est donc pas une période chaude dans sa globalité : il y a eu des périodes chaudes. Il faut souligner qu'au début du Crétacé supérieur (vers 100 Ma, voir carte doc. 6 p. 323), l'Atlantique était un petit océan, profond essentiellement au niveau de l'équateur et entouré par de vastes plateformes continentales. Le brassage des eaux était forcément très limité puisqu'il n'y avait aucune communication vers les pôles (pas de courant froid). La température de ses eaux chaudes est donc liée à cet environnement et non pas à la conjugaison d'une température globale « très chaude » et d'un brassage des eaux venant aussi des hautes latitudes comme c'est le cas de nos jours dans cette région.

Unité 2

- > Cette deuxième unité est d'abord l'occasion de montrer que les indices de la présence de terres émergées récoltés dans l'unité 1 sont validés par d'autres indices géologiques qui témoignent d'un niveau marin élevé. Nous tentons ensuite de comprendre l'origine de ces transgressions.
- > Ce **document 1** traite d'un minéral très commun dans les roches d'âge crétacé : la glauconie. Ce minéral vert foncé précipite lors de la diagénèse précoce en milieu réducteur. Il est souvent associé à des pelotes fécales car les excréments sont riches en matériel argileux. La structure des grains d'argile adsorbe les ions fer et potassium provenant de l'eau de mer. C'est la décomposition de la matière organique qui induit le milieu réducteur dans la pelote alors que l'eau de mer environnante représente un milieu oxydant. La couleur verte caractéristique est due à la réduction du fer en ion ferreux Fe^{2+} . L'avancée de la mer sur un continent (transgression) est soulignée par l'extension d'eaux peu profondes, bien brassées par les vagues et donc très oxygénées, favorables à la réaction d'oxydo-réduction.
- > Les photos illustrent ce à quoi ressemble la glauconie à l'affleurement et en lame mince. Le schéma explique sa mise en place lors d'une transgression
- > Les données du **document 2** sont le support d'une **activité numérique** permettent de relier les périodes de forte occurrence de la glauconie avec les températures élevées. Les corrélations sont notables dans les périodes chaudes déjà étudiées – Éocène et Holocène – qui montrent une abondance de niveau présentant de la glauconie. Inversement ce minéral est rare lors des périodes froides comme le Pliocène et le Pléistocène. Cela permet de confirmer que les taux importants de glauconie au Crétacé sont liés à des transgressions et donc aux températures élevées.
- > Le **document 3** montre l'épaisseur de l'affleurement de craie du Cap de la Hève au Havre. On apprend que le bassin Parisien était, au Crétacé, plus au sud qu'aujourd'hui. La craie est un carbonate de calcium, une roche calcaire constituée de l'accumulation des coccolites (présentées **document 4**). Ces plaques sont fabriquées par des algues planctoniques : les cocolithophoridés. L'**objectif oral** de la page 332 permet d'évaluer la quantité de CO_2 piégé dans ces vastes et épais dépôts au Crétacé. On peut rappeler que, dans les grands fonds, la calcite est dissoute, ce qui fait que ces dépôts ne peuvent se produire que sur la plateforme continentale ou dans les bassins intracratoniques peu profonds.
- > Le **document 6** montre, grâce à trois cartes, l'évolution de la surface des plateformes continentales entre 140 et 70 Ma (en bleu ciel sur ces reconstitutions paléogéographiques). L'**activité numérique** permet de calculer cette évolution avec le logiciel Mesurim, comme montré page suivante.





> Dans le calcul à effectuer, il faut recalculer les pourcentages suite sans tenir compte des surfaces vertes de l'image. Les résultats sont ci-dessous.

Âge	140 Ma	100 Ma	70 Ma
Surface des plateformes	9,88	18,17 => 1,84 fois plus	16,08 => 0,88 fois moins

La surface des plateformes carbonatées augmente pendant le Crétacé et tend à diminuer à la fin de cette période.

> On peut également observer sur ces cartes que les reliefs asiatiques se sont considérablement érodés et que les reliefs générés par les épaulements du rift en Amérique du sud et en Afrique de l'ouest se sont aplatis.

> Le **document 5** montre les reconstitutions des paléotempératures et des variations du niveau de la mer pendant le Crétacé. Il permet de corrélérer facilement la température de l'eau et le niveau eustatique. On observe que l'effet eustatique est plus lent (décalage de 5 Ma) que la variation thermique enregistrée, mais l'évolution est identique.

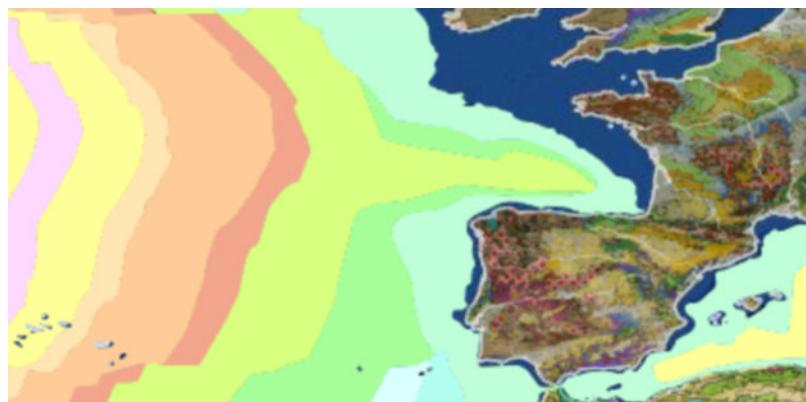
> Le **document 7** montre les résultats d'une expérience dont le protocole est disponible en téléchargement. Il montre simplement le principe de dilatation thermique de l'eau. Le volume dans la pipette graduée varie en fonction de la température de l'eau du ballon.

Unité 3

> Cette unité permet de montrer que le moteur du réchauffement dès le Crétacé moyen puis du refroidissement au Crétacé supérieur est la géodynamique interne. Nous replaçons successivement les effets de l'accrétion océanique et de la subduction. Nous étudions ensuite le rôle du volcanisme de LIPs (large Igneous Provinces). Nous confrontons les données magmatiques et isotopiques pour comprendre l'impact du magmatisme sur le climat, puis nous montrons que le moteur de l'évolution climatique est le manteau.

> Le **document 1** a été réalisé à l'aide du logiciel OneGeology, librement téléchargeable (portal.onegeology.org/OnegeologyGlobal/). Ce logiciel permet, comme cela est montré dans le document, de mesurer des distances, ici les bandes de lithosphère d'un certain âge.

> La localisation de l'exemple étudié est liée aux données modernes concernant l'expansion de l'océan Atlantique (voir par exemple le doc. 1 de l'**exercice Bac** p. 190). En effet, les nombreuses données correspondant à l'âge de la lithosphère océanique ont été extrapolées de quelques forages océaniques couplés aux bandes d'anomalies magnétiques. Je rappellerai ici que les anomalies magnétiques ne correspondent pas à des mesures faites sur des basaltes (ce serait impossible dans l'Atlantique compte-tenu de son fonctionnement par exhumation ; voir pages 158-159 du manuel de 1^e). Une grande partie des anomalies enregistrées correspond l'épaisseur de la péridotite serpentiniisée (voir les explications sur eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/terre/les-lithospheres-oceaniques/paleomagnetisme-et-accretion). Ainsi, les données sur l'ouverture de l'Atlantique Nord, notamment ce qui correspond aux côtes de métropole, semblent être de plus en plus controversées. Il faut en effet différencier le début de la fracturation (Jurassique-Crétacé inférieur) de la mise en place d'un vrai plancher océanique post-distension (Crétacé supérieur). Ceci a pour conséquence que l'étude de la vitesse de la croissance de l'Atlantique dans cette zone (voir carte ci-dessous) est sans doute faussée. De nombreux scientifiques pensent actuellement que l'accrétion proprement dite démarre au mieux au Crétacé supérieur. Donc il faut être prudent pour calculer des volumes de magma produits au niveau des côtes de l'Atlantique Nord.



> La portion choisie dans le **document 1** appartient à la zone qui s'est ouverte en premier et qui est bien documentée à cause de son intérêt économique ayant justifié la réalisation de nombreux forages. La largeur des terrains jurassiques est suffisante pour étudier la zone d'amincissement de la marge et les fonds d'âge Crétacé sont sans conteste plus importants que ceux du Paléocène. L'utilisation des données du tableau permet de faire calculer par les élèves la longueur de lithosphère produite par million d'année. Il est possible d'utiliser un tableur.

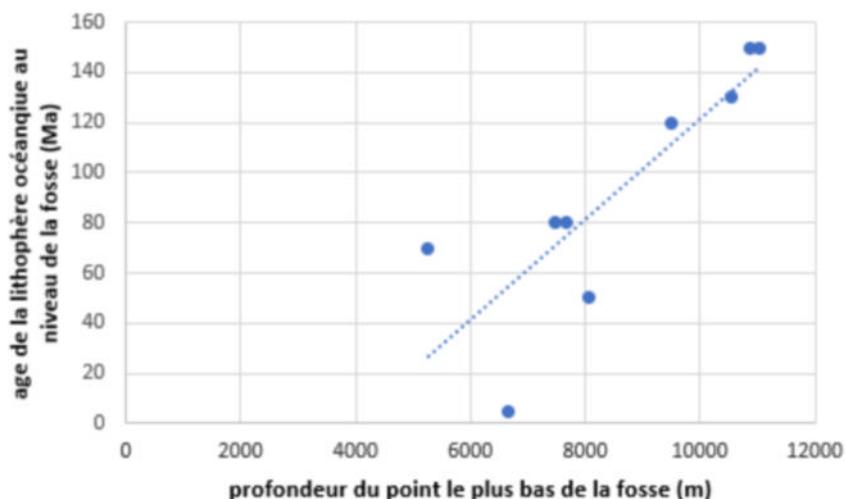
	Longueur de lithosphère produite (km)	Durée (Ma)	Longueur de lithosphère produite par Ma (km)
Pliocène quaternaire	64	5,3	12,1
Miocène	239	17,7	13,5
Oligocène	152	10,9	13,9
Éocène	358	22,1	16,2
Paléocène	142	10,0	14,2
Crétacé supérieur	708	34,5	20,5
Crétacé inférieur	721	44,5	16,2
Jurassique supérieur	248	18,5	13,4
Jurassique moyen	263	10,6	24,8

> On constate qu'au Crétacé supérieur, la production de lithosphère océanique est plus intense qu'avant ou après (sauf au Jurassique moyen, dont les données sont à prendre avec précaution). Pour comprendre les conséquences climatiques de cette production, il faut considérer différents paramètres :

- production de magma et de CO₂ (**document 4**) ;
- aspects topographiques au niveau des zones d'accrétiions et aussi de subduction (**document 2**).

> Bien que l'axe du centre d'accrétion d'une dorsale lente forme un relief négatif contrairement à celui d'une dorsale rapide (voir eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/terre/les-lithospheres-oceaniques/images/morphologie-des-do.jpg/image_viewFullscreen), la topographie générale du fond montre que, dans le cas d'une accrétion lente, la pente entre l'axe d'accrétion et un point situé à 2000 km (ce qui correspond à la côte africaine sur la carte du doc. 1) est très forte. L'espace disponible pour l'eau dans le bassin (espace d'accommodation) est ainsi plus important que dans le cas d'une dorsale à accrétion rapide où la pente est moins raide.

> En ce qui concerne l'espace d'accommodation généré au niveau des fosses, il est plus important si la lithosphère plongeante est âgée comme le montre l'activité Excel proposée. Les données du tableau permettent de construire le graphique de l'évolution l'âge de la lithosphère plongeante en fonction de la profondeur de la fosse. En faisant apparaître la droite de régression linéaire, on observe bien la corrélation.



> Le **document 3** montre qu'au cours du Crétacé, de très nombreuses provinces magmatiques ont été en éruption. L'archipel des Kerguelen est la partie émergée d'un LIP d'âge crétacé. On voit bien sur la

photo la succession des couches de lave constituant les trapps. Les volumes de laves émises sont indiqués pour chacune des provinces. Par extrapolation avec les données du Deccan, il est possible de déterminer les flux de CO₂ liés à ces LIPs au Crétacé inférieur et au Crétacé supérieur : 183,73 ×10⁶ km³ au Crétacé inférieur et 46,61 ×10⁶ km³ au Crétacé supérieur. Cela correspond à une masse de CO₂ émise de 103 501 millions de gigatonnes au Crétacé inférieur et 26 257 millions de gigatonnes au Crétacé supérieur, soit 2300 gigatonnes/an au Crétacé inférieur et 596 gigatonnes/an au Crétacé supérieur. Pour comparaison, en 2018, les activités humaines ont conduit au rejet de 37 gigatonnes dans l'atmosphère...

> Dans le **document 4** on corrèle l'évolution de $\delta^{87}\text{Sr}$ (indicateur de l'intensité de l'altération continentale) et de la concentration atmosphérique en CO₂ avec différents paramètres géodynamiques. On compare notamment l'intensité du volcanisme de subduction, d'accrétion et des LIPs :

- Au Crétacé inférieur, la production de lithosphère océanique magmatique est importante ; ensuite, il n'y a que deux petits pics au Cénomanien et au Campagnien corrélés avec une légère augmentation de la concentration en CO₂.
- La faible augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ au Crétacé supérieur peut donc mettre en évidence la présence de pièges à CO₂. On en trouve la trace dans les rapports isotopiques du strontium avec le $\delta^{87}\text{Sr}$. Ce rapport isotopique montre que, jusqu'au Turonien (90 Ma), l'altération concerne essentiellement les roches d'origines mantelliques (faible $\delta^{87}\text{Sr}$, voir doc. 5 p. 305 du chapitre 12). On peut donc envisager que le CO₂ émis par le magmatisme est absorbé par l'altération des roches magmatiques par hydrothermalisme notamment. Le rapport isotopique augmente ensuite, ce qui montre la mise en place des reliefs continentaux et leur altération.
- L'apport plus important de sédiments dans les bassins océaniques lié à l'altération des reliefs n'a pas provoqué d'augmentation du niveau marin : le doc. 5 p. 323 (unité précédente) montre que le niveau de la mer diminue à cette période. Le document suivant explique l'origine de cette variation eustatique.

> Le **document 5** permet de mettre en relation les variations eustatiques et l'activité mantellique. Un flux mantellique ascendant et chaud génère un déficit de densité sous la lithosphère, qui va entraîner une flottabilité plus importante de cette dernière. Ce phénomène est à l'origine de bombements de la lithosphère sur des distances de l'ordre du millier de kilomètre. À l'inverse, les flux descendants et froids génèrent des anomalies de densité positive qui entraînent une baisse de flottabilité de la lithosphère et induisent la mise en place de dépression de cette dernière sur de grandes distances. Ce principe est qualifié de « topographie dynamique ».

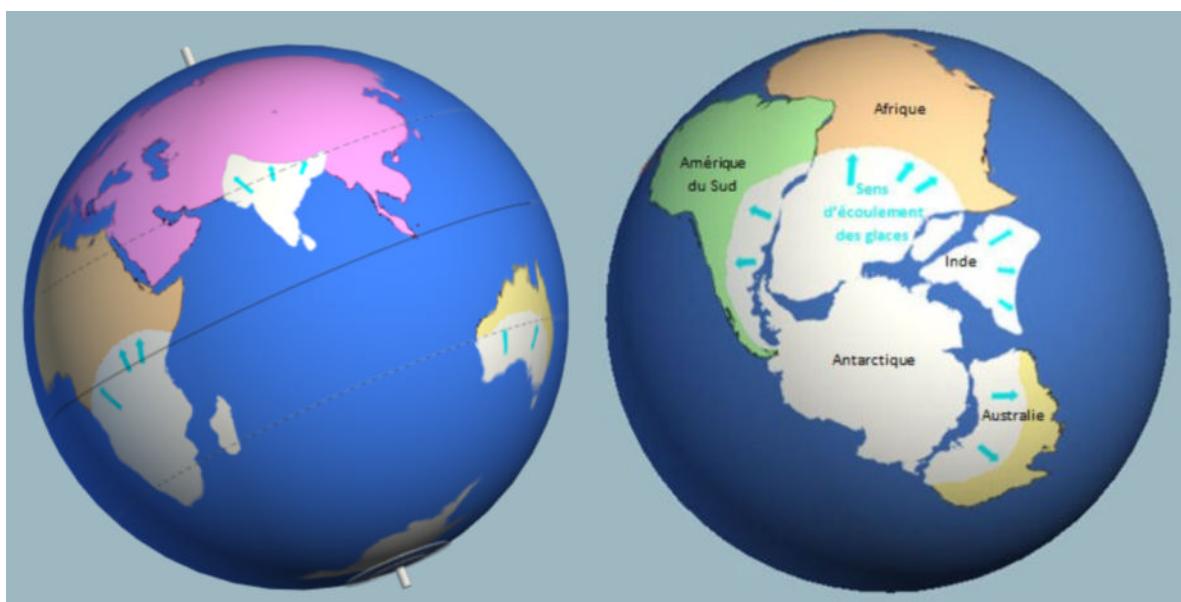
> En fonction de la localisation du flux (continent ou océan), l'effet sur le relief sera différent. Actuellement par exemple, les zones où la lithosphère est bombée sont localisées dans le cercle arctique en Scandinavie, au Groenland, aux Aléoutiennes, sur la côte ouest de l'Amérique centrale et en Asie du sud-est (voir doc. 6 p. 351 carte 1 dans le **chapitre 14**). Ces vastes portions lithosphériques sont en surélévation, alors que d'autres portions, comme le bassin méditerranéen et le nord de l'Australie s'enfoncent. Au Crétacé, il se passait la même chose. Le niveau eustatique est une notion relative déterminée par la nature des sédiments déposés à un endroit donné. Cependant, on se rend bien compte avec cette nouvelle vision de la dynamique du manteau et de la lithosphère que ce n'est pas toujours le niveau de la mer qui change : cela peut être aussi la profondeur du fond qui change (et l'on ne parle pas ici de subsidence). Le niveau de la mer est « relatif ».

> Ainsi, au début du Jurassique le fragment sud-est de la Pangée était surélevé par un flux mantellique ascendant alors que l'Eurasie et la côte Pacifique de l'Amérique du Sud étaient légèrement tractées en profondeur par les subductions finissantes. Le niveau de la mer était donc bas car de vastes zones continentales étaient surélevées et donc émergées. À 100 Ma, lorsque l'Atlantique Sud est ouvert, le flux mantellique a diminué et le dôme lithosphérique s'est affaissé au niveau de ces surfaces continentales ; le niveau relatif de la mer était donc plus élevé. On peut ainsi comprendre les vastes transgressions au Crétacé et leur impact sur le climat.

Unité 4

> Cette unité permet de montrer qu'à la fin du Paléozoïque, des glaciations ont eu lieu aux pôles tandis qu'une aridité importante sous les tropiques au Permien.

> Les données consignées dans le **document 1** rappellent par analogie avec l'actuel (voir chapitre 12 unité 2) les traces laissées par les glaciers. La carte montre que ces signatures glaciaires sont localisées sur plusieurs continents très dispersés actuellement et dont une partie est au niveau de l'équateur et des tropiques. On peut conclure qu'ils ont migré jusque-là depuis leur position au Mésozoïque et au Cénozoïque, lors de la fracturation de la Pangée. Cette dernière peut être amenée grâce à l'**activité numérique** proposée, qui permet la reconstitution du Gondwana au pôle Sud : les élèves vont enchaîner au niveau du pôle sud les différents continents concernés (voir ci-dessous).



> Le **document 2** est un schéma simple qui permet d'expliquer la mise en place des tillites et des dropstones. Cela complète les observations des paysages glaciaires du **chapitre 12**.

> Les études modernes, fondées d'une part sur l'étude des bassins sédimentaires représentés dans la reconstitution **document 3** (carte de gauche) et d'autre part sur les rapports isotopiques des conodontes et les données issues de simulations (voir le film *Le pôle sud au cours des temps géologiques*, lien dans le **manuel numérique**) montrent que le sud du Gondwana a subi plusieurs épisodes de glaciation et de déglaciation avec de véritables périodes interglaciaires. Le volume global et la surface des glaces présentés sur le **document 3** (carte de droite) est bien réduit par rapport aux reconstitutions utilisées précédemment par Wegener. On peut néanmoins conserver ces vieilles représentations pour aider les élèves à reconstituer la Pangée, en indiquant toutefois que l'on y observe l'extension des manifestations globales des glaciations et pas le périmètre de l'inlandsis.

> La glaciation (Late Paleozoic Ice Age) a commencé au Dévonien supérieur en Amérique du Sud et en Afrique du Nord. Au Dévonien supérieur, elle a migré et s'est étendue ensuite pendant tout le Carbonifère pour s'achever au Permien inférieur. La reconstitution paléogéographique proposée dans le **document 3** situe l'Europe au Permien entre l'équateur et les tropiques (point rouge).

> Au niveau de l'équateur, le climat aride lessivait par des pluies torrentielles les anciennes latérites formées précédemment. Il permettait le dépôt de formations rubéfiées caractéristiques du Permien. L'exemple proposé **document 4** se situe dans les Vosges, dans le Bassin de Saint-Dié.

> Dans le **document 5**, deux échantillons d'évaporites sont présentés. En lien avec la carte téléchargeable, on peut observer qu'au nord de l'Europe, des bassins intracontinentaux produits par la distension post-orogénique et les premières phases d'éclatement de la Pangée se mettaient en place et recueillaient les formations évaporitiques sous un climat très aride. Le sel provenait pour certains bassins de la mer qui transgressait et régressait régulièrement – les formations marines du Zechstein sont attestés par la présence de nombreux fossiles marins (cœlacanthe par exemple). Mais l'ensemble des bassins recueillait aussi les sels issus de l'altération soustractive des reliefs (voir aussi **objectif oral** p. 333).

Unité 5

> Cette dernière unité permet de montrer que la mise en place de la chaîne varisque est à l'origine des modifications climatiques de la fin du Paléozoïque. Nous évoquerons ainsi le charbon et l'altération des roches de la lithosphère continentale comme pièges à CO₂.

> La carte du **document 1** situe l'emplacement des bassins en « pull appart » qui ont fonctionné dans la période post-collisionnelle dans le cœur de la chaîne varisque (Massif central), au Carbonifère terminal et au Permien basal. On distingue bien la relation entre les failles (fracturation du socle) et la conservation de dépôts charbonneux dans des bassins houillers limniques.

> Le **document 2** montre des échantillons de ptéridophytes. Ils rappellent que le charbon se constitue à partir de matière végétale ligneuse non recyclée par les décomposeurs (qui, à cette époque, n'ont pas les enzymes pour les digérer). Cette matière organique étant synthétisée grâce à la photosynthèse et au prélèvement de CO₂, la formation de charbon est un piège à CO₂.

> Le bloc diagramme du **document 3** montre la structure et le fonctionnement d'un bassin limnique. La succession des couches – niveaux argileux et niveaux plus riches en matière organique – amène le concept de rythmicité avec des séquences dont la base est constituée un facies ravinant conglomeratique. Ce dernier montre que l'on se trouve dans une zone de forte altération de reliefs situés à proximité. La présence de cinérite indique qu'on est dans une région tectoniquement – d'un point de vue volcanique – active. Il s'agit de cinérites acides, ce qui montre une origine en partie crustale du magmatisme. Faille et magmatisme de fusion de croûte apportent des matériaux d'origine crustale à l'affleurement (voir doc. 6)

> La carte paléogéographique du **document 4** situe l'emplacement du territoire français au Carbonifère supérieur. Ce dernier est bordé par la mer au sud et selon une direction NO-SE par l'équateur et la chaîne varisque (l'expression « chaîne hercynienne » est uniquement utilisé en France). De part et d'autre de cette ceinture orogénique assez élevée, des régions verdoyantes indiquent la présence d'une végétation luxuriante. Le texte associé rappelle le contexte de mise en place de la chaîne varisque. On peut également faire référence ici aux **chapitres 5 et 7**.

> Le **document 5** est une reconstitution tridimensionnelle de l'environnement d'un bassin limnique en bordure des reliefs varisques en cours d'altération. On y distingue :

- un « pull appart » (bassin d'effondrement) ;
- un système de failles listriques à jeu normal progressif ;
- un volcanisme actif associé à des nuées ardentes susceptibles de détruire des forêts et d'en recouvrir la matière organique rapidement ;
- un environnement humide avec des marécages et de la forêt.

> L'**activité numérique** associée au document 5 est une simulation de la répartition des précipitations en automne et au printemps au Pennsylvanien grâce au **logiciel Build Your Own Earth**. Elle permet de montrer que la chaîne varisque est dans la zone de fortes pluies, à l'origine d'une forte altération de la chaîne en surrection et d'un fort piégeage du CO₂. Elle permet également de mettre en évidence les variations thermiques, les flux océaniques et les températures de surface des eaux, de les comparer à

la répartition des biomes au Carbonifère, et de réaliser ensuite le même travail au Permien pour analyser les changements induits par la mise en place de la Pangée. Il est possible de faire travailler les élèves avec des modèles plus simples de continents « monobloc » ou dispersés, et de les localiser à différentes latitude pour valider les modèles précédents.

> Le document 6 montre l'évolution des rapport isotopiques du strontium au cours du Paléozoïque. On distingue clairement la mise en place de la chaîne varisque et de ses produits crustaux exhumés et altérés ($\delta^{87}\text{Sr}$ élevé). Le maximum est atteint à la fin du Carbonifère mais cette altération est toujours importante au début du Permien. Ce document permet de rappeler la notion de piège à CO_2 et donc la diminution de la concentration en CO_2 atmosphérique induite l'altération d'une ceinture orogénique.

Corrigé des parcours « tâche complexe »

Unité 1

> Éléments de correction

- Le format attendu et la façon de répondre à la question est libre. L'élève doit bien noter les références des documents exploités dans sa réponse.
- Les indices « angiospermes aux pôles », « marécages », « delta¹⁸O bas dans les carbonates », « important stockage de matière organique » nous montrent que le climat est plus chaud.
- Mise en évidence d'un effet de serre :
 - présence de marécages de zones d'inondation climat humide, évaporation => effet de serre ;
 - présence de marécages et de dinosaures => méthane => effet de serre.
- Concentration atmosphérique en CO_2 importante => beaucoup de matière organique formée.

> Support à l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et réponse partielle à la question posée Liste de nombreux détails dont certains ne sont pas en rapport avec la question posée	Démarche pertinente Tous les indices cités sont pertinents pour reconstituer le climat La mise en relation des indices et de leur signification exploite la majorité des indices	Démarche à la fois pertinente et cohérente Tous les indices des documents et les données d'autres chapitres ou de connaissances sont cités et mis en relation afin de reconstituer le climat
Contenu	Absent	Incomplet Des connaissances manquent et/ou des informations n'ont pas été extraites des documents	Complet ou suffisant	

Communication	Non conforme	La réponse n'est pas correctement organisée mais elle est complète	La réponse est bien organisée, complète et bien indexée	La réponse est originale, complète, indexée et organisée
----------------------	--------------	--	---	--

Unité 4

> Éléments de correction

On attend ici un texte où les documents utilisés en référence sont cités :

- emplacement des continents au pôle : doc. 1 et 3 ;
- emplacement de roches montrant une forte altération équatoriale : doc. 4 ;
- emplacement de roches de climats aride au niveau des tropiques : doc. 3 ;
- localisation des continents dans la Pangée par emboîtement : activité numérique doc. 1 et carte paléogéographique doc. 3

> Support à l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et réponse partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet Des connaissances manquent et/ou des informations n'ont pas été extraites des documents		Complet ou suffisant
Communication	Non conforme	Le texte reprend une partie des éléments des documents	Le texte inclut toutes les notions présentées dans les documents en précisant les causes et les conséquences	Le texte est bien structuré, la syntaxe correcte, sans faute d'orthographe et fait explicitement référence aux documents

Unité 5

> Éléments de correction

- On attend ici un texte au format « type bac » avec introduction, parties structurées (le plan étant clairement proposé) et conclusions. Comme il s'agit d'une analyse de documents, l'élève doit s'appuyer sur ces derniers ainsi que sur les connaissances antérieures (on peut valoriser la mise en relation avec des données des unités précédentes).
- Quatre idées essentielles :
 - mise en place des gisements de charbon => piège à CO₂ => diminution de l'effet de serre (doc. 1 à 3).

- collision => altération de roches continentales=> piège à CO₂ => diminution de l'effet de serre (doc. 1, 3, 4, 5 et 6).
- formation de la Pangée => diminution des accrétions et des subduction océaniques => moins de magmatisme, baisse du niveau de la mer (cf unités précédentes) => diminution de l'effet de serre car moins de surface à évaporer (doc. 4).
- formation de la Pangée => variation des mouvements océaniques et du brassage atmosphérique => zonation latitudinale forte (doc. 4 et 5)

> Support à l'évaluation

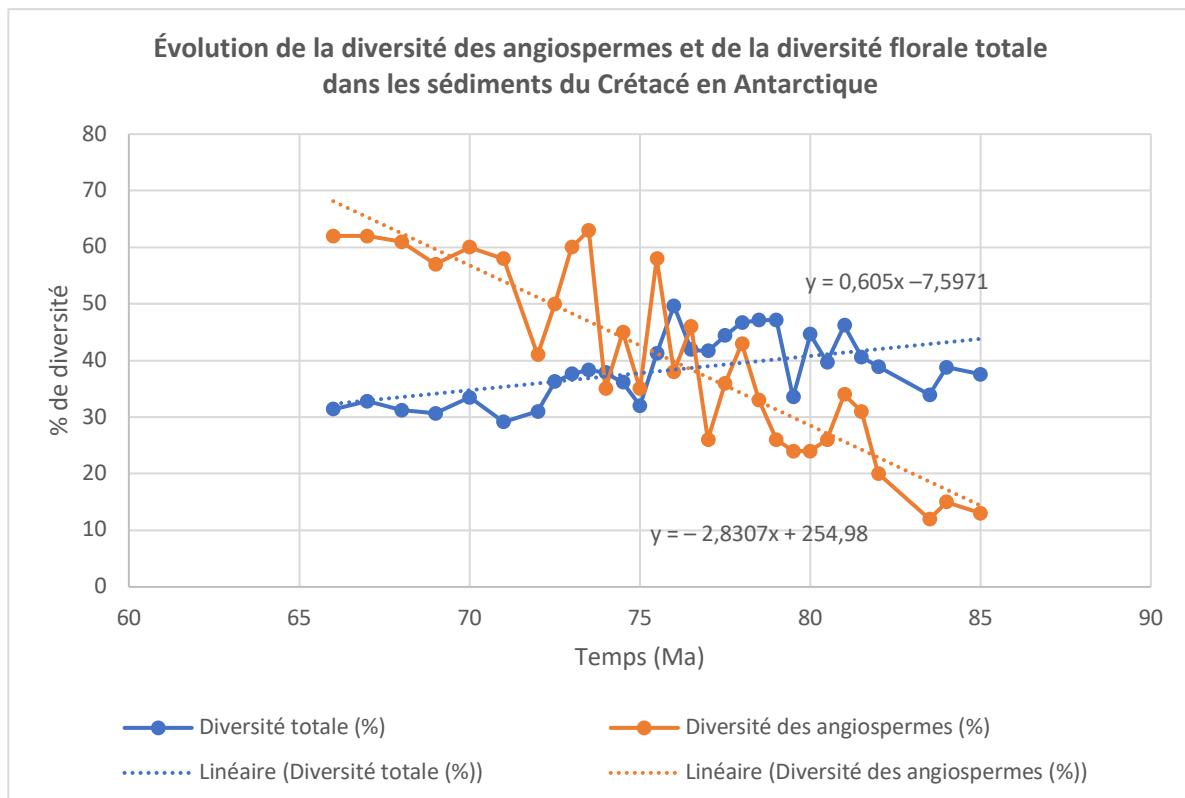
Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et réponse partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet Des connaissances manquent et/ou des informations n'ont pas été extraites des documents		Complet ou suffisant
Communication	Non conforme	Le texte reprend une partie des éléments des documents	Le texte inclut toutes les notions présentées dans les documents en précisant les causes et les conséquences	Le texte est bien structuré, la syntaxe correcte, sans faute d'orthographe et fait explicitement référence aux documents

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas »

Unité 1

Question 1

Réalisez l'activité numérique proposée afin de d'observer l'évolution de la diversité des angiospermes par rapport à la diversité totale des plantes présentes en Antarctique. Pour chaque courbe, calculez la vitesse de l'évolution.



Pendant le Crétacé, la diversité totale diminue, mais la diversité des angiosperme augmente. La vitesse de l'évolution de la diversification des angiosperme est de l'ordre de + 2,96 % par Ma, tandis que la vitesse de l'évolution de la diversification de toutes les espèces végétale est de l'ordre de - 0,6 % par Ma.

Question 2

En utilisant les indices présentés dans les doc. 1 à 3, ceux de la carte 100 Ma (doc. 6 p. 323) et vos connaissances sur la répartition de l'énergie sur le globe, reconstituez sous forme d'un schéma les biomes aux pôles et à l'équateur.

On attend ici un schéma légendé représentant à l'équateur un paysage du type de celui présenté doc. 3 et au pôle des angiospermes dans un environnement prenant en compte les caractéristiques des plantes productrices des pollens.

Question 3

À partir des informations des doc. 4 à 6, expliquez pourquoi les gisements de matière organique sont de bons indicateurs d'un climat chaud et humide.

Arguments attendus :

- Gisements de matière organique => photosynthèse importante => concentration élevée en CO₂ => effet de serre.
- Matière organique non recyclée => recouvrement par des argiles érosions => climat humide
- Matière organique non recyclée => zone anoxique dans l'eau => climat chaud.

Question 4

Rappelez comment on peut déterminer la température de l'eau grâce au δ¹⁸O.

Voir l'unité 1 du chapitre 12.

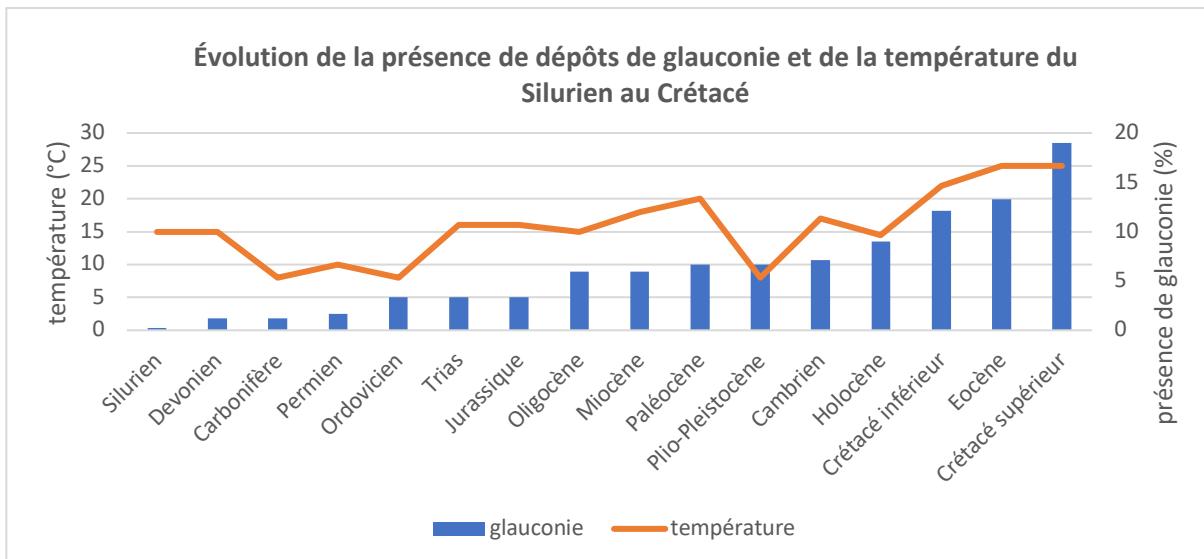
Unité 2

Question 1

Arguments attendus :

- Nombreux niveaux avec de la glauconie (signe de transgression donc montée du niveau de la mer)
- Dépôts de carbonates environnement peu profond sur de longue période de temps
- Nombreuses plateformes continentales et immersion des continents
- Paléotempératures élevées

Période géologique	Présence	% de présence	Température moyenne (°C)
Silurien	1	0,24	15
Dévonien	5	1,19	15
Carbonifère	5	1,19	8
Permien	7	1,66	10
Ordovicien	14	3,33	8
Trias	14	3,33	16
Jurassique	14	3,33	16
Oligocène	25	5,94	15
Miocène	25	5,94	18
Paléocène	28	6,65	20
Plio-Pléistocène	28	6,65	8
Cambrien	30	7,13	17
Holocène	38	9,03	14,5
Crétacé inférieur	51	12,11	22
Éocène	56	13,30	25
Crétacé supérieur	80	19,00	25
Total	421	—	—



Question 2

Grâce au logiciel Mesurim, on observe un doublement de la surface occupée par les eaux peu profondes de plateformes et de bassins intracratoniques entre 140 et 100 Ma (doc. 6) => voir données quantitatives pp. 6-7 ci-dessus. D'après le doc. 5, l'amplitude de la variation du niveau de la mer au Crétacé est de 150 m. Le maximum est atteint entre 100 et 90 Ma, puis on observe une diminution progressive, que l'on documente également grâce à l'utilisation du logiciel Mesurim sur le doc. 6 (voir p. 6-7 ci-dessus).

Question 3

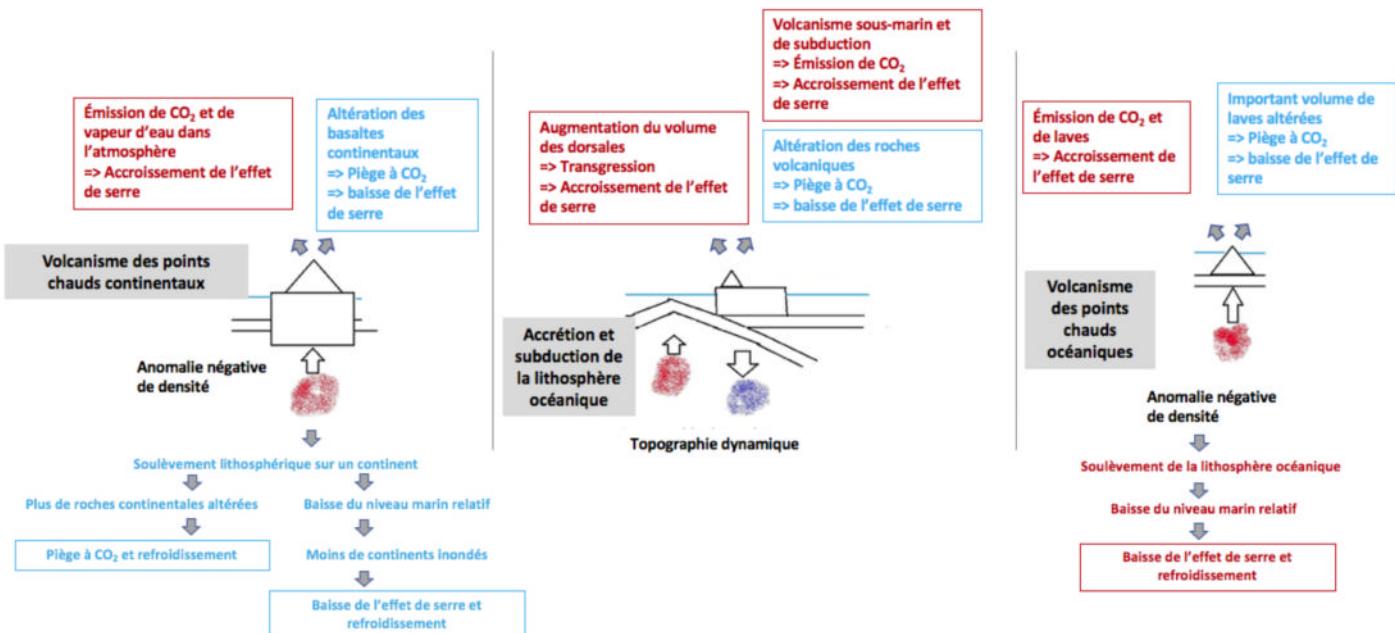
Vaste étendue d'eau chaude + marécages => effet de serre par évaporation de l'eau + émission de méthane et de protoxyde d'azote par les marécages et les herbivores.

Question 4

Le doc. 7 montre l'élévation du volume de l'eau avec la température. Si l'on compile cette information avec celle du doc. 5, cela permet d'expliquer la latence entre le réchauffement et élévation du niveau de la mer. Suite à l'augmentation de la température globale, les eaux océaniques se réchauffent, se dilatent et transgressent sur les continents. Les vastes surfaces inondées favorisent l'effet de serre qui augmente la température, d'où une rétroaction positive.

Unité 3

Question 1



Question 2

Le CO₂ émis par le magmatisme, notamment celui des dorsales océaniques, des zones de subduction et des LIP est très rapidement absorbé par l'altération des roches. Cette altération est très rapide dans les milieux aquatiques (sous l'océan). Ce n'est pas le magmatisme qui fait directement augmenter l'effet de serre au Crétacé.

Unité 4

Question 1

Expliquez comment se forment les structures présentées dans les photographies a, b et c du doc. 1. Puis expliquez, en vous aidant du doc. 2, quelles connaissances complémentaires aux éléments étudiés dans le chapitre 12 unité 2 elles apportent.

- Les stries correspondent au frottement de blocs anguleux charriés par une langue glaciaire sur la roche. Les tillites sont des coulées de boues et de matériaux glaciaires déposés dans un bassin (lac ou mer). Les dropstones sont des blocs de roches transportés par les glaces puis par les icebergs et déposés au large, dans un bassin.
- Les tillites et les dropstones montrent que l'on peut retrouver des traces glaciaires en dehors des continents et notamment dans des bassins marins.

Question 2

En réalisant l'activité numérique doc. 1, expliquez comment A. Wegener a reconstitué la forme de la Pangée, notamment au niveau du pôle Sud à la fin du Carbonifère.

Wegener a déplacé les continents pour les disposer tel un puzzle dans leur emboîtement d'origine. Il a vérifié que les dépôts issus de formations glaciaires étaient « alignés ».

Question 3

Rappelez les différentes étapes permettant d'obtenir un dépôt d'argiles rubéfiées comme celui de Saint-Dié (doc.4).

1. Mise en place d'une coulée de lave au Carbonifère.
2. Altération par l'eau, hydratation des minéraux à la fin Carbonifère.
3. Libération d'argile et d'oxyde de fer.
4. Lessivage par les pluies torrentielles au Permien.
5. Dépôts dans un environnement aride et oxydant au Permien.

Question 4

Justifiez que le climat était contrasté sur le globe à la fin du Paléozoïque

Le climat très froid aux pôles (doc. 1 à 3), chaud et humide à l'équateur (doc. 3 et 4) et aride au niveau des tropiques (doc. 3 et 5).

Unité 5

Question 1

À l'aide de vos connaissances d'enseignement scientifique, rappelez comment ce forme le charbon.

Voir le manuel d'Enseignement scientifique Belin 1^e pp.104-105.

Question 2

À l'aide de vos connaissances sur le mode de dépôt des différentes roches sédimentaires et magmatiques, expliquez la succession des roches représentées sur la coupe du doc. 3.

On observe une succession rythmique qui commence, pour les quatre séquences, par un dépôt de conglomérat. Il s'agit d'une roche produite par l'altération de reliefs et le transport des éléments issus de l'érosion par un cours d'eau qui les use et les arrondit. La présence de ces conglomérats parfois sur plusieurs niveaux superposés et sur des épaisseurs considérables (500 mètres) montre que la zone de dépôt s'enfonçait (subsidence). Ces conglomérats sont recouverts par des grès et des argiles qui montrent que le débit élevé le cours des cours d'eau a diminué et qu'ils apportaient des produits plus fins.

Les dépôts de cendre et de lave correspondent à des moments où l'activité tectonique était forte dans la région. On est bien dans un contexte de post-collision, car pour que du volcanisme apparaisse, il faut une structure divergente ou coulissante.

Les dépôts de charbon sont recouverts par les dépôts de sédiments fins qui piègent la matière organique et l'enfouissent ce qui favorise sa préservation et sa transformation en charbon.

Question 3

Dans les différents documents, recherchez les indices géologiques qui montrent que l'environnement du doc. 5 a pu induire un refroidissement du climat.

- Forte production de matière organique et piégeage de celle-ci sans décomposition => baisse de la concentration atmosphérique en CO₂ => baisse de l'effet de serre => refroidissement (doc. 1 à 5).
- Collision => relief => variation du brassage de l'atmosphère, précipitations localisées (doc. 4 et 5).
- Reliefs => exhumation de roches continentale => altération => piégeage du CO₂ => refroidissement (doc. 4 à 6).

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

- Au Jurassique, la Pangée est encore peu fragmentée : elle est continue d'un pôle à l'autre. En revanche, au Crétacé, l'Amérique du Nord et l'Eurasie ne sont respectivement plus reliées à l'Amérique du Sud et à l'Afrique. Un océan équatorial sépare ces continents et permet la communication entre le Pacifique, l'Atlantique et l'Océan indien.
- Au Jurassique, les courants de surface, dont les plus rapides sont au niveau de l'équateur, forment une boucle qui part de la côte ouest de la Pangée, traverse tout la Panthalassa, atteignent la côte est du supercontinent et rebroussent chemin en traversant à nouveau tout l'océan pour revenir au point de départ. Il y a peu de communication avec les hautes latitudes. Au Crétacé, ce courant équatorial se divise en brassant l'Atlantique et le futur océan indien. Ainsi, au Jurassique, les eaux à haute température restent très localisées à l'équateur, alors qu'au Crétacé, le brassage entre les continents libère davantage d'énergie sur les côtes et diminue la température des eaux équatoriales.
- Au niveau des continents, les températures ont une parfaite répartition latitudinale au Jurassique et les températures sont très élevées au cœur de la Pangée. Au Crétacé, les températures au niveau de l'équateur sont globalement moins élevées et réparties sur divers continents séparés. Les températures polaires sont moins froides au Jurassique qu'au Crétacé, sans doute grâce au brassage des eaux.
- La localisation des précipitations est le résultat de l'évaporation équatoriale associée au brassage de l'atmosphère conditionné par le brassage océanique. Au Jurassique, les précipitations au niveau des terres émergées sont assez faibles aux hautes latitudes et très faibles au niveau des tropiques qui ont donc un climat aride, contrairement à la zone intertropicale qui reçoit d'abondantes précipitations. Au Crétacé, à la fois l'aridité et les fortes pluviosités touchent des surfaces émergées plus vastes et sur des continents morcelés
- En agissant sur la circulation des eaux, qui redistribue la chaleur reçue du soleil, l'emplacement des continents sur le globe (notamment la présence de communications Est-Ouest ou Nord-Sud) influe sur le climat. La mise en place de ma Pangée bloque les échanges Est-Ouest et favorise une répartition très latitudinale des climats. La fragmentation de la Pangée permet un meilleur brassage et une répartition elle aussi plus fragmentée des climats et donc des biomes.

Exercice 3

On sait que les bancs carbonatés se forment lorsque le ruissellement et l'érosion continentale sont faibles. Ces conditions peuvent correspondre à une période chaude et aride. Les bancs marneux sont liés à des périodes où le ruissellement et l'érosion sont fortes. La forte altération est associée à de fortes précipitations, pouvant éventuellement correspondre à des périodes plus fraîches. Chaque banc représente donc un climat. Leur alternance témoigne d'une alternance régulière de périodes chaudes et arides puis de périodes à fortes précipitations. Les seuls mécanismes qui permettent d'expliquer cette alternance régulière sont liés aux paramètres astronomiques (variations cycliques d'excentricité, de précession et d'obliquité).

Exercice 4

- Les simulations présentées document 2 montrent que les hautes températures sont systématiquement localisées sur les continents. Si la masse continentale est en position équatoriale, les températures élevées y seront observées toute l'année.
- Quand les continents sont localisés aux moyennes latitudes, on observe un fort réchauffement au moins pendant une saison (été).
- Lorsque les continents sont en position polaire, seule la portion la plus méridionale est faiblement réchauffée. Un inlandsis peut s'installer et se maintenir sur ce continent car même pendant la saison chaude, les températures sont basses.
- Le document 1 montre qu'au Carbonifère-Permien, d'importantes masses continentales étaient localisées au pôle Sud, ce qui a pu favoriser l'installation d'inlandsis.
- Au Crétacé supérieur, les continents étaient répartis de manière assez homogène. Ceci a sans doute favorisé un climat chaud toute l'année aux basses latitudes et en été aux moyennes latitudes.
- Actuellement, la majorité des continents sont situés dans l'hémisphère Nord ce qui amplifie la saisonnalité du réchauffement de la Terre (pendant l'été dans cet hémisphère). Un continent est localisé au pôle Sud qui favorise la mise en place d'un inlandsis. La surface continentale en position équatoriale est importante, ce qui facilite le réchauffement toute l'année. Le climat actuel est donc très contrasté et sensible aux saisons.

Exercice 5

Éléments que l'on peut tirer des documents

On observe que...	On sait que...	On en déduit que...
<p>Le rapport isotopique du strontium $\delta^{87}\text{Sr}$ est :</p> <ul style="list-style-type: none"> • élevé du Cambrien à l'Ordovicien moyen ; • diminue fortement jusqu'au Silurien moyen ; • élevé au début du Dévonien ; • diminue fortement au Dévonien supérieur. 	<p>Le rapport isotopique du strontium indique la nature des roches altérées. L'altération de certains minéraux (abondants dans les roches basiques) est un piège à CO_2. Donc :</p> <ul style="list-style-type: none"> • un rapport élevé montre une forte altération des roches continentales et la mise en place de reliefs ; • un rapport faible est lié à l'altération de roches magmatiques issues du manteau donc un fort magmatisme océanique (mise en place de lithosphère océanique/LIP). 	<ul style="list-style-type: none"> • Du Cambrien à l'Ordovicien moyen, des reliefs orogéniques sont altérés, il y a un piégeage progressif du CO_2 qui conduit à un refroidissement. • À l'Ordovicien et au Silurien, il n'y a plus d'altération continentale, donc plus de piégeage du CO_2. • Au début du Dévonien, il y a mise en place de reliefs qui s'altèrent • À la fin Dévonien, le magmatisme océanique est important.
<p>La concentration atmosphérique en CO_2 :</p> <ul style="list-style-type: none"> • est basse à la fin de l'Ordovicien et augmente fortement à l'Ordovicien terminal ; • diminue à nouveau de la fin du Silurien au Dévonien moyen ; • augmente de nouveau au Dévonien supérieur. 	<p>La concentration atmosphérique en CO_2 peut être déterminée par des indices variés comme :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'indice stomatique (nombre de stomates / nombre de cellules épidermiques) qui diminue avec la concentration atmosphérique en CO_2; • le rapport isotopique du carbone dans les paléosols ou dans les carbonates, qui montre que si le turn-over de la matière organique est efficace (signe d'un climat chaud). <p>Une concentration atmosphérique en CO_2 élevée est un signe d'effet de serre et donc d'un climat chaud.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Il faisait très froid à l'Ordovicien puis le climat s'est réchauffé au début du Silurien • Pendant le Silurien et le Dévonien inférieur le fort effet de serre a diminué progressivement. • À la fin du Dévonien l'effet de serre est devenu plus élevé. <p>=> Le climat au Paléozoïque a beaucoup évolué. Du Cambrien à l'Ordovicien l'altération continentale piége le CO_2 ce qui diminue l'effet de serre et conduit à un refroidissement à l'Ordovicien. Pendant l'Ordovicien supérieur, l'activité volcanique conduit à une production de CO_2 suffisant pour conduire à la restauration d'un effet de serre élevé et donc à un réchauffement du climat au Silurien. Au début du Dévonien, la tectonique met au jour de nouveaux reliefs continentaux qui sont fortement altérés et conduisent à la diminution progressive du taux de CO_2 et donc de l'effet de serre. Ainsi, au milieu du Dévonien, le climat est à nouveau plus froid. À la fin du Dévonien le magmatisme mis en évidence par le rapport isotopique produit du CO_2 et réchauffe le climat.</p>

Exercice 6

Éléments que l'on peut tirer des documents

On observe que...	On sait que...	On en déduit que...
<p>Doc. 1 : Lors de la glaciation Sturtienne :</p> <ul style="list-style-type: none"> La géodynamique est active et elle produit énormément de roches magmatiques dont l'altération est rapide Les continents sont dispersés mais localisés majoritairement entre les tropiques. 	<ul style="list-style-type: none"> L'altération des roches magmatique d'origine mantellique absorbe de grande quantité de CO₂ Le CO₂ est un gaz à effet de serre ; moins il y a de CO₂, moins l'effet de serre est important et plus il fait froid. 	<p>La diminution de la concentration atmosphérique en CO₂ liée à l'altération des roches magmatiques provoque un refroidissement du climat.</p>
<p>Doc. 2 :</p> <ul style="list-style-type: none"> Au cours des temps géologiques, la concentration en CO₂ de l'atmosphère a diminué contrairement à la concentration en O₂ qui a augmenté. Certaines de ces variations (2,3 et 0,7 Ga) ont été synchrones. La concentration en méthane a aussi évolué. Elle a fortement augmenté de 3,8 à 2,3 Ga puis elle a baissé jusqu'à s'annuler presque totalement. On observe que la baisse de la concentration en méthane dans l'atmosphère est corrélée à une augmentation de la concentration en O₂. 	<ul style="list-style-type: none"> Le méthane est un gaz à effet de serre puissant, une augmentation de sa concentration atmosphérique induit un réchauffement du climat (<i>vu en enseignement scientifique terminale</i>). Le méthane a été produit par des microorganismes (<i>donnée de l'énoncé</i>). Le méthane provoque un effet de serre plus important que le CO₂ (<i>vu en enseignement scientifique terminale</i>). L'O₂ est apparu en milieu aquatique puis dans l'atmosphère, grâce à l'activité de bactéries photosynthétiques (<i>vu en enseignement scientifique terminale</i>). Les organismes constructeurs de formations carbonatées ou de coquilles piègent le CO₂ sous forme de calcite (<i>vu en enseignement scientifique terminale</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> Des microorganismes producteurs de méthane apparaissent vers 3,8 Ga ; l'effet de serre a peut-être augmenté (pouvoir réchauffant global du méthane supérieur à celui du CO₂). La corrélation entre la baisse de la concentration en CO₂ et l'augmentation de la concentration en méthane peut suggérer (mais pas démontrer ; <i>vu en enseignement scientifique terminale</i>) un lien de causalité. À 2,3 Ga, l'apparition de microorganismes producteurs d'O₂ dans l'océan a sans doute entraîné une forte diminution des populations de microorganismes producteurs de méthane, d'où la baisse de la concentration atmosphérique de ce gaz. La baisse de l'effet de serre qui en a résulté a sans doute contribué au refroidissement terrestre contemporains. Vers 720 Ma, une augmentation de la teneur atmosphérique en O₂ a sans doute provoqué une nouvelle baisse de l'abondance des microorganismes producteurs de méthane, à l'origine d'une baisse de la concentration de ce gaz, donc de l'effet de serre. D'où un second refroidissement à lieu et un second refroidissement à lieu.

Exercice 7

On observe que...	On sait que...
Doc. 1 Au Carbonifère, Jogging Cliff se situe au centre d'un continent unique et au sein d'une chaîne de montagnes d'orientation Est-Ouest localisée au niveau de l'équateur.	<ul style="list-style-type: none"> Le climat au niveau de l'équateur est chaud, d'autant plus qu'on se situe en plein cœur d'un continent, donc loin des flux océaniques. La présence de reliefs conduit à leur altération, ce qui piège le CO₂, et à la production de sédiments détritiques. Les reliefs peuvent bloquer le déplacement des masses nuageuses et favoriser les précipitations, d'où un développement accru des végétaux et une forte altération des roches.
Doc. 2 et 3 <ul style="list-style-type: none"> L'affleurement de Jogging Cliff contient des restes de végétaux (tronc branches, racines en place). On y observe aussi des chenaux. L'affleurement de Jogging Cliff contient également des couches de charbon. 	<ul style="list-style-type: none"> La présence d'une importante végétation souligne un climat favorable avec de l'humidité et de la chaleur. Les chenaux correspondent à des cours d'eau Le charbon est lié à un piégeage de la matière organique sans décomposition, d'où un piégeage du CO₂.
Doc. 4 Les différents organismes dont on retrouve la trace fossile appréciaient les milieux humides et chauds.	
Doc. 5 L'affleurement de Jogging Cliff correspond à une ancienne forêt côtière.	

Éléments de conclusion :

Jogging Cliff correspond à une ancienne forêt côtière du Carbonifère supérieur, située à l'équateur de la Pangée au voisinage d'une chaîne de montagnes. Le climat était chaud et humide, à l'origine d'une forte productivité primaire. Des conditions anoxiques ont préservé de la dégradation une partie de la matière organique végétale, à l'origine d'une production de charbon importante. Cette production de charbon ainsi que l'intense altération des reliefs voisins sous un climat chaud et humide a été à l'origine d'un piégeage important du dioxyde de carbone atmosphérique. Ce dernier a été à l'origine d'un refroidissement du climat au Permien.

Chapitre 14. Le changement climatique actuel : s'informer et agir

Ce chapitre clos cette vaste thématique abordée en enseignement scientifique et en enseignement de spécialité. Nous pourrons ici revenir sur des éléments rapidement évoqués en enseignement scientifique et les traiter de manière plus précise avec des élèves motivés. Dans les deux chapitres précédents nous avons étudié les paramètres naturels qui contrôlent le climat (astronomiques, géodynamiques, physiques, biologiques, ...), nous avons mis en évidence de nombreux indices qui nous permettent de cerner à présent ce qui, dans les changements globaux actuels, est lié à l'anthropisation poussée de l'environnement. En enseignement scientifique l'accent a été mis sur la complexité du système climatique (**chapitre 2**) et les méthodes de modélisation qui permettent d'envisager des scénarios climatiques du futur (**chapitre 3**). Nous allons ici évoquer la vision qu'à l'humanité de ces changements climatiques (**unité 1**) et observer ensuite les impacts sur la faune et la flore (**unité 2**), sur les agrosystèmes (**unité 3**), sur la santé et l'environnement (**unité 4**). Puis dans les deux dernières unités nous évoquerons des pistes envisagées pour diminuer la quantité de CO₂ atmosphérique (**unité 5**) ou s'adapter aux variations en cours (**unité 6**).

Thème 4. Enjeux planétaires contemporains :

Les climats de la Terre, comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain

Connaissances	Capacités, attitudes
<p>Un effort de recherche scientifique majeur est mené depuis quelques dizaines d'années pour élaborer un modèle robuste sur le changement climatique, ses causes et ses conséquences, et pour définir les actions qui peuvent être conduites pour y faire face.</p> <p>> Unité 1</p> <p>En dehors des effets abiotiques, le réchauffement climatique a des impacts importants sur la biodiversité et la santé humaine :</p> <ul style="list-style-type: none">– par des effets directs sur les populations (effectifs, état sanitaire, répartition à la surface du globe) et sur leur évolution ; > Unité 2– par des effets indirects liés aux perturbations des écosystèmes naturels et agricoles (approvisionnement et régulation). > Unité 3 <p>L'augmentation de la concentration en CO₂ favorise la production de biomasse, mais des difficultés peuvent résulter de la faible disponibilité des terres agricoles suite à la désertification ou à la montée du niveau marin, à la diffusion de pathogènes, à l'évolution de la qualité des sols et des apports en eau. > Unité 4</p>	<p>Montrer comment le travail des scientifiques permet de disposer de modèles et d'arguments qui peuvent orienter les décisions publiques.</p> <p>Prendre conscience que certains biais cognitifs doivent être surmontés (confusion entre météorologie et climatologie, mauvaise appréhension des échelles de temps, méconnaissance des données scientifiques, confusion entre corrélation et causalité).</p> <p>> Unité 1</p> <p>Réaliser et /ou analyser un suivi de long terme de la distribution spatiale des espèces face au réchauffement climatique (déplacement en altitude ou en latitude, invasions biologiques ...). > Unité 2</p> <p>Suivre et analyser l'évolution d'un service écosystémique (dépollution de l'eau et de l'air, lutte contre l'érosion, fixation de carbone, etc.).</p> <p>> Unités 3 et 4</p> <p>Concevoir et mettre en œuvre une ou plusieurs démarches de projet pour comprendre et évaluer dans sa complexité une stratégie d'atténuation ou d'adaptation en réponse aux problèmes posés par le changement climatique.</p> <p>> activités expérimentales et objectif oral</p>

<p>Aux niveaux individuel et collectif, il convient de mener des recherches et d'entreprendre des actions :</p> <ul style="list-style-type: none"> – en agissant par la réduction des émissions de gaz à effet de serre (les bénéfices et inconvénients de méthodes de stockage du carbone sont à l'étude) ; – en proposant des adaptations. > Unité 5 <p>Il existe, dans différents pays, des plans d'action bâtis sur un consensus scientifique, dont l'objectif est de renforcer l'acquisition des connaissances, ainsi que l'évaluation éclairée et modulable des stratégies mises en place. > Unité 6</p>	<p>Mobiliser les modèles de cycle du carbone pour quantifier les mesures individuelles et collectives d'atténuation nécessaires pour limiter le réchauffement climatique.</p> <p>Comparer les bénéfices/inconvénients de différentes stratégies de stockage du carbone (agriculture et sylviculture, puits miniers, etc.). > Unité 5</p> <p>Recenser, extraire et exploiter des informations sur les politiques d'adaptation (exemple du Plan National d'Action sur le Changement Climatique (PNAC)) pour identifier les mécanismes et les bénéfices de différentes méthodes (digue et naturalisation des côtes contre l'érosion, végétalisation des villes, prévention et suivi des maladies infectieuses ...).</p> <p>> Unité 6</p>
--	---

Compétences travaillées et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
Pratiquer des langages <ul style="list-style-type: none"> • Utiliser un logiciel de traitement de données. • Communiquer à l'écrit sous forme d'un texte • Communiquer à l'écrit par un schéma • Utiliser un logiciel de simulation ou les SIG 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 2 et 6 • Unité 3 et 4 • Unités 1 et 2 • Unités 5 et 6
Pratiquer des démarches scientifiques <ul style="list-style-type: none"> • Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution • Interpréter des résultats expérimentaux des données et en tirer des conclusions • Observer, expérimenter, calculer • Comprendre le lien entre un phénomène naturel et le langage mathématique 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 1 • Unité 6 • Unité 5 • Unité 3
Concevoir, créer, réaliser <ul style="list-style-type: none"> • Concevoir et mettre en œuvre un protocole 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 1
Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre <ul style="list-style-type: none"> • Identifier les techniques pour garder une trace : faire un tableau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 5
Adopter un comportement éthique et responsable <ul style="list-style-type: none"> • Identifier les impacts (bénéfices nuisances) des activités humaines sur l'environnement à différentes échelles 	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes les unités

Choix pédagogiques

Unité 1

> On attend ici que l'élève fasse un bilan de ce qu'il a acquis dans les deux chapitres précédents et dans la partie climat du programme d'enseignement scientifique pour comprendre à l'aide des documents proposés pourquoi il est important d'avoir étudié toutes ces notions. Cette unité synthétise les démarches scientifiques et politiques successives et place les différents partenaires impliqués dans l'évolution des connaissances sur la modification anthropique du climat. Cette unité montre aussi que la perception individuelle est très variable et qu'elle doit être adaptée à la population concernée si on souhaite que le message passe efficacement.

> La frise chronologique du **document 1** permet de résituer des étapes clefs dans l'évolution de la prise de conscience de la notion de climat et surtout de son dérèglement. Jusque dans les années 1940, la communauté pensait que la Terre était capable de retrouver facilement son état initial et qu'elle s'autorégulait notamment en absorbant le CO₂ supplémentaire au niveau de la biomasse et des océans. C'est avec le développement des ordinateurs, des satellites et des outils de mesures plus précis que la notion de climat est devenue un élément global où interviennent à la fois l'hydrosphère, la pédosphère, l'atmosphère et l'anthroposphère. Au début, seuls quelques spécialistes disciplinaires avaient conscience du changement climatique global puis vers 1967 toute la communauté scientifique s'est emparée de ce constat. Au niveau politique, des commissions ont été créées afin d'informer les décideurs. Les principaux rapports du GIEC sont téléchargeables :

<https://reporterre.net/Le-Giec-a-trente-ans-son-histoire-son-role-et-un-climat-toujours-plus-chaud>,

des données complémentaires qui racontent les 30 ans du GIEC sont disponibles :

<https://reporterre.net/Le-Giec-a-trente-ans-son-histoire-son-role-et-un-climat-toujours-plus-chaud>. Le schéma des étapes de la conception d'un rapport est développé dans le manuel d'enseignement scientifique (doc 5 p. 69).

> La sensibilisation individuelle de chacun face à la perception des perturbations climatiques est très variée. Le **document 2** montre que les citadins des métropoles ne perçoivent pas les variations climatiques comme les individus qui voyagent beaucoup ou qui vivent :

- au contact de la nature ;
- dans des endroits où le climat est variable ;
- dans des endroits où les changements climatiques ont déjà des effets notables.

Ce document doit faire prendre conscience aux élèves qu'on n'a pas tous la même façon de comprendre les choses et que cela peut, d'une part induire une survie différentielle aux modifications climatiques, mais aussi induire des désaccords dans la prise de décisions individuelles ou collectives. Il pourra être utilisé dans la tâche complexe. Ce document met aussi en évidence les deux biais que les plus vulnérables rencontrent : les notions d'espace et de temps traités dans le **document 3**.

Pour des données complémentaires : Lammel A., Dugas E. et Guillen Gutierrez E., 2012 « L'apport de la psychologie cognitive à l'étude de l'adaptation aux changements climatiques : la notion de vulnérabilité cognitive », <https://journals.openedition.org/vertigo/11915>

> Le **document 3** montre qu'à toutes les échelles de temps il peut exister un phénomène susceptible de modifier le climat. Sa fréquence d'apparition est variable et dans un contexte sans effet anthropique son impact sur le climat sera plus fort si sa fréquence est faible. Cependant, à partir du moment où on agit sur les éléments que l'Homme peut modifier (chimie atmosphérique, atmosphère, surface de l'océan, cycle géologique du carbone, calotte de glace, ...), on va agir sur des phénomènes qui peuvent avoir des impacts sur des durées très longues car ce sont des éléments très structurants pour le climat.

Unité 2

- > On cherche ici à montrer que les organismes et les écosystèmes sont en train d'évoluer pour survivre. On peut faire allusion aux acquis sur les mécanismes de l'évolution et la sélection naturelle évoqués en seconde. Les organismes disposent de plusieurs stratégies : ils doivent évoluer génétiquement, supporter des variations c'est-à-dire être plastiques et adaptables à court terme, ils peuvent migrer, les communautés peuvent se réorganiser et à terme l'espèce ou l'écosystème peut aussi s'éteindre.
- > Le **document 1** montre deux exemples, l'un chez un vertébré et l'autre chez un invertébré, d'une plasticité des organismes. Le premier correspond à la date de ponte des mésanges qui doit s'adapter à la date de concentration en chenille maximale, elle-même liée au développement de la végétation. La végétation étant de plus en plus en avance à cause de températures estivales au printemps, la chenille prolifère de plus en plus tôt, la mésange doit pondre avant sa date habituelle. L'étude de la phénologie peut être faite à partir d'autres exemples sur le site « observatoire des saisons » (<https://www.obs-saisons.fr/>) qui offre des données sur une vaste gamme d'espèces sur différents critères phénologiques, sur plusieurs années et sur toute la métropole.
- > Le **document 2** montre que la répartition des libellules en Europe change. Cette répartition différentielle des libellules est liée à leur physiologie, car en tant qu'ectotherme la température de l'organisme dépend directement de l'insolation. On peut faire le parallèle avec l'albedo pour faciliter la compréhension de ce phénomène. Ainsi les espèces claires colonisent de plus en plus l'Europe du Nord et les libellules de couleurs foncées se réfugient dans des îlots de la façade Atlantique (humidité importante des façades maritimes qui favorise une couverture nuageuse) et au niveau des reliefs qui restent froids.
- > Le **document 3** montre que les lézards grandissent plus vite et se reproduisent davantage quand la température est plus élevée mais ils meurent plus jeunes. On observe en revanche que l'impact majeur concerne la dégradation de leur microbiote dont la diversité diminue avec la hausse de la température : c'est peut-être une des raisons de la diminution de l'espérance de vie.
- > Les **documents 4 et 5** montrent comment les organismes marins (**doc 4**) et continentaux (**doc 5**) réagissent face à la nécessité de migrer vers des environnements favorables où ils pourront s'installer.
- > Le **document 4** montre que certaines espèces migrent vers des eaux plus chaudes mais que globalement toutes migrent vers des eaux plus froides. On peut relier la migration des algues planctoniques vers des eaux plus froides en relation avec une plus importante solubilité du CO₂ dans les eaux fraîches et la disponibilité de ce gaz pour la photosynthèse. Ce document montre que toutes les espèces n'ont pas la même capacité à se déplacer. Les espèces benthiques (algues, cnidaires fixés, mollusques, crustacés et échinodermes) se déplacent car, bien que fixées, elles possèdent toutes des larves ou des gamètes capables de nager et donc de se disperser. Cette dispersion est progressive car les larves, une fois métamorphosées en adultes, sont dépendantes pour leur survie des conditions dans lesquelles elles se sont déposées. Les larves de poissons pélagiques et le zooplancton se déplacent lentement malgré un mode de transport identique à celui du phytoplancton et une migration plus rapide des adultes.
- > En ce qui concerne les espèces continentales, on observe dans le **document 5** que la capacité de déplacement est plus faible pour les espèces inféodées à un substrat (angiospermes, mollusques). Certains mammifères sont capables de se déplacer très vite et d'autres beaucoup moins. On peut relier cela à la nature, à la spécificité (ex : type de forêt pour les primates) et à la surface (ex : quelques arbres pour l'écureuil) de leur habitat.

> Dans ce second graphique on compare ces vitesses de déplacement à la vitesse de transformation des habitats en fonction du climat selon les scénarios RCP. On constate qu'il existe des différences nettes de la vitesse de transformation pour des terrains plats par rapport aux autres terrains et que les effets des scénarios 6 et 8.5 progressent très vite dans les plaines.

Actuellement la végétation souffre beaucoup car nous sommes en train d'atteindre un niveau de réchauffement proche du RCP4.5 et on voit que le changement qu'il produit est plus rapide que le déplacement de la végétation. On peut faire remarquer aux élèves que bien que nous appartenions au groupe des primates, les réfugiés climatiques se déplacent beaucoup plus vite, ce qui est un avantage pour les humains sur la faune et la flore qu'ils détruisent.

Unité 3

> On cherche ici à voir les effets des variations climatiques sur l'évolution des agrosystèmes en France et dans les grandes plaines agricoles d'Amérique du Nord.

> Le **document 1** montre des images que nous voyons tous les ans aux actualités depuis plusieurs années. Il est possible ici de faire référence aux chapitres sur les agrosystèmes et écosystèmes des programmes de seconde et de première. La première photographie montre les effets des pluies torrentielles ravageant les cultures après des mois de sécheresse au moment de la germination des graines. Sur la seconde image, on voit les pâturages déjà secs en début d'été obligeant les exploitants agricoles à puiser dans leurs réserves de pailles d'hiver. On peut faire réfléchir les élèves à l'alimentation des animaux producteurs de méthane (manuel d'enseignement scientifique doc 2 unité 4 chapitre 3) qu'il faut nourrir avec des végétaux qui poussent difficilement avec le changement climatique. La troisième photo traite des effets de la canicule sur les cultures qui subissent un stress hydrique ; le manque d'eau oblige les exploitants agricoles à puiser dans l'eau des nappes phréatiques. Il est important ici de faire remarquer aux élèves que la production de végétaux nécessitant un fort apport d'eau est à mettre en relation avec les besoins de chaque plante et la disponibilité en eau de la région (revoir aussi les restrictions estivales de l'utilisation de l'eau). Agrandir toujours les parcelles pour faciliter le passage des machines, défricher les haies pour gagner quelques centimètres, labourer profondément la terre (ce qui en croisant avec les données de l'enseignement scientifique – doc 2 unité 4 chapitre 3 – favorise le rejet de GES), met à nu le sol et détruit les éléments qui maintiennent ses capacités à faire croître des végétaux (ces notions seront exploitées dans la dernière unité).

> Le **document 2** montre qu'il est nécessaire d'adopter une politique locale car toutes les régions ne souffrent pas de la même façon. Il faut faire évoluer les pratiques culturelles et abandonner celles qui ne peuvent plus fonctionner.

> Le **document 3** permet de mettre en relation la baisse des rendements en Amérique du Nord avec des événements climatiques.

> Le **document 4** montre la couche de sel qui percole dans le sol. Rappelons que ce n'est pas toujours de l'halite mais que tous les sels minéraux sont concernés. Les prélèvements trop importants dans la nappe d'eau douce en bord de mer entraînent la pénétration d'eaux salées dans la nappe sous les continents ; elle est à son tour pompée. Ceci a pour conséquence de prélever une eau impropre à la consommation, d'arroser les champs avec de l'eau salée et de détruire définitivement le puits. On peut rappeler que les douches de plages sont de plus en plus interdites pour ces raisons.

> L'exemple de la baisse du rendement et de l'épiaison du riz par rapport à la salinité de l'eau est développé dans le **document 5**. Ce document rappelle la quantité de surfaces cultivées perdue chaque année à cause de la salinisation de sols cultivés.

> Le **document 6** est un document du GIEC qui montre que la désertification des champs est liée à l'aridité croissante en zone aride et à la diminution de l'extension des zones humides dans les terres. On peut faire référence à la mer d'Aral qui a disparu car l'eau des fleuves qui s'y jetaient et leurs nappes a été utilisée pour arroser les cultures dans cette région aride. L'impact sur les terres est important mais il faut le relier à la population directement touchée par cette désertification.

> Le dernier document de l'unité (**doc 7**) est un graphique du GIEC qui montre l'effet du réchauffement sur les rendements : on constate qu'il diminue de manière assez proportionnelle à l'augmentation de la température. Outre les informations qu'il contient il est important d'apprendre à le lire car c'est sous cette forme que la communication des données se fait dans les nouveaux rapports du GIEC. Ce type de schéma sera utilisé dans plusieurs autres exemples (dans ce manuel p. 362 et dans le manuel d'enseignement scientifique pp. 75, 80 et 81).

Unité 4

> On cherche à étudier ici différents aspects du changement climatique sur les humains.

> Dans le **document 1** on évalue les effets de l'accroissement de la température sur les humains à partir d'un exemple local d'alertes « canicule ». Au cours de l'été 2019 des records de températures ont été dépassés dans plusieurs villes de France. Il est possible en utilisant le site de météo France de voir évoluer ces alertes avec les années (<http://www.meteofrance.fr/actualites/81693721-climat-debut-d-annee-le-plus-chaud-jamais-mesure-en-france>).

On peut aussi accéder sur ce site aux symptômes possibles induits par les canicules et les conseils de comportement à adopter (https://vigilance.meteofrance.com/guide/cc_chaud_or.html).

> Le diagramme du **document 2** montre les différents aspects de la vulnérabilité à la chaleur et comment les facteurs individuels et sociaux influencent les effets de la température sur un individu. On peut rappeler ici ce qui a été étudié en enseignement scientifique de première sur le bilan thermique du corps et placer cette fois l'individu dans des conditions de canicule sèche et de forte chaleur humide. Ces conditions vont concerner de nombreux pays à travers le globe (voir p. 364 en Inde). On constate l'impossibilité pour les individus de transpirer, ce qui entraîne des dérèglements physiologiques sévères et mortels.

> Les **documents 3 et 4** traitent d'une maladie parasitaire liée à l'eau. Cet exemple peu médiatisé en France est pourtant très grave et peut toucher de nombreux touristes non avertis des risques de baignades dans des endroits contaminés. Le schistosome pénètre la peau et s'installe dans les vaisseaux sanguins en dévorant les globules rouges et provoquant de nombreux décès chaque année. Le **document 4** montre que l'élévation de la température accroît les risques de contamination. L'impact de la chaleur et de l'humidité sur la prolifération des vecteurs comme les moustiques permet de faire référence aux acquis de seconde.

> Le **document 5** montre un exemple de région où l'accroissement du niveau de la mer (dont les causes ont été précédemment évoquées dans le **chapitre 13**) présente un impact notable sur la diminution des surfaces habitables. En fonction de la topographie des régions (ex : Pays Bas pp. 356, 364 et 365) et de la densité de population, ces effets peuvent être importants. Dans les exercices, l'érosion du

littoral est traitée (**exercice 5 p. 365**) à partir d'un exemple dans les DROM qui montre l'importance de préserver les mangroves pour préserver les terres. Les mangroves deviennent des sites protégés afin de limiter leur déclin dont les conséquences sur les îles tropicales peuvent être catastrophiques. L'érosion littorale est également traitée à partir d'un exemple en métropole (**exercice 4 p. 364**) ; il montre le rôle de l'endigage et l'évolution de l'ensablement des plages. L'endigage systématique des côtes n'est pas forcément la meilleure solution pour limiter l'érosion littorale. En effet, dans l'exemple choisi la mise en place de digues parallèles à la côte a eu l'effet inverse et a modifié la qualité sanitaire de l'eau et les écosystèmes littoraux.

> Le **document 6** permet de synthétiser les effets conjugués de la vitesse de remontée du niveau de la mer et des mouvements verticaux liés à la topographie dynamique du manteau (voir **chapitre 13**). Ces deux paramètres ne sont pas homogènes à la surface du globe et il est nécessaire de compiler leurs effets respectifs pour avoir une carte des zones à risque d'inondation et pour estimer la vitesse à laquelle cette inondation a potentiellement lieu. Ainsi on voit que le problème est complexe et qu'il est nécessaire de pouvoir compiler tous les arguments (géologiques et océaniques) pour justifier auprès des sceptiques les dangers régionaux potentiels. Vous pouvez constater que la bordure nord et ouest de l'Amérique du Nord ne va pas être inondée dans un futur proche contrairement à l'est du bassin méditerranéen et au sud-est asiatique. En ce qui concerne les îles le constat est très variable d'un secteur à l'autre : l'Ile de la Réunion est plus à risque que les îles des Antilles et de la Polynésie.

> **Activité complémentaire** pouvant aider à la réalisation du projet pour le Grand oral.

Le logiciel Disaster-alert (https://disasteralert.pdc.org/disasteralert/?hazard_id=76347) très simple d'utilisation peut vous alerter en temps réel sur les événements majeurs en cours. Son utilisation permet aux élèves de redéfinir la notion de cause et de conséquence, de s'entraîner à discerner ce qui relève de la météo et du climat et de donner une dimension spatiale à un événement. Par exemple ci-dessous on observe la répartition de quelques « désastres » le 30 avril 2020 : une situation de sécheresse à Madagascar, des températures extrêmes au Mexique et des inondations au Kenya. Son utilisation sur une longue période de temps peut être intéressante pour rechercher, par rapport aux zones de forte densité de population, où vont se localiser principalement les régions les plus sévèrement touchées par les perturbations climatiques.

Des consignes de prise en main, le tutoriel et des exemples d'activités et d'utilisation des données sont accessibles sur <http://eduterre.ens-lyon.fr/formations/visualiseurs-en-ligne-1/disaster-alert/prise-en-main-du-logiciel>.



Unité 5

> Dans cette double page on traite des moyens de diminuer les rejets de GES et de piéger les GES.

> On part d'un exemple (**document 1**) qui fait référence au programme d'enseignement scientifique sur l'énergie : en étudiant le cas concret de l'île de la Réunion on observe comment des moyens permettent de diminuer fortement les émissions de GES. Du fait de leur caractère insulaire, les DROM (Départements et Régions d'Outre-Mer) doivent atteindre une autonomie énergétique totale sans combustible fossile en 2030. C'est un programme très ambitieux, car les habitants ont besoin de leur voiture pour se déplacer. De nombreuses avancées ont été faites pour la production électrique : en 2019 36 % de l'énergie produite sur l'île était renouvelable. Des innovations sont testées : (1) l'utilisation de la bagasse de canne à sucre pour faire de l'électricité est en cours de développement dans deux usines de l'île ; (2) le SWAC est en projet pour climatiser le centre hospitalier. D'autres projets comme l'ETM, un système d'échange thermique entre les eaux de surface et les eaux profondes est en cours d'étude. Le gradient thermique naturel de la mer permet de faire tourner des turbines mais ce système ne pourra être utilisé que dans les eaux présentant un gradient thermique élevé comme c'est le cas de nombreux DROM.

> Le **document 2** permet de faire prendre conscience aux élèves que les énergies renouvelables notamment le solaire ou l'éolien ont un inconvénient majeur lié au stockage de l'énergie qu'elles produisent. Les élèves peuvent s'être déjà interrogés sur le fait que les éoliennes ne tournent pas alors qu'il y a du vent. A l'aide de ce document on peut appréhender une solution pour profiter de l'énergie excédentaire produite par les sources d'énergie renouvelable pour produire de l'énergie verte pour nos besoins quotidiens. L'énergie électrique est utilisée pour l'électrolyse de l'eau afin de fournir de l'hydrogène utilisé ensuite pour la catalyse du méthane à partir du CO₂ produit par la méthanisation des déchets des agrosystèmes. L'énergie électrique est aussi utilisée dans tout le process de production et de stockage.

> Le CO₂ peut être stocké sous terre, comme le montre le **document 3**, dans des cavités salines (poche ou couche géologique ayant contenu du sel) ou dans d'anciens réservoirs d'hydrocarbure et de charbon.

> Le **document 4**, qui est un profil sismique facilement interprétable avant et après le remplissage de la cavité, montre que des conditions de sécurité doivent être respectées car l'imperméabilité du toit du réservoir doit être sûre et pérenne. En effet, des fuites de CO₂ pourraient être à la fois dangereuses et contre-productives pour le forçage climatique.

> Le **document 5** est une lame mince d'une roche réservoir testée par les géologues à l'aide d'un colorant (orange) qui va mettre en évidence la perméabilité et la porosité de la roche.

> Dans le **document 6** un géologue spécialiste des forages et des réservoirs est interviewé. Des explications sur les principes et les difficultés pour le stockage souterrain du CO₂ sont évoquées. Le CO₂, bien qu'il soit un GES, a des caractéristiques très différentes du méthane, notamment par son pouvoir érosif sur la roche. Ces caractéristiques nécessitent de prendre des précautions particulières lors de l'injection dans le sous-sol. Il est donc indispensable qu'une étude précise des roches (qualité, nature, état de fracturation, porosité) soit faite en amont. Des simulations du comportement de la roche réservoir sont réalisées notamment pour les injections de CO₂ dans des strates sédimentaires.

> Il faut faire réfléchir les élèves sur la notion de strate : par exemple, on ne peut pas injecter du CO₂ n'importe où dans un système comme celui du bassin parisien d'une part parce que le CO₂ est susceptible de dissoudre les roches et atteindre les aquifères où l'eau est pompée, mais aussi car la configuration du bassin implique que le CO₂ peut sortir sur les bords au niveau des zones d'affleurements des strates.

La coupe géologique du Bassin parisien ainsi que de nombreuses données utiles sont disponibles sur le site de l'AGBP <http://www.agbp.fr/blog/2015/03/coupe-du-bassin-parisien#.XqqfRagzaUk>.

> L'activité numérique sur le stockage du CO₂ en Alaska proposée p. 357 permet de mettre l'élève à tous les postes de la chaîne de décision : du géologue qui doit chercher un endroit propice pour le stockage, au responsable de l'exploitation et aux responsables environnementaux. La particularité du stockage en Alaska est qu'il se fait sous forme de clathrates dont le méthane a été prélevé et au sein duquel on injecte le CO₂. Des données complémentaires sur ce type de gisement sont disponibles : <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/energie/le-methane>.

> En bilan de cette unité il faut montrer aux élèves que des tas d'idées germent pour soit piéger le CO₂ soit éviter d'en produire mais qu'il n'y a pas encore de solution miracle et que la multiplication de petites actions ponctuelles est probablement la solution.

Unité 6

> Dans cette unité on va évoquer des situations adaptées à des environnements localisés pour faire comprendre aux élèves la nécessité d'une action locale pour régler un problème précis. Cette dimension n'est pas encore suffisamment perçue par les politiques et la dimension globale, bien que fondamentale, ne permet pas une adaptation précise aux besoins, aux efforts à engager par chaque individu. Les exemples choisis correspondent à des régions différentes de métropole et d'outre-mer afin de montrer comment à l'échelle locale la société doit résoudre ses propres problèmes avec ses propres solutions.

- > Les 3 premiers documents traitent des îlots de chaleur urbains. Ce sont des élévations localisées des températures, particulièrement des températures maximales diurnes et nocturnes, enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales ou forestières voisines ou par rapport aux températures moyennes régionales. Ces documents traitent d'un problème à l'échelle d'un pâté de maison, d'un quartier, d'une métropole. Cette dimension, globalement petite, correspond à un environnement proche des élèves et conceptualisable. Cette partie de l'unité explique comment on peut limiter les îlots de chaleurs dans les villes par des modifications architecturales, des modifications d'utilisation des matériaux et de la gestion des espaces verts, notamment pour limiter la sévérité des effets des canicules.
- > Sur le **document 1**, dont la carte est téléchargeable et exploitable avec Google Earth dans l'activité du **doc 2**, on distingue parfaitement les voies de chemin de fer où le ballast accumule la chaleur. On distingue également facilement les grands parkings ou les zones où la densité d'habitation est très forte.
- > A l'échelle d'un pâté de maison (**document 2**) on peut utiliser pour la ville de Paris le logiciel Cartoviz. Il permet d'accéder à de nombreuses données permettant de comparer l'origine des îlots de chaleurs urbains. Une activité numérique utilisant Cartoviz est proposée en complément.
- > Le **document 3** montre (sur le principe de l'albedo) le comportement des surfaces vis-à-vis de l'emmagasinement ou de la réémission de la chaleur. On constate que les zones végétalisées sont des puits de fraîcheur dans les villes.
- > Il est donc nécessaire de réinventer les villes afin de diminuer les îlots de chaleur, en trouvant des solutions pour végétaliser (planter des arbres en terre), permettre l'infiltration de l'eau dans le sol (recouvrir les routes et les trottoirs de pavés non cimentés) et limiter l'évaporation (éviter les pelouses tondues à ras). Quand il est impossible de remplacer les routes goudronnées, on peut utiliser la chaleur de ces surfaces pour faire chauffer de l'eau ou de l'air et réintroduire cette énergie calorifique dans le circuit d'énergie électrique.
- > Les **documents 4 à 6** exploitent un exemple d'adaptation de prix à St Pierre et Miquelon (DROM) où la pêche est le moteur de l'économie. Très perturbés par les accords internationaux sur les droits de pêche avec les pays limitrophes, les marchés sont fortement influencés par le changement climatique et le prix de vente des produits de la pêche fluctuent beaucoup.
- > Le **document 4** montre le taux de réchauffement de l'Atlantique dans ces régions.
- > Le **document 5** montre les changements phénologiques de plusieurs espèces. Il faut souligner que c'est l'ensemble de la chaîne alimentaire qui est touchée. On observe des décalages phénologiques d'intensité et de sens très différents et il faut faire une analyse précise de ces changements au cas par cas pour en comprendre les effets et les anticiper.
- > Le **document 6** montre comment les pécheurs, en adaptant leurs pratiques aux résultats des études phénologiques, ont réussi à maintenir un rendement et des prix de vente satisfaisants.

Activités expérimentales

1. Les pays bas face à la monté des océans

> Cette activité propose un exemple concret d'une région européenne qui vit naturellement sous le niveau de la mer et qui a construit des digues. Les évènements futurs ont déjà été en partie anticipés par le relogement de certains habitants. Il est possible d'évaluer la montée du niveau marin en utilisant les données du **document 4** – la mer du Nord s'élève de 5 mm par an – et de définir à l'aide du profil de dénivelé la quantité de personnes à déplacer et les moyens de protection à envisager.

> L'activité numérique permet de choisir d'autres exemples et de travailler avec Google Earth n'importe où sur la planète.

> Un corrigé est proposé dans les activités Pas à pas de l'unité 4.

2. Extraction et stockage des gaz en Alaska

> À Prudhoe Bay, des études ont été menées suite à l'extraction du pétrole et des gaz (notamment le méthane) piégés dans les clathrates afin de stocker le CO₂ atmosphérique ou produit par les activités anthropiques.

> L'activité proposée ici permet de simuler les différentes étapes entre la découverte d'un site de stockage et son exploitation.

> Un corrigé est proposé dans les activités Pas à pas de l'unité 5.

Objectif Oral

Reboiser le Brésil

> Cette proposition de parcours correspond au stockage du CO₂ sous forme de matière végétale et sa non-émission par les sols dégradés. Le GIEC et toutes instances gouvernementales pour la préservation du climat prônent le reboisement et l'arrêt du défrichage. Dans cet optique les pays en voie de développement peuvent gagner des « points carbones » en adoptant une politique de reforestation. Le Brésil a été un des premiers pays à mettre en place une REDD+ dans le cadre d'un projet sur la préservation de la forêt amazonienne. L'application d'une REDD+ passe par l'évaluation initiale de la vitesse de déboisement des 10 dernières années qui va fixer le premier palier sous lequel il va falloir passer en diminuant le taux de carbone produit notamment par le défrichement. Au cours du temps le reboisement se poursuit et les objectifs à atteindre augmentent aussi progressivement en parallèle de la reforestation. Le suivi est fait par télédétection, ce qui permet une étude objective de l'évolution du programme.

> L'activité proposée avec le SIG Openforis (téléchargeable) permet d'étudier avec Google Earth l'évolution au cours du temps de parcelles engagées dans une REDD+. De nombreux sites sont téléchargeables et avec l'utilisation des images satellites antérieures, il est possible de voir l'évolution temporelle de la reforestation.

Corrigé des parcours « tâche complexe »

Unité 1

> La forme attendue est un diaporama illustré dans lequel la rédaction et l'iconographie sont de qualité. Votre maîtrise de l'outil informatique doit être mise en évidence par votre utilisation du tableur et des logiciels de présentation (diaporama).

> On attend aussi que les questions traitant des différents thèmes soient abordées : la frise, le GIEC et les interrelations entre ses différents acteurs (**doc 1**), la perception individuelle du changement climatique (**doc 2**) à l'échelle du globe et du temps (**doc 3**).

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Se contente d'exploiter le doc. 2	Démarche pertinente _ Une répartition des tâches est correctement effectuée _ Une synthèse est réalisée par mutualisation	Démarche à la fois pertinente et cohérente L'analyse critique va au bout du problème
Contenu	Absent	Incomplet Ne traite que la thématique présentée dans le doc. 2	Tous les thèmes issus des 3 documents ont été abordés	Tous les thèmes sont abordés Des idées complémentaires issues de l'enseignement scientifique sont présentées
Communication	Non conforme	Graphiques ne répondant pas aux attentes Diaporama surchargé de texte	Diaporama et schémas corrects La présentation est complète	La présentation est complète et originale

Unité 2

> La forme attendue est une carte mentale, cet exercice est parfait pour préparer au Grand oral qui (jusqu'à nouvel ordre) ne permet pas à l'élève de présenter son propos sur un support. La carte mentale est un bon moyen pour les élèves à vision globale de mettre en place leur savoir. Dans le cas d'élèves à besoins spécifiques on peut remplacer la forme attendue par un texte, un schéma ou une réponse orale.

> Le schéma attendu doit contenir des exemples d'adaptations phénologiques (**doc 1 et 3**), des adaptations physiologiques (**doc 1, 2 et 3**), des migrations (**doc 3, 4 et 5**).

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Liste sans associer par catégorie les adaptations	Démarche pertinente mais perfectible	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet Ne traite que d'un type d'adaptation	Traite de tous les thèmes mais n'a pas exploité l'ensemble des documents	Tous les thèmes sont abordés Tous les documents sont exploités Des connaissances personnelles apparaissent
Communication	Non conforme	Schéma peu pertinent	Carte mentale peu explicite	Carte mentale complète

Unité 3

> La forme attendue est un texte. On rappellera que la sécurité alimentaire se définit comme : « Une situation garantissant à tout moment à une population l'accès à une nourriture à la fois sur le plan qualitatif et quantitatif. Elle doit être suffisante pour assurer une vie saine et active, compte tenu des habitudes alimentaires. » Il faut donc penser à traiter tous les aspects : qualité, quantité, pérennité et habitudes alimentaires.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Se contente de lister les informations des documents	Démarche pertinente qui développe presque tous les aspects	Démarche à la fois pertinente, cohérente et complète
Contenu	Absent	Incomplet	Tous les aspects sont abordés et l'influence directe/indirecte est clairement mise en valeur	Tous les aspects sont abordés : _ l'influence directe/indirecte est clairement mise en valeur _ des idées complémentaires issues de l'enseignement scientifique sont présentées
Communication	Non conforme	Texte mal organisé	Texte bien conçu et organisé	La présentation est complète et originale

Unité 4

> Toujours dans l'optique de la préparation au Grand oral, la communication par diaporama permet de synthétiser l'information pertinente et de constituer pour l'élève une « fiche de révision » puisqu'il faut y inclure des iconographies. Le texte permet de proposer une courte synthèse de ces mêmes résultats.

> On attend ici que l'élève repère les différentes conséquences sur la santé et la survie des populations. Il est important de faire référence aux connaissances de seconde sur les maladies vectorielles et de première en enseignement scientifique sur la gestion de la température corporelle, ainsi qu'à l'unité et au chapitre précédents afin de traiter des variations du niveau de la mer de manière appropriée.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Se contente de lister les informations des documents	Démarche pertinente qui développe presque tous les aspects	Démarche à la fois pertinente, cohérente et complète
Contenu	Absent	Incomplet	Tous les aspects sont abordés	Tous les aspects sont abordés, et des idées complémentaires issues de l'enseignement scientifique sont présentées
Communication	Non conforme	Texte mal organisé ET trop de texte dans les diapositives	Texte mal organisé OU trop de texte dans les diapositives	La présentation est complète et originale

Unité 5

> On attend un tableau à double entrée, les lignes et les colonnes doivent être titrées. Le tableau doit être bien construit sans redondance d'informations (fusionner des cellules par exemple).

> Des recherches supplémentaires doivent se faire à l'échelle de la région uniquement et doivent être bien documentées. La carte mentale doit être claire, propre et suffisamment vaste pour que les légendes soient bien lisibles.

> Éléments de correction

Stratégies	Avantages	Inconvénients	À l'échelle régionale
Remplacement par des déchets verts du charbon pour faire de l'électricité	Diminue le prélevement des combustibles fossiles Baisse le bilan carbone lié à l'approvisionnement en combustible	Rejet de CO ₂ Ne dure pas toute l'année	Exemple : combustion des déchets ménagers
Échangeur thermique SWA	Pas de rejet de GES	Réchauffe les eaux	Exemple : géothermie basse température
Méthanisation	Utilise l'excédent d'électricité Utilise des déchets agricoles Fixe les GES Diminue le prélevement des combustibles fossiles	Odeur Production de GES par l'utilisation	Exemple : bioéthanol
Stockage du CO ₂	Piège à long terme du CO ₂	Dangers (corrosion, fuites)	

> Support pour l'évaluation

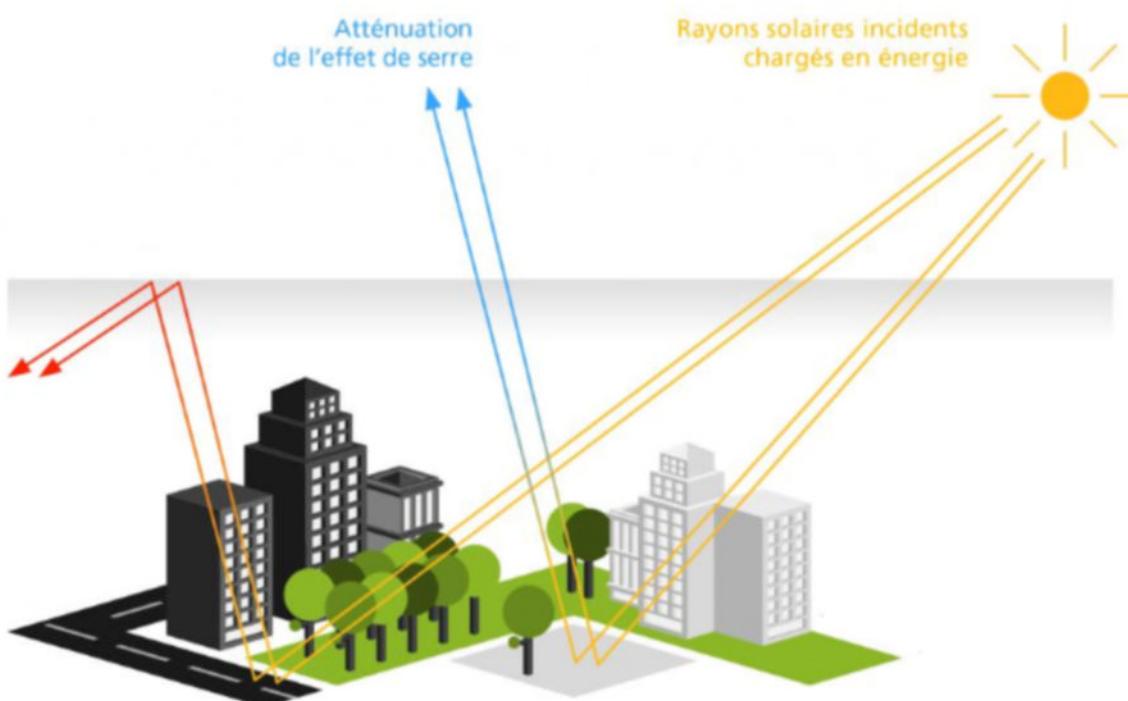
Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Se contente de lister les informations des documents sans les mettre en relation	Les stratégies sont listées mais les avantages et les inconvénients ou les interrelations ne sont pas traitées	Démarche à la fois pertinente, cohérente et complète Des recherches à l'échelle régionale ont été effectuées
Contenu	Absent	Incomplet	Tous les aspects sont abordés	Tous les aspects sont abordés, les acquis d'autres niveaux sont évoqués
Communication	Non conforme	Le tableau ET la carte mentale sont mal construits et mal renseignés	Le tableau OU la carte mentale ne sont pas conformes	Le tableau et la carte mentale sont conformes

Unité 6

> Le format attendu est libre, on demande de traiter des deux exemples. Un schéma comparant un îlot de chaleur urbain avec son homologue adapté peut être un bon moyen de comparer les stratégies (voir schéma ci-après).

> Une carte mentale ou un schéma avec des connecteurs peut également permettre de répondre à la question. Dans le schéma avec connecteurs, on attend (1) le réchauffement climatique, qui réchauffe l'eau, (2) la modification de la phénologie du homard, qui diminue les bénéfices de la pêche, (3) la prise en compte des modifications phénologiques et la reprise des profits.

> Éléments de correction



RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Les rayons solaires sont absorbés par les surfaces foncées et restitués avec une nouvelle fréquence (infrarouge). Bloqués dans l'atmosphère, ils réchauffent les gaz à effet de serre.

ATTÉNUATION DE L'EFFET DE SERRE

Les rayons solaires sont réfléchis par les surfaces claires et gardent la même fréquence. Ils retraversent l'atmosphère et repartent dans l'espace.

NOIR, ALBÉDO = 0

BLANC, ALBÉDO =

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Des notions sont consignées	Mise en relation des effets et des mesures à prendre	Démarche à la fois pertinente, cohérente et complète
Contenu	Absent	Incomplet dans les deux ou complet pour l'un mais pas pour l'autre	Complet	Complet et enrichi
Communication	Non conforme	Peu pertinente	Conforme mais aurait pu être plus pertinente	Conforme, pertinente et efficace

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas »

Unité 1

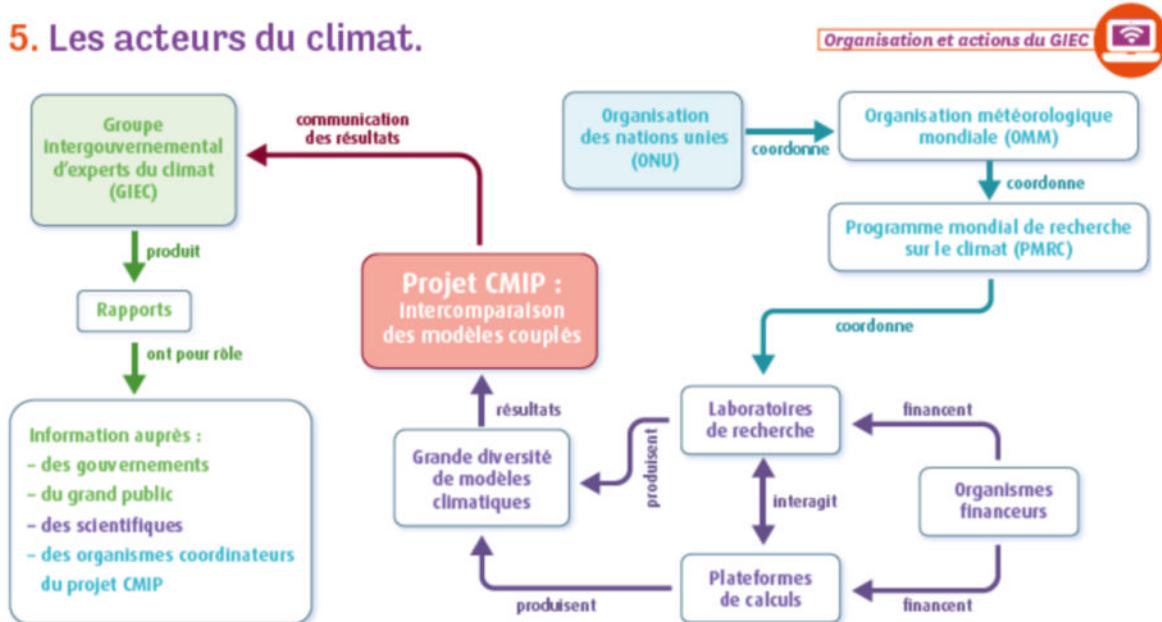
Question 1

Donnez une définition du GIEC (doc. 1) et en vous aidant des données acquises en enseignement scientifique, expliquez comment il aboutit à la production d'un rapport thématique sur le climat.

GIEC = Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

La réponse peut être accompagnée d'un schéma qui se rapproche de celui du manuel d'enseignement scientifique Belin p. 69 :

5. Les acteurs du climat.



Question 2

Trouvez des arguments dans le doc. 1 qui justifient que ce n'est qu'en 1995 que le GIEC a pu conclure au rôle clef du CO₂ anthropique dans la perturbation du climat.

Avant 1958, on ne savait pas doser le CO₂ atmosphérique ; avant 1972 on n'avait pas vraiment mis en relation l'effet de serre et les rejets de GES anthropiques ; avant 1985 on n'avait pas vu que le taux de CO₂ variait naturellement.

Question 3

– A faire à la maison –

Posez la question de l'étude du doc. 2 à votre entourage et trouvez dans les graphiques les arguments qui expliqueraient leur réponse.

On attend que les élèves interrogent les membres de leur famille et relient la réponse au fait qu'ils habitent en ville ou à la campagne/bord de mer/montagne, que leur entourage ait un lien avec la nature par leur métier, leurs déplacements, les pays dans lesquels ils ont voyagé, ...

Question 4

À partir de vos connaissances, pour chaque type de phénomène affectant le climat (listés en vert), donnez un exemple précis de phénomène (période géologique, nom d'un évènement étudié ou vu dans les médias) et expliquez la fréquence avec laquelle il fonctionne.

Phénomène	Exemple	Fréquence et explications
La géodynamique de la lithosphère	Constitution de la Pangée, cycles de Wilson	Entre le début et la fin de la Pangée il y 100 Ma
Altération des silicates	Altération des minéraux de la lithosphère océanique	Domaine des schistes verts atteint en quelques milliers d'années
Gisement de combustibles fossiles	Gisements de tourbe	Le dépôt, le recouvrement par des sédiments, l'enfoncement et la transformation de matière organique sur des dizaines de milliers d'années
Brassage de l'océan profond	Réchauffement de l'océan après une glaciation	Brassage par le grand convoyeur océanique ; 500 à 1000 ans
Cycle du carbone dans la biomasse	Mise en place d'une forêt tropicale au Carbonifère	100 à 1000 ans

Unité 2

Question 1

En quelques mots, expliquez ce qu'est la phénologie et reconstituez la chaîne de causes/conséquences aboutissant aux observations décrites dans le doc. 1.

Réchauffement → Débourrement des bourgeons 20 jours plus tôt → Apparition des feuilles 20 jours plus tôt → Naissance des chenilles 20 jours plus tôt → Ponte des oiseaux 20 jours plus tôt → Développement des chenilles qui mangent les feuilles 20 jours plus tôt → Nourriture disponible pour les oisillons 20 jours plus tôt.

Question 2

Trouvez, dans le doc. 2, les arguments pour justifier que le climat est plus chaud en Europe.

Les libellules sombre captent davantage la chaleur que les libellules claires mais un excès de chaleur peut être néfaste à leur survie. Les libellules claires qui supportent la chaleur (effet albedo) envahissent l'Europe, ce qui signe un climat plus chaud.

Question 3

Expliquez les effets de l'élévation de la température sur les lézards. (doc. 3)

Reproduction plus importante et rapide, diminution de la richesse du microbiote (probablement de son efficacité), mortalité plus rapide.

Question 4

Trouvez, dans les doc. 4 et 5, les arguments montrant que tous les organismes ne sont pas égaux face au changement climatique.

Les animaux fixés ne peuvent pas se déplacer, seules leur larves/semences le peuvent. Certains ont des durées de vie longues, ce qui ne facilite pas leur propagation. Certains organismes sont capables de se déplacer et de coloniser suffisamment rapidement de nouveaux territoires (cervidés), leur migration est plus rapide que celle du climat dans le pire scénario.

Unité 3

Question 1

Sous forme d'un tableau, listez les événements climatiques traités dans le doc. 1 et notez leurs conséquences.

Événements	Conséquences
Inondation/pluies torrentielles	Destruction de la culture maraîchère
Sécheresse/gelées/grêlons/canicule	Pénurie de fourrage
Forte chaleur/sécheresse	Le maïs a du mal à pousser, il jaunit et les grains se remplissent mal (rendement diminué)

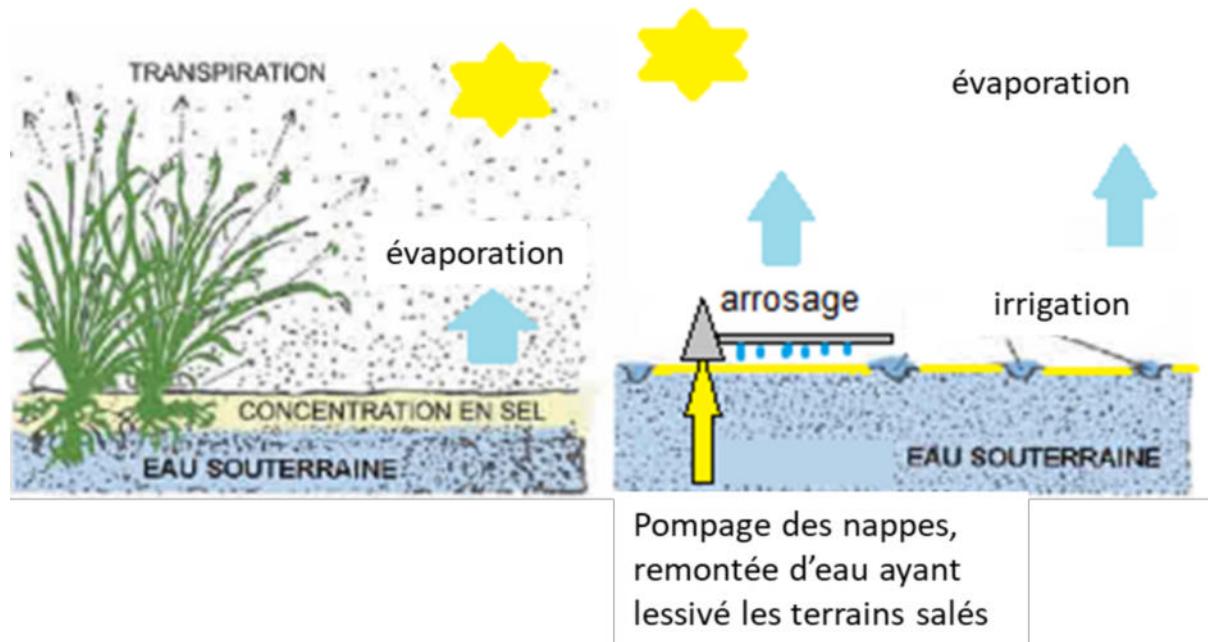
Question 2

Selon les préconisations de la modélisation Climator (doc. 2), quelles évolutions pertinentes en lien avec les évènements climatiques du doc. 1 doivent être envisagées dans chaque zone géographique ?

Zone géographique	Évolution envisageable
Centre-nord	Planter des vignes, éviter le maïs
Nord-est	Cultiver du tournesol
Centre-est	Laisser les prairies pour faire du foin pour les élevages
Sud-est	Cultiver autre chose que du blé
Sud-ouest	Cultiver du tournesol
Ouest	Cultiver du blé et du sorgho

Question 3

Sous forme d'un schéma, expliquez comment on aboutit à un sol salinisé. (doc. 4)



Question 4

Calculez la vitesse à laquelle la population mondiale est touchée par l'évolution de la désertification et celle de la diminution de l'extension des zones humides. Tirez une conclusion sur l'impact de l'évolution de la sécheresse en zone aride. (doc. 6)

Vitesse d'évolution de la population touchée par la désertification : +3,57% par an.

Vitesse de diminution de l'extension des zones humides : – 0,71 % par an.

C'est surtout la sécheresse dans les zones arides qui conduit à la désertification.

Unité 4

Question 1

À partir de vos connaissances sur la répartition de la population métropolitaine, expliquez pourquoi les données de la carte du doc. 1 sont à prendre avec beaucoup de sérieux.

Toutes les grandes villes, à part celles situées en Bretagne et autour de la Méditerranée, sont touchées. Même si c'est en juillet (*i.e.* pendant les congés d'été), la population active est très importante et les températures atteintes sont très élevées.

Cette canicule touche Paris (2 millions d'habitants), Lyon (0,5 millions), Toulouse (0,4 millions), Nantes (0,3 million), Strasbourg (0,3 million), Bordeaux (0,2 million) et Lille (0,2 million) pour les villes les plus peuplées (Clermont-Ferrand :0,14 million, Caen : 0,1 million).

Question 2

Sommes-nous tous égaux face à la canicule ? Aidez-vous du doc. 2 pour montrer l'impact du niveau social d'une personne sur sa tolérance à la chaleur.

- Rôle des facteurs socio-économiques et socio-culturels (ressources, connaissance des gestes, qualité du milieu de vie).
- Rôle de l'appartenance à une communauté (voisinage, famille, ...).

Question 3

Faites une recherche internet afin de compléter les informations des doc. 3 (et des compléments numériques) et 4 et expliquez pourquoi la bilharziose, qui est pour l'instant endémique, pourrait rapidement proliférer à cause du changement climatique.

Données et liens complémentaires

- Bilharziose en Corse

<https://www.science-et-vie.com/corps-et-sante/l-etrange-affaire-de-la-bilharziose-en-corse-44659>

- Autres liens

https://www.researchgate.net/figure/Un-foyer-de-bilharziose-et-une-espece-hybride-A-Piscine-naturelle-de-la-riviere-du_fig1_294737928

- Carte de la répartition de la pandémie



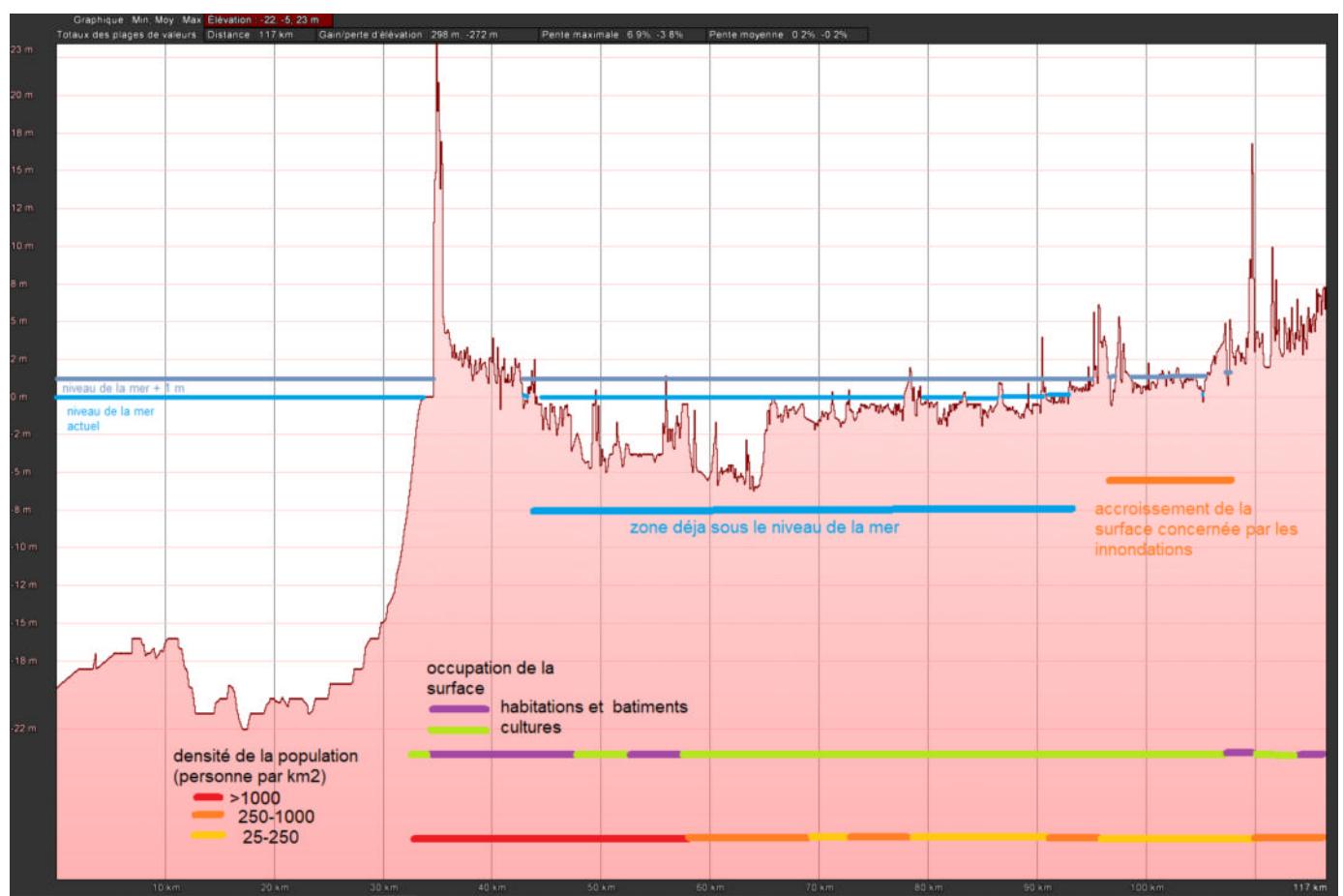
Éléments de réponse

La contamination est rapide et indolore lors de baignades. Lorsqu'il fait chaud, les parasites prolifèrent et les gens se baignent davantage, ce qui expliquerait l'augmentation des contaminations.

Question 4

Réalisez l'activité numérique avec Google Earth puis, à l'aide des cartes du doc. 6, expliquez pourquoi les Pays-Bas risquent de disparaître rapidement.

Les Pays-Bas sont dans une zone où la vitesse d'inondation est de 5mm par an. Dans 20 ans, le niveau marin aura augmenté d'1 m et les populations rurales risquent d'être fortement touchées ainsi que les cultures. L'étude en « streetview » montre que la digue qui protège La Haye s'arrête au niveau du port. L'eau pourrait inonder le reste de la région en passant par cette ouverture.



Unité 5

Question 1

Expliquez ce qu'il faudrait développer sur l'île de la Réunion pour que les usines comme celle du Gol (doc. 1) puissent produire de l'énergie sans avoir à compléter avec le charbon.

Il faut récolter les déchets ménagers et les sous-produits de la foresterie ; c'est-à-dire qu'il faut développer les usines de traitement des déchets ainsi que le tri à l'échelle individuelle. Il faut aussi développer la foresterie et améliorer l'entretien des forêts pour en récupérer les sous-produits.

Question 2

Justifiez grâce aux éléments consignés dans le doc. 2 que des projets comme le méthycentre de Céré-la-Ronde réduisent la consommation de combustibles fossiles mais pas le rejet de GES.

Les points émetteurs de GES cités dans ce schéma sont les déchets agricoles, les engrains organiques, le méthane à usage résidentiel et industriel ou utilisé pour le transport. La majorité de ces émetteurs de GES sont des éléments en sortie du système. L'avantage de ce système est la provenance naturelle des sources d'énergies (vent, rayonnement solaire, animaux et végétaux). Cependant, ces déchets finiront par produire du CO₂ donc le principal avantage est de ne pas avoir à extraire des combustibles fossiles qui sont des pièges à long terme du CO₂.

Question 3

Citez les principales précautions à prendre pour stocker des gaz sous terre. (doc. 3 à 6)

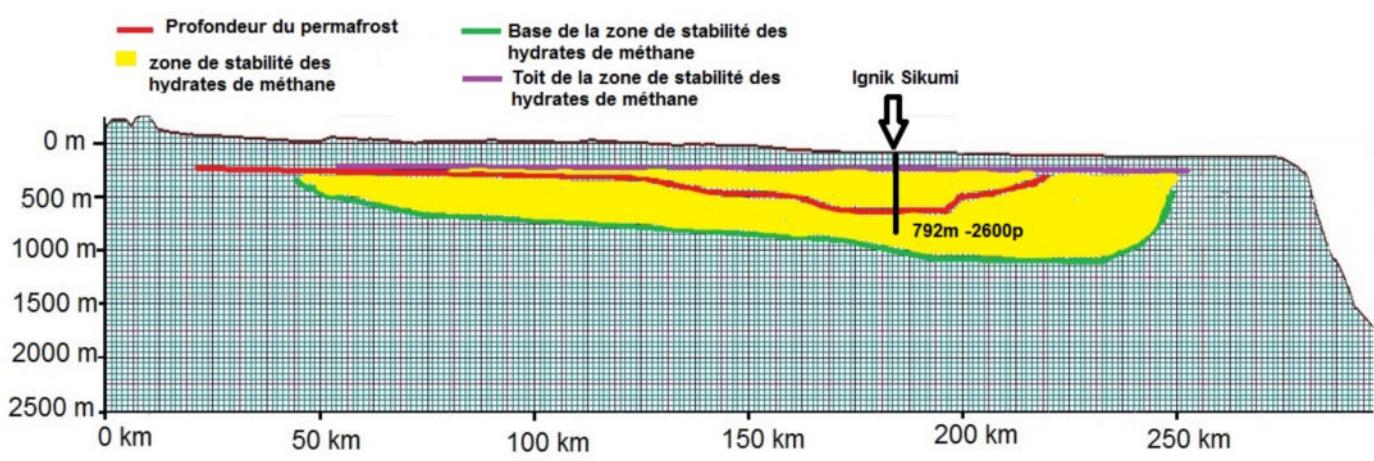
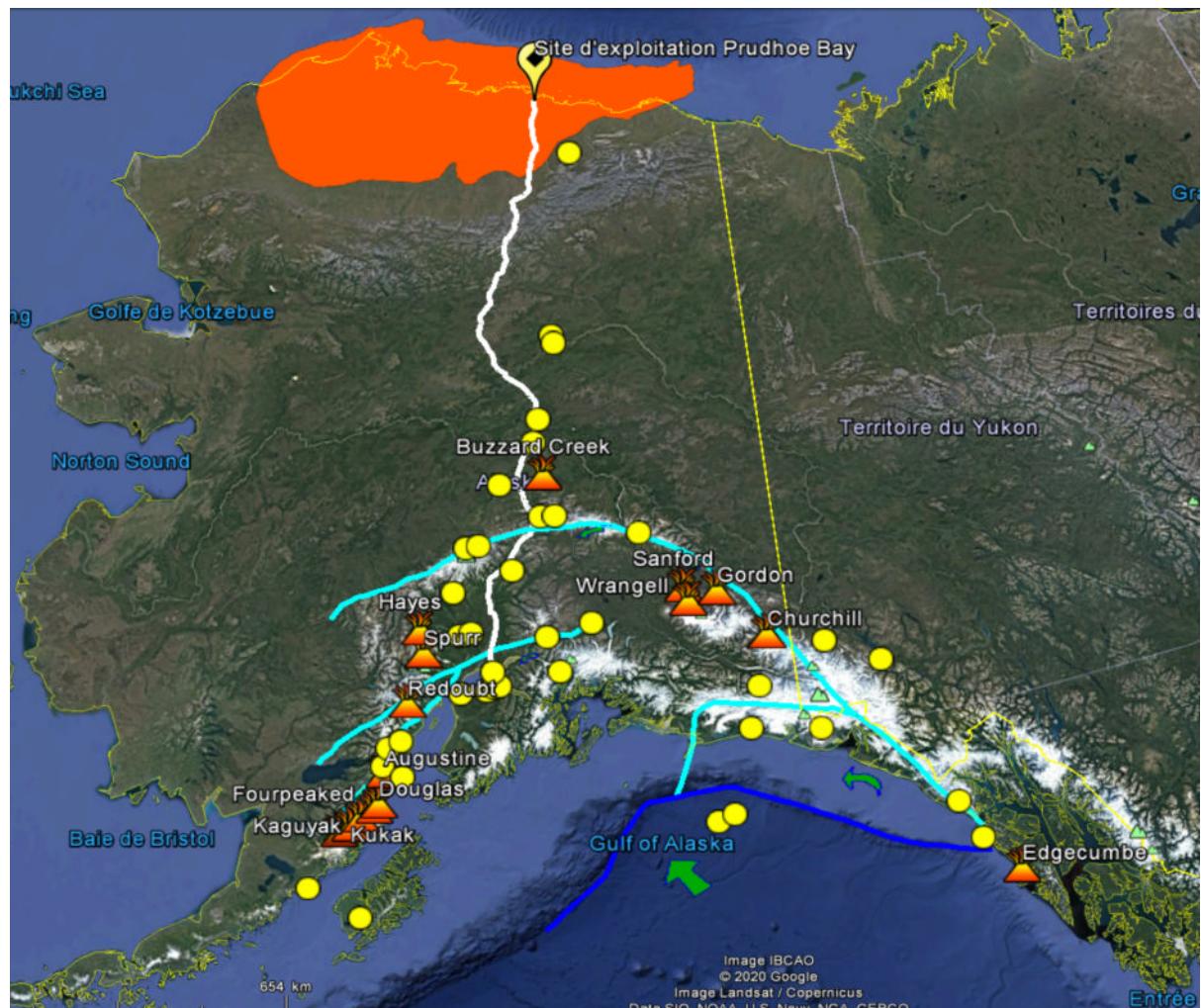
- Disposer d'une roche poreuse et perméable recouverte d'un toit imperméable.
- Avoir une roche non calcaire afin que les parois ne soient pas dissoutes.
- Avoir des structures géologiques résistantes à la pression du gaz.

Question 4

Réalisez l'activité numérique Google Earth proposée avec le doc. 4. (p. 357)

Il faut prélever le méthane et injecter le CO₂ au niveau du puits entre la base du permafrost et le toit de la zone de stabilité des clathrates afin d'être certain que les conditions thermiques permettent la stabilité des clathrates.

Le gazoduc qui doit être construit traverse une zone tectonique active : nombreux séismes et volcanisme explosif lié à la subduction au niveau du Golfe de l'Alaska. De plus, le gazoduc traverse deux failles coulissantes majeures.



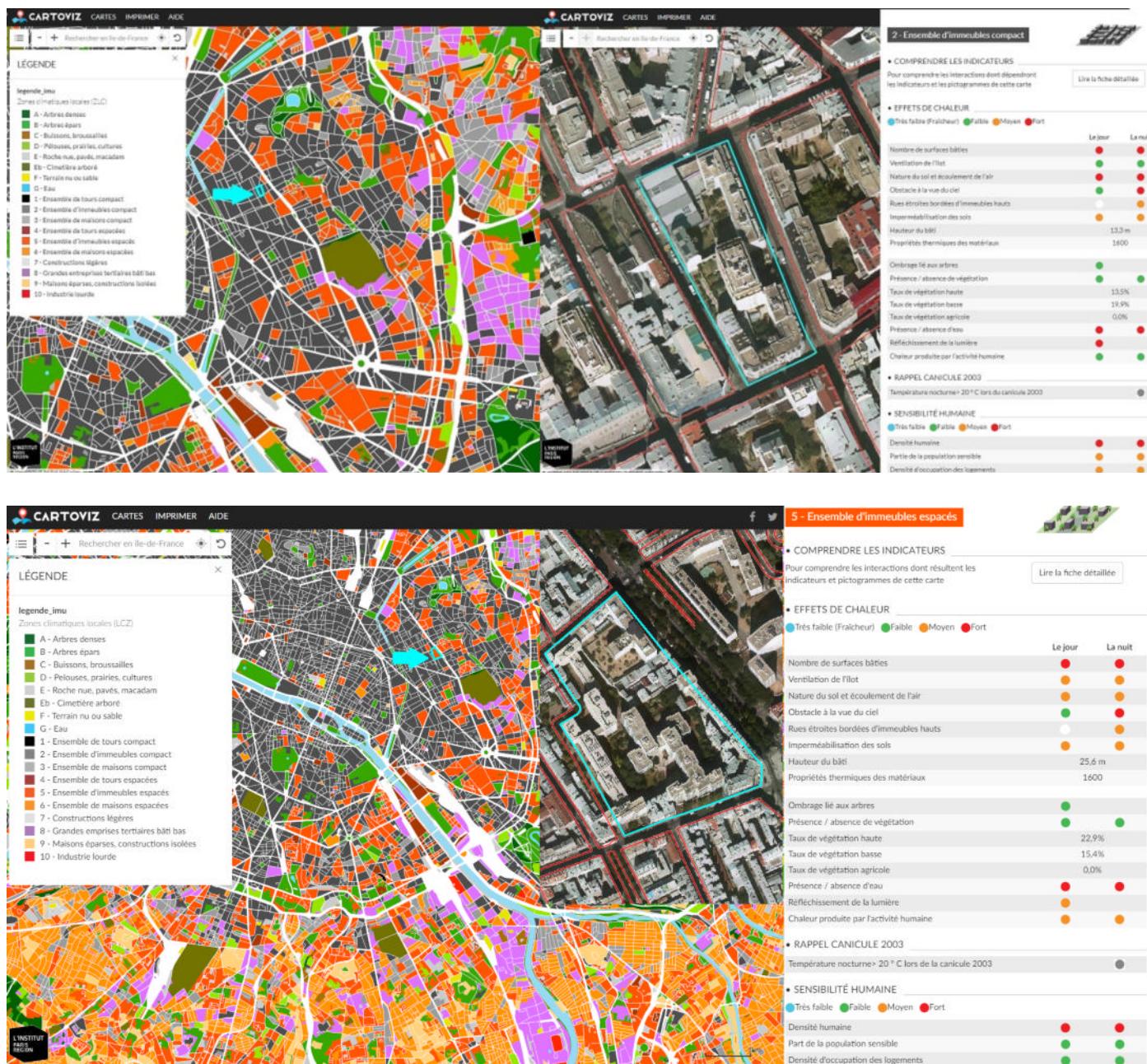
Unité 6

Question 1

Réalisez l'activité numérique proposée avec le doc. 2 : (1) Recherchez la nature des îlots de chaleur parisiens (doc. 1 et avec Google Earth) ; (2) réalisez un comparatif de plusieurs zones climatiques locales (avec le SIG Cartoviz).

(1) Les îlots de chaleurs parisiens sont liés aux voies de chemins de fer, aux parking et routes qui emmagasinent la chaleur au cours de la journée.

(2) Comparaison des caractéristiques de deux pâtés de maisons dans le nord-est de Paris, l'un composé d'un ensemble d'immeubles compacts (**haut**), l'autre avec des immeubles espacés (**bas**).



Question 2

À partir des données consignées, proposez des stratégies pour limiter la conservation de la chaleur dans le secteur photographié dans le doc. 3.

Il faut préférer des murs et des toits clairs, planter de la végétation à la place de la terre battue.

Question 3

Expliquez comment le réchauffement climatique a conduit les pêcheurs de Saint-Pierre-et-Miquelon à faire évoluer leurs pratiques. (doc. 4 à 6)

Le réchauffement des eaux (**doc. 4**) a modifié la phénologie des homards (**doc. 5**). Les pêcheurs ne faisaient pas assez de prises aux périodes de pêche habituelles. Le changement de leurs pratiques grâce à la prise en compte des variations climatiques a permis de suivre le comportement des homards et de retrouver des prises suffisantes pour permettre un maintien de l'économie locale.

Éléments de correction des exercices

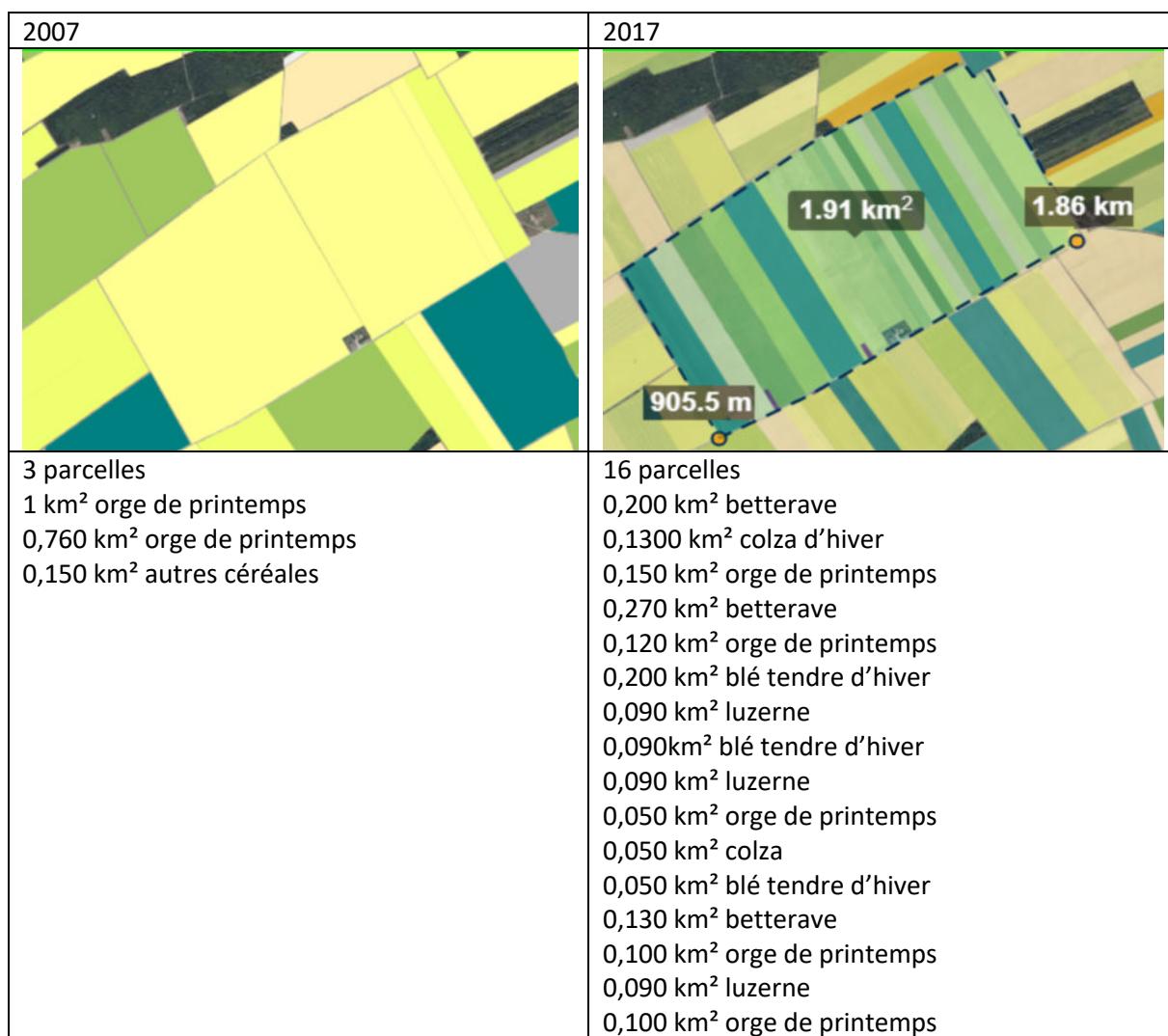
Exercice 2

1. On observe une diminution des surfaces par fractionnement des champs et diversification des cultures.

2. Il y a plus de variétés cultivées (voir tableau ci-dessous). Il y a une diminution de la surface cultivée de chaque type de plante.

3. La diversification des parcelles permet à un agriculteur d'avoir des plantes qui poussent à des rythmes différents et qui, en cas d'évènement climatique majeur, ne seront pas détruites dans leur intégralité si les espèces cultivées voisines présentent des sensibilités différentes à l'humidité ou à la sécheresse.

Cultiver des espèces différentes évite que les ravageurs monospécifiques (qui ne s'attaquent qu'à une seule espèce végétale) ne s'attaquent à la totalité de la récolte. Cela favorise également la biodiversité et la présence de prédateurs pour les ravageurs.



Exercice 3

1. La régulation thermique est difficile en climat chaud et humide car l'humidité de l'air ne permet pas la déperdition de chaleur par la transpiration.

2. Les régions les plus densément peuplées sont celles où les températures vont être les plus fortes.

Exercice 4

Éléments que l'on peut tirer des documents :

> En comparant les deux photographies (**doc. 1**) on ne distingue pas d'ensablement plus important en 2020 qu'en 1977. Le sable quitte la plage pour constituer une sorte de boudin immergé vers la digue.

> La circulation de l'eau ne se fait pas correctement entre la plage et le large à cause de la digue qui entraîne une stagnation des eaux de baignade (**doc. 1, bas**). La forte concentration de baigneurs génère une pollution bactériologique des eaux qui, lorsque les conditions thermiques et hydrodynamiques de la mer sont favorables, est supérieure à la norme (**doc. 2**).

> Devant ces résultats décevants, il paraît préférable de ne pas multiplier la mise en place des digues.

Exercice 5

Éléments que l'on peut tirer des documents :

> La mangrove se développe au niveau de la limite entre le continent et la mer (**doc. 1**).

> doc.2 Les racines des arbres de la mangrove stabilisent le fond et les branchages cassent les vagues ce qui protège la ligne de côte (**doc. 2**). Lorsque la mangrove disparaît l'érosion s'amplifie et le pouvoir « brisant » de la mangrove diminue ce qui entraîne l'inondation de la côte.

> De nombreux programmes de restauration sont en cours dans les DROM (**doc. 3**). En effet, le niveau de la mer monte, il est donc impératif de maintenir ce brisant naturel qu'est la mangrove afin de limiter l'immersion des littoraux bien souvent habités ou sources de nourriture pour les habitants (terres cultivées).

Chapitre 15. Les réflexes

Dans le cadre de l'étude des réactions de l'organisme en réponse à des stimulations, ce premier chapitre du thème « Corps humain et santé » aborde les mouvements réflexes. Il permet également d'introduire la contraction musculaire, dont les mécanismes sont approfondis dans le chapitre 17.

THEME 5 Corps humain et santé	
Connaissances	Capacités, attitudes
<p>Les réflexes mettent en jeu différents éléments qui constituent l'arc-réflexe. À partir d'une sensation de départ (stimulus) captée par un récepteur sensoriel, un message nerveux codé en potentiels d'action est élaboré. Il circule dans les neurones sensoriels jusqu'au centre nerveux (corne dorsale de la moelle épinière) où se produit le relais synaptique sur le neurone-moteur. > Unités 1, 2 et 4</p> <p>Celui-ci conduit le message nerveux jusqu'à la synapse neuromusculaire, qui met en jeu l'acétylcholine. > Unités 3 et 5</p> <p>La formation puis la propagation d'un potentiel d'action dans la cellule musculaire entraînent l'ouverture de canaux calciques à l'origine d'une augmentation de la concentration cytosolique en ions calcium, provenant du réticulum sarcoplasmique pour les muscles squelettiques. Cela induit la contraction musculaire et la réponse motrice au stimulus. > Unité 6</p>	<p>Mettre en évidence les éléments de l'arc-réflexe à partir de matériels variés (enregistrements, logiciels de simulation). > Unités 1 et 2</p> <p>Réaliser, observer des coupes histologiques de fibres et de nerfs. > Unité 2 et activité pratique 1</p> <p>Observer des coupes histologiques de moelle épinière. > Unité 2</p> <p>Interpréter des électronographies afin de caractériser le fonctionnement d'une synapse chimique. > Unités 4 et 5</p>

Compétences travaillées (et quelques capacités associées)	Place dans le chapitre
<p>Pratiquer des démarches scientifiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Formuler et résoudre une question ou un problème scientifique. • Observer, questionner, formuler une hypothèse, en déduire ses conséquences testables ou vérifiables, expérimenter, raisonner avec rigueur, modéliser, argumenter. • Interpréter des résultats et en tirer des conclusions. • Discerner, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 5 et 6, exercices 2, 3, 4, 5 et 8 • Unités 1 et 3 • Unités 2 et 3 • Unité 4
<p>Concevoir, créer, réaliser</p> <ul style="list-style-type: none"> • Concevoir et mettre en œuvre un protocole. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exercice 9
<p>Pratiquer des langages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant. • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique. • Utiliser des logiciels d'acquisition, de simulation et de traitement de données 	<ul style="list-style-type: none"> • Exercices 6 et 7 • Unités 1, 2 • Unités 1 et 5, activités pratiques

Choix pédagogiques

Le réflexe myotatique est mis en évidence d'un point de vue fonctionnel dans l'unité 1 puis anatomique dans l'unité 2. Les unités 3, 4 et 5 abordent la nature et la transmission du message nerveux de cellule à cellule. Enfin, l'unité 6 présente les mécanismes moléculaires qui conduisent à la contraction musculaire.

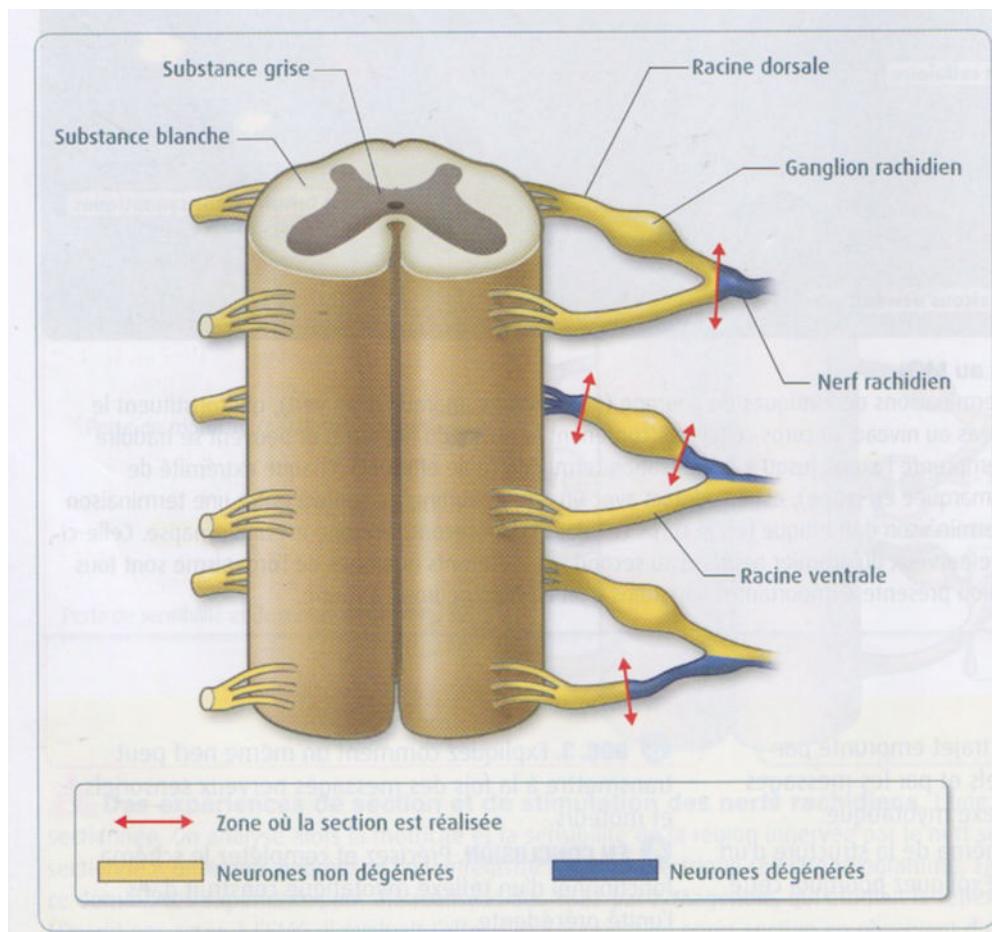
Unité 1

- > L'unité 1 permet de définir et d'étudier un réflexe myotatique. Le **document 1** introduit les réflexes myotatiques dans une situation concrète : le maintien de l'équilibre. Cela permet aux élèves de comprendre que les réflexes myotatiques ont une fonction physiologique et pas uniquement en tant que test médical.
- > Les **documents 2 et 3** montrent comment le réflexe achilléen permet de maintenir l'équilibre sur une planche. On pourra relier cette situation aux séances de rééducation qui suivent une entorse, par exemple chez un masseur kinésithérapeute. L'enregistrement par ExAO montre de façon nette des contractions alternées des muscles antagonistes, en fonction de la position de la planche. On pourra également réaliser une étude plus classique du réflexe myotatique, par exemple celle proposée page 397 (réflexe achilléen).
- > Les **documents 4 et 5** permettent d'envisager le centre nerveux impliqué dans les réflexes myotatiques. Le **document 4** localise les nerfs rachidiens et les centres nerveux (encéphale et moelle épinière). Le **document 5** montre une lésion tumorale observée par IRM. Ce type d'atteinte, tout comme les lésions traumatiques, peuvent provoquer une perte des mouvements volontaires et un maintien des réflexes myotatiques.
- > Enfin l'interview proposée dans le **document 6** permet de mieux comprendre l'intérêt clinique et physiologique des réflexes myotatiques.

Unité 2

- > L'unité 2 permet de reconstituer les éléments constitutifs de l'arc réflexe. Le **document 1** se fonde en partie sur les expériences historiques de Magendie (partie gauche du dessin), complétés par des expériences d'électrostimulation (partie droite du dessin). Ces données permettent de distinguer les voies ventrales (motrice) et les voies dorsales (sensitives).
- > La localisation des corps cellulaires des neurones pourra se faire à l'aide du **document 2** qui permet de distinguer à différentes échelles substances grises et blanches. On pourra y associer des données concernant la dégénérescence des neurones suite à une section des racines dorsales et ventrales (voir **ci-dessous**) permettant de localiser les corps cellulaires des neurones dans le ganglion rachidien pour la voie sensitive.

Conséquences à long terme de différents types de section des nerfs racchidiens au niveau de la moelle épinière. © Thomas Haessig/Belin éducation



- > Le **document 3** permet de comprendre comment le nerf rachidien peut à la fois être moteur et sensitif, en distinguant les différentes fibres nerveuses constitutives du nerf. La dissection d'un nerf est proposée en **activité pratique** page 386.
- > Enfin les **documents 4 et 5** permettent d'observer l'extrémité des fibres nerveuses sensitives et motrices et d'introduire ainsi le récepteur (fuseau neuromusculaire) et l'effecteur d'un réflexe myotatique (muscle).

Unité 3

> L'unité 3 a pour objectif d'expliquer la nature du message nerveux. L'électromyogramme présenté dans le **document 1** permet de comprendre que le message nerveux est de nature électrique. On pourra, connaissant la distance des électrodes stimulatrices et réceptrices, calculer la vitesse du message nerveux chez le témoin et chez le patient atteint de fourmillement (il s'agit d'un cas de syndrome de canal carpien, dans lequel le nerf est comprimé ce qui ralentit la transmission du message nerveux).

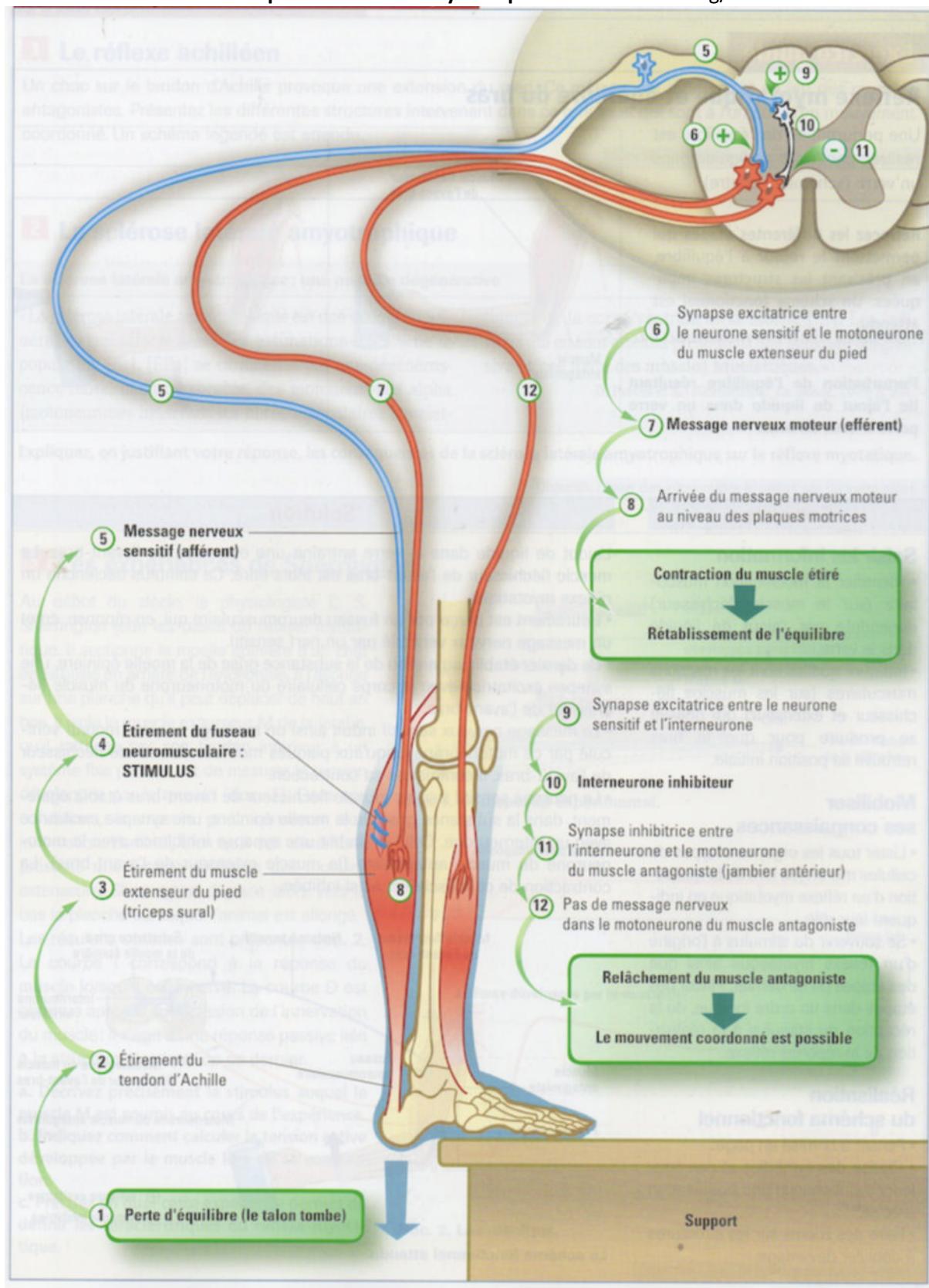
> Le **document 2** présente l'expérience historique de Hodgkin et Huxley qui a permis de mesurer le premier potentiel d'action. Il convient d'être vigilant à ce que l'enregistrement du document 1 (électromyogramme) ne soit pas confondu avec le potentiel d'action du document 2 malgré la ressemblance des tracées.

- > Le **document 3** permet de visualiser la propagation du potentiel d'action le long de l'axone d'un neurone. C'est l'occasion de constater que le potentiel d'action se propage à l'identique, tant en amplitude qu'en durée.
- > Le **document 4** présente la loi du « tout ou rien » : on constate qu'une fois le potentiel seuil de dépolarisation atteint (ici 135 pA), le potentiel d'action se déclenche et qu'il est identique en amplitude même si l'intensité de stimulation est plus forte. On pourra donc en déduire qu'il n'y a pas de relation entre intensité de la stimulation et intensité du potentiel d'action.
- > Enfin, le **document 5** permet d'étudier le codage de l'information nerveuse en fréquence de potentiel d'action en se fondant sur l'éirement d'un muscle du doigt, ce qui permet une mise en relation avec l'unité 1 (réflexe en réponse l'éirement d'un muscle). L'éirement du muscle se traduit par une hausse de la fréquence des potentiels d'action.

Unité 4

- > L'unité 4 permet d'étudier la transmission d'un message nerveux d'un neurone à l'autre. Le **document 1** résitue la transmission synaptique dans le contexte du réflexe myotatique en présentant le circuit neuronal complet. La représentation est bien sûr très simplifiée, puisqu'on ne figure pas l'interneurone (et les synapses associées) permettant d'inhiber la contraction du muscle antagoniste (voir **ci-dessous**).
- > Le **document 2** est une observation au microscope électronique de la zone de contact entre le neurone pré-synaptique et le neurone post-synaptique. Cela permet de visualiser les vésicules contenues dans le neurone pré-synaptique et d'évoquer leur libération dans la fente synaptique. Le neurotransmetteur impliqué (glutamate) est évoqué dans ce document de manière à faire le lien, dans le **document 3**, avec les récepteurs au glutamate, rendus visibles sur la membrane plasmique des neurones post-synaptique grâce à un immunomarquage.
- > Le **document 4** explique les événements qui suivent la fixation du glutamate sur son récepteur. On évoque sans le nommer le potentiel post-synaptique exciteur (PPSE). La notion de synapse inhibitrice et le potentiel post-synaptique inhibiteur (PPSI) seront évoqués dans le chapitre 16, doc 3 page 405, là encore sans nommer explicitement le PPSI.
- > Enfin, l'expérience de micro-iontophorèse présentée **document 5** permet de relier la quantité de neurotransmetteur libéré dans la fente synaptique (ici l'acétylcholine) et la fréquence des potentiels d'action émis par le neurone post-synaptique, dans le cas d'une synapse excitatrice. Ces expériences ont été publiées en 1982.

Circuit neuronal complet d'un réflexe myotatique. © Thomas Haessig/Belin éducation



Unité 5

- > L'unité 5 étudie la dernière synapse de l'arc réflexe myotatique : la synapse neuro-musculaire. L'objectif de la double page est d'expliquer le mode d'action du curare, afin d'en déduire le fonctionnement d'une synapse. Le **document 1** explique l'intérêt médical du curare. Il pourra être utilisé par exemple pour formuler des hypothèses sur le mode d'action de cette molécule.
- > Le **document 2** présente les expériences historiques de Bernard Katz. On voit que l'application de curare inhibe le potentiel d'action musculaire et ainsi la contraction musculaire. Les deux photos du **document 3** permettent, grâce à un immunomarquage, d'observer les récepteurs à l'acétylcholine présents au niveau de la plaque motrice.
- > Le **document 4** lui présente le modèle moléculaire de l'acétylcholine en présence de cette molécule ou en présence d'une molécule de curare (tubocurarine). L'objectif est de montrer que le curare peu se fixer sur le récepteur à l'acétylcholine, sur les mêmes sites de fixation. C'est un cas classique d'inhibition compétitive. Ce document peut être complété par l'**activité pratique** page 387 (mode d'action de la conotoxine).
- > Enfin, le **document 5** permet de comprendre comment l'arrivée d'un train de potentiel d'action permet la libération d'acétylcholine dans la fente synaptique.

Unité 6

- > L'unité 6 permet de comprendre comment la libération d'acétylcholine au niveau de la synapse neuromusculaire déclenche la contraction musculaire. On pourra se fonder sur l'électrostimulation présentée dans le **document 1** qui permet d'établir le lien entre contraction musculaire et stimulation électrique.
- > Le **document 2** montre la modification au cours du temps du potentiel de membrane de la cellule musculaire, de la concentration du calcium intracellulaire et de la longueur de la cellule musculaire. On peut constater que la hausse de la concentration intracellulaire en calcium suit la dépolarisation membranaire et précède la contraction musculaire, ce qui permet de supposer un lien de causalité entre ces deux phénomènes.
- > Ce lien sera renforcé par l'étude du **document 3** qui montre que plus le potentiel de membrane est important, plus la hausse de la concentration intracellulaire en calcium est forte.
- > Le **document 4** présente, sous la forme d'un dessin en trois dimensions, l'ultrastructure d'une cellule musculaire. Il permet de visualiser les tubules T, qui permet la propagation du potentiel d'action musculaire, le réticulum sarcoplasmique lisse qui contient une forte concentration de calcium intracellulaire et les myofibrilles, qui seront étudiées en détail dans le chapitre 17.
- > Le **document 5** montre que la dépolarisation de la membrane d'une cellule musculaire de grenouille est associée à une baisse de la concentration de calcium dans le réticulum sarcoplasmique et à une hausse de la concentration en calcium dans le cytoplasme, ce qui permet d'émettre l'hypothèse que le calcium passe du réticulum au cytoplasme.
- > Le **document 6** qui fait le lien entre les processus mis en évidence document 5 et les mécanismes mis en jeu à la jonction neuromusculaire : la fixation de l'acétylcholine entraîner une dépolarisation membranaire puis l'ouverture des canaux calciques du réticulum. Le **document 7** présente l'effet de la mutation de ce canal chez des souris : on constate une baisse de la forte de préhension des pattes de la souris, signe que la contraction musculaire est moins efficace.

Corrigé des parcours des unités

Unité 1

> Éléments de correction

Proposition de présentation orale : synopsis possible pour le diaporama

Diapositive	Contenu
Introduction	Réflexe dans le langage courant et réflexe en science : différence ?
Réflexe myotatique et maintien de l'équilibre	Un réflexe myotatique permet de maintenir l'équilibre (doc. 1 et 3) et de protéger les articulations (doc. 6).
Résultat de l'électromyogramme	L'électromyogramme (doc. 3) montre que les muscles antagonistes se contractent alternativement pour maintenir l'équilibre sur une planche.
Résultat d'une lésion de la moelle épinière et hypothèse sur le centre nerveux en jeu	Une lésion de la moelle épinière entraîne la paralysie des mouvements volontaires mais certains réflexes myotatiques sont conservés (doc. 4 et 5). Le centre nerveux est situé dans la moelle épinière.
Conclusion : définition biologique d'un réflexe myotatique	Réflexe myotatique : mouvement involontaire lié à la contraction d'un muscle à son propre étirement.

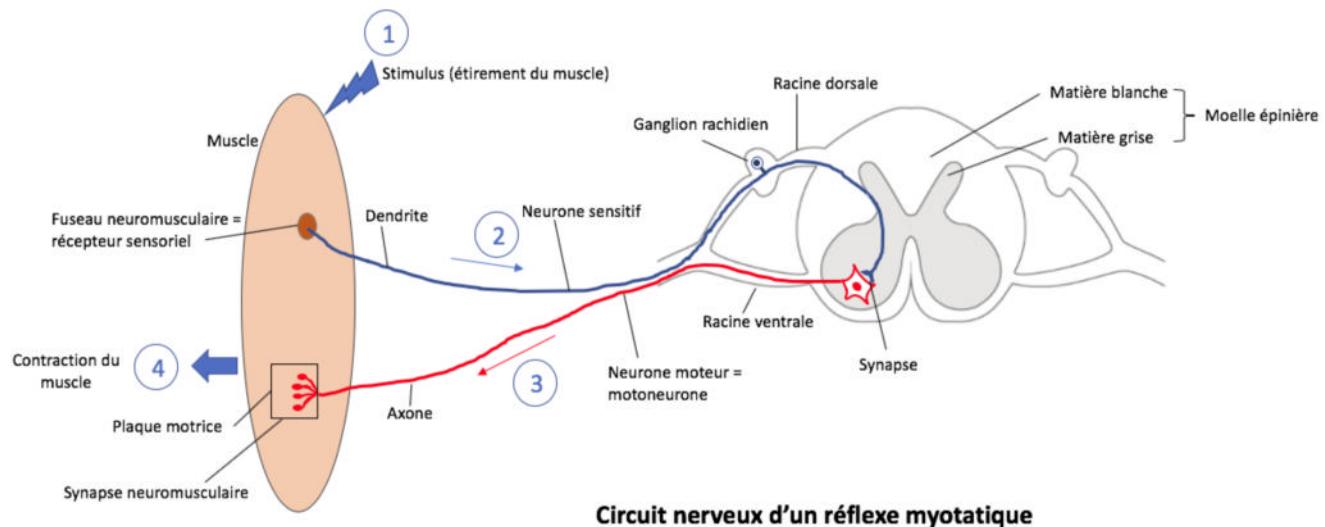
> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et réponse partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des connaissances et/ou des documents	Absent	Incomplet Des connaissances manquent et/ou des informations n'ont pas été extraites des documents		Complet ou suffisant
Communication Diaporama accompagnant une présentation orale	Non conforme	Les éléments du diaporama respectent la demande notionnelle de la consigne	Les éléments du diaporama sont conformes aux informations de la double page notionnelle de la consigne	Le diaporama est correctement structuré, un titre est présent sur chaque diapositive.

Unité 2

> Éléments de correction

Proposition de schéma



> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et réponse partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents	Absent	Incomplet Des connaissances manquent et/ou des informations n'ont pas été extraites des documents	Complet ou suffisant	
Communication Schéma	Non conforme	Schéma incomplet	Schéma complet mais peu propre/lisible ou non fonctionnel	Schéma complet, propre et fonctionnel

Unité 3

Question 1

Le message nerveux chez le témoin parcourt la distance de 4 cm en 2 ms. Cela correspond donc à une vitesse de $\frac{0,04}{0,002} = 20 \text{ m.s}^{-1}$.

Le message nerveux chez le malade parcourt la distance de 4 cm en 4 ms. Cela correspond donc à une vitesse de $\frac{0,04}{0,004} = 10 \text{ m.s}^{-1}$. On peut formuler l'hypothèse que les symptômes du malade proviennent d'une lésion du nerf qui entraîne une vitesse de conduction de l'information nerveuse plus basse.

Question 2

Lors d'une stimulation, un neurone voit le potentiel électrique de sa membrane changer brusquement de valeur, passant de -70 mV à $+30 \text{ mV}$. C'est le potentiel d'action, qui se déclenche à partir d'un certain seuil de stimulation et qui est toujours identique. Le message nerveux est donc de nature électrique.

Question 3

On constate dans le doc. 5 que plus l'intensité du message est importante et plus la fréquence des potentiels d'action est élevée, le message nerveux est ainsi codé en fréquence de potentiel d'action.

Unité 4

Question 1

Le glutamate est stocké dans des vésicules situées dans le bouton terminal du neurone pré-synaptique. À l'arrivée d'un train de potentiel d'action, le glutamate est libéré dans la fente synaptique et vient se fixer sur des récepteurs situés sur la membrane du neurone post-synaptique. La fixation du glutamate sur son récepteur déclenche un potentiel d'action du neurone post-synaptique. Le message nerveux a été ainsi transmis d'un neurone à l'autre.

Question 2

D'après le doc. 4, le neurone post-synaptique ne déclenche un potentiel d'action que si un certain seuil est dépassé. Cependant, le doc. 5 montre que plus la quantité de neurotransmetteur libéré est importante et plus la fréquence des potentiels d'actions est élevée. La fréquence des potentiels d'actions du neurone post-synaptique dépend donc de la concentration du neurotransmetteur libéré dans la fente synaptique.

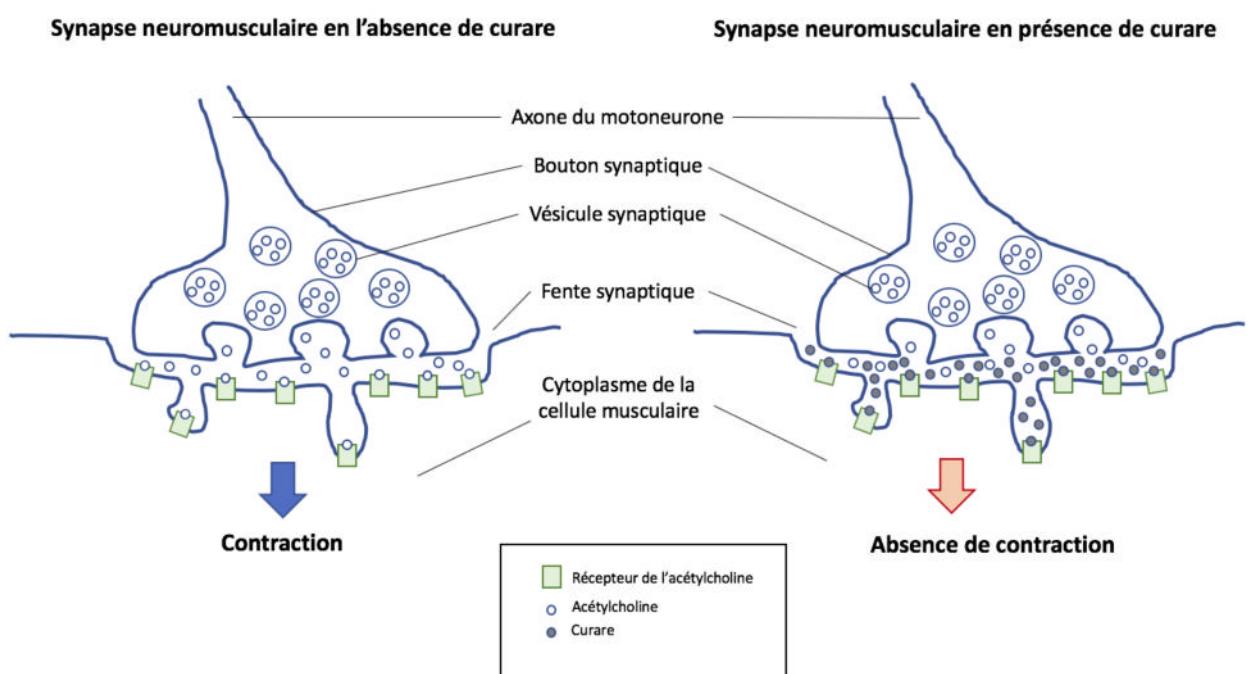
Unité 5

> Éléments de correction

Le curare est un produit utilisé lors de certaines opérations chirurgicales (doc. 1). Il entraîne une paralysie des muscles que nous allons expliquer en exploitant les différents documents à notre disposition.

Le doc. 2 nous montre les résultats d'une expérience du milieu du xx^e siècle. Lorsque le neurone moteur d'un muscle est stimulé électriquement, on constate que la cellule musculaire voit son potentiel de membrane se modifier. Ce potentiel d'action musculaire, qui déclenche la contraction, est aboli en présence de curare. Ainsi le curare empêche le muscle de se contracter en empêchant l'apparition d'un potentiel d'action musculaire. Le doc. 5 nous présente une synapse neuromusculaire de grenouille. Lors de l'arrivée d'un potentiel d'action au niveau de la terminaison du motoneurone, des vésicules contenant de l'acétylcholine fusionnent avec la membrane du neurone et libèrent leur contenu dans la fente synaptique : c'est l'exocytose. Le curare n'empêche pas la libération d'acétylcholine par le motoneurone et doit donc agir à une étape ultérieure. Le doc. 3 nous montre qu'au niveau de la plaque motrice d'un muscle de souris, on observe des récepteurs à l'acétylcholine. Comme le montre le doc. 4, l'acétylcholine peut se fixer sur le récepteur de l'acétylcholine ce qui déclenche le potentiel d'action musculaire. Le curare peut se fixer à la place de l'acétylcholine ce qui empêche donc la formation d'un potentiel d'action musculaire et donc la contraction.

En conclusion, le curare se fixe sur les récepteurs de l'acétylcholine des muscles ce qui empêche l'acétylcholine de se fixer sur leurs récepteurs et donc de déclencher la contraction musculaire.



> Support pour l'évaluation

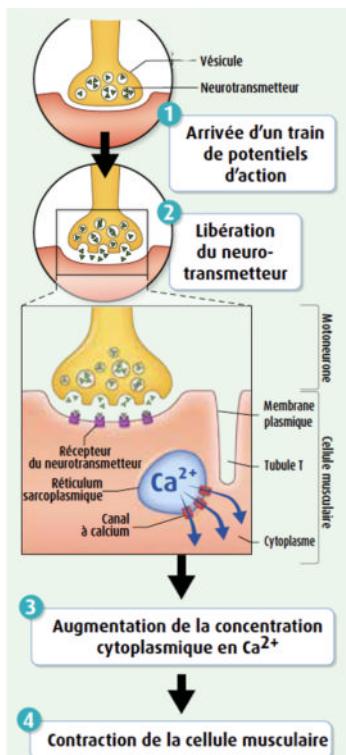
Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et réponse partielle à la question posée	Démarche pertinente mais maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet Des connaissances manquent et/ou des informations n'ont pas été extraites des documents		Complet ou suffisant
Communication Texte	Non conforme	Le texte reprend une partie des documents	Le texte inclut toutes les notions présentées par les documents en précisant les causes et les conséquences	Le texte est bien structuré, la syntaxe correcte, sans fautes d'orthographe et fait référence explicitement aux documents

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite ou réponse partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents	Absent	Incomplet Des connaissances manquent et/ou des informations n'ont pas été extraites des documents	Complet ou suffisant	
Communication Schéma	Non conforme	Schéma incomplet	Schéma complet mais peu propre/lisible ou non fonctionnel	Schéma complet, propre et fonctionnel

Unité 6

> Éléments de correction

La contraction musculaire au niveau cellulaire et moléculaire



> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et réponse partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents	Absent	Incomplet Des connaissances manquent et/ou des informations n'ont pas été extraites des documents	Complet ou suffisant	
Communication Schéma	Non conforme	Schéma incomplet	Schéma complet mais peu propre/lisible ou non fonctionnel	Schéma complet, propre et fonctionnel

Propositions de parcours « pas-à-pas » pour les unités en tâche complexe

Unité 1

Question 1

Doc. 1 à 3. Montrez que les réflexes myotatiques sont des contractions involontaires liés à l'étirement des muscles

Les réflexes myotatiques sont mis en jeu lors de mouvements qui nous permettent de rester en équilibre. Sur une planche d'équilibre, la flexion du pied provoque l'étirement du triceps sural qui réagit en se contractant : c'est bien l'étirement du muscle qui déclenche la contraction.

Question 2

Doc. 3. Expliquez pourquoi les muscles antagonistes ne peuvent pas se contracter de manière simultanée dans le cadre d'un réflexe myotatique.

Un enregistrement des contractions lors d'un test d'équilibre sur une planche montre que les muscles antagonistes, triceps sural et jambier antérieur ne se contractent pas de manière simultanée : ils se contractent alternativement pour permettre un retour à l'équilibre. Ils permettent des mouvements opposés et leurs contractions simultanées entraîneraient une absence de mouvement.

Question 3

Doc. 4 et 5. Déterminez pourquoi les pertes de fonctions liées à une lésion de la moelle épinière dépendent de la position anatomique de cette lésion.

Selon la zone touchée par la lésion, les pertes de fonctions sont plus ou moins importantes car la liaison nerveuse entre l'organe et le cerveau est coupée. Si la lésion se situe en haut de la moelle épinière, les fonctions motrices des membres supérieurs et inférieurs sont perdues par exemple, alors qu'une lésion plus basse entraîne la perte de la motricité des membres inférieurs uniquement

Question 4

Doc. 6. Indiquez le rôle physiologique du réflexe myotatique et son intérêt médical.

Le réflexe myotatique permet de garder l'équilibre, mais aussi de protéger le muscle d'un étirement trop important. Il permet au médecin de vérifier l'intégrité du système nerveux.

Question 4

Définissez de manière scientifique un réflexe.

Un réflexe est une réponse involontaire et automatique de l'organisme à un stimulus. Le réflexe myotatique est un réflexe de contraction d'un muscle à son propre étirement qui permet de le préserver d'un étirement trop important.

Unité 2

Question 1

Doc. 1. Exploitez les résultats des expériences de section pour déterminer le trajet du message nerveux sensitif. Même question pour le trajet du message moteur.

On voit que la section de la racine dorsale entraîne une perte de la sensibilité : la voie sensitive est donc celle qui, depuis le nerf rachidien, rejoint la moelle épinière via la racine dorsale. De la même manière, la voie motrice voit son trajet emprunter la racine ventrale puisque la section de cette dernière entraîne une perte de motricité sans perte de sensibilité. La section totale du nerf rachidien entraîne une perte de sensibilité et de motricité : les voies motrices et sensitives empruntent donc le nerf rachidien jusqu'au muscle.

Question 2

Doc. 2. Déterminez ce qui différencie la substance blanche et la substance grise au niveau de la moelle épinière.

La substance grise comporte les corps cellulaires des neurones de la moelle épinière. La substance blanche est formée des axones de ces mêmes neurones.

Question 3

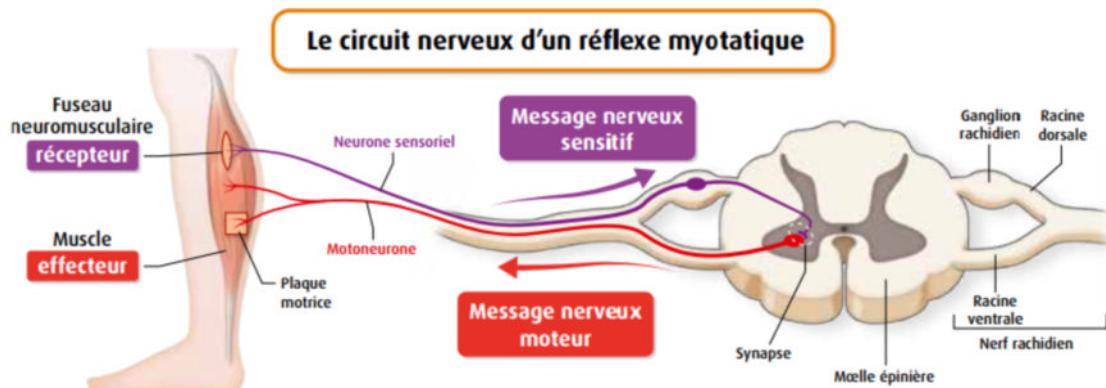
Doc. 1 à 4. Expliquez comment un nerf rachidien peut à la fois transmettre des messages nerveux et sensitifs.

Le nerf rachidien est constitué d'une multitude de fibres nerveuses. Ces fibres nerveuses peuvent être sensitives ou motrices selon la direction de transport du message.

Question 4

Doc. 1 à 6. Réalisez un schéma fonctionnel présentant les différents éléments du circuit nerveux.

Voir schéma bilan page 391 du manuel :



Unité 5

Question 1

Doc. 1 et 2. Indiquez l'intérêt du curare lors d'une anesthésie et proposez un mécanisme d'action de ce médicament.

Le curare permet de paralyser les muscles lors d'une intervention chirurgicale pour éviter les réflexes myotatiques notamment. Le curare bloque la contraction musculaire, il pourrait empêcher la libération d'un neurotransmetteur ou empêcher le neurotransmetteur d'agir.

Question 2

Doc. 3 à 5. Expliquez le rôle de l'acétylcholine dans la contraction musculaire.

L'acétylcholine est libérée par les neurones dans la fente synaptique : c'est un neurotransmetteur. Il vient se fixer sur un récepteur situé sur la membrane de la cellule musculaire afin de déclencher la contraction musculaire.

Question 3

Doc. 4 et 5. Déterminez comment le curare bloque la contraction musculaire en réalisant un schéma de la synapse neuromusculaire en présence et en absence de curare.

Voir plus haut schéma page 11.

Unité 6

Question 1

Doc. 1. Expliquez comment le kinésithérapeute peut provoquer une contraction musculaire lors d'une séance de rééducation.

Le kinésithérapeute peut utiliser des stimulations électriques pour déclencher des contractions musculaires dans le cadre de la rééducation. Cela permet de contracter le muscle sans trop solliciter les articulations.

Question 2

Doc. 2 et 3. Déterminez les ions qui semblent responsable de la contraction musculaire.

On voit que, juste avant la contraction musculaire et juste après la modification du potentiel de membrane, la concentration intracellulaire de calcium augmente. Cette chronologie des événements laisse penser que le calcium joue un rôle dans la contraction musculaire. Le doc. 3 montre que plus la concentration en calcium est proportionnelle au potentiel de membrane, ce qui conforte l'idée précédente.

Question 3

Doc. 4. Déterminez l'origine des ions qui provoquent la contraction musculaire.

Les ions calcium qui provoquent la contraction musculaire proviennent d'une réserve intracellulaire : le réticulum sarcoplasmique.

Question 4

Doc. 5 et 6. Montrez que les récepteurs à la ryanodine jouent un rôle important dans la contraction musculaire.

Le canal calcium permet de libérer le calcium du réticulum sarcoplasmique dans le cytoplasme, ce qui a pour effet de déclencher la contraction musculaire. Ce fait est illustré par les effets d'une mutation de ce canal chez des souris : elle entraîne une diminution de la force de contraction des pattes.

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

Les axones de type I_a et les axones de type II ont au repos une fréquence de potentiel d'action quasi identique. Lors de la phase d'étièvement, la fréquence des potentiels d'action de type I_a augmente puis diminue une fois que le muscle conserve sa taille, tout en gardant une fréquence plus élevée que lors de la phase de repos. Pour les axones de type II, la fréquence des potentiels d'action augmente lorsque l'on étire le muscle et reste identique une fois le muscle étiré.

On peut donc en conclure que les neurones de type II sont sensibles à la longueur du muscle : plus le muscle est allongé et plus la fréquence des potentiels d'action augmente. En revanche, les neurones de type I_a sont sensibles à la longueur du muscle mais aussi à la phase d'étièvement dynamique : la fréquence augmente durant l'étièvement. Ces deux types de neurones permettent donc à l'organisme de déterminer à la fois la longueur du muscle et si ce muscle est en train de subir une élongation.

Exercice 3

Au niveau de l'IRM, on constate une anomalie du côté droit du corps vertébral : on observe une saillie du nucleus propodus. On sait que les nerfs rachidiens sont connectés à la moelle épinière et émergent entre les vertèbres. On peut imaginer qu'un nerf rachidien soit comprimé par cette saillie. Dans ce cas, le message moteur ou le message sensitif pourrait être altéré par cette hernie discale.

Exercice 4

Dans le doc. 2, on constate qu'après injection de Botox, on observe davantage de vésicules au niveau du neurone présynaptique.

Dans le doc. 1, on voit que le neurone présynaptique répond à une stimulation électrique par un potentiel d'action. Un potentiel d'action est aussi visible au niveau post-synaptique. En revanche, 35 minutes après injection de Botox, on constate qu'il n'y a plus de potentiel d'action post-synaptique. On peut donc conclure que l'absence de libération de vésicules de neurotransmetteurs entraîne l'absence de potentiel d'action post-synaptique. Le Botox empêcherait donc la libération des vésicules de neurotransmetteurs.

Exercice 5

Dans le doc. 1, on voit que chez les rats témoins, le potentiel d'action musculaire à la même intensité à la 1^e et à la 200^e stimulation. Chez un rat souffrant de myasthénie, on constate que l'intensité du potentiel d'action musculaire est plus faible lors de la 200^e stimulation que lors de la 1^e, certainement car l'acétylcholine ne peut se fixer correctement sur les récepteurs de la cellule musculaire.

Le doc. 2 nous apprend que l'acétylcholinestérase permet au muscle de se relâcher en transformant l'acétylcholine en acétate + choline. Le médicament utilisé chez les rats atteints de myasthénie permet d'obtenir des potentiels d'actions identiques entre la 1^e et la 200^e stimulation. Ce médicament empêche l'acétylcholinestérase d'agir. Il permet à l'acétylcholine de rester plus longtemps dans la fente synaptique et de provoquer de meilleures contractions musculaires.

Exercice 6

Éléments que l'on peut tirer des documents

L'expérience de Sherrington permet de mesurer la force développée par un muscle lorsque celui-ci est étiré, et ce chez des chats témoins ou des chats dont les nerfs ont été sectionnés. On voit dans le doc.1 que l'étirement du muscle provoque une hausse de la force développée par le muscle chez les animaux témoins. En revanche, chez les animaux dont les nerfs sont sectionnés, la force développée par les muscles après l'étirement augmente de manière beaucoup plus faible.

On sait que l'étirement d'un muscle provoque sa contraction lors d'un réflexe : le réflexe myotatique. Le circuit nerveux nécessite que le message nerveux sensitif créé par l'étirement du muscle atteigne la moelle épinière via un nerf rachidien. De la même manière, le message nerveux moteur qui provoque la contraction est véhiculé par un nerf rachidien. Il faut donc que les nerfs rachidiens soient intacts pour que le muscle réagisse à l'étirement.

Exercice 7

Éléments que l'on peut tirer des documents

Les souris atteintes de neuropathie diabétiques ont un nombre moyen de glissades qui augmente au bout de 10 semaines comparativement aux souris non diabétiques, qui voient leurs nombres de glissades baisser. L'imagerie du fuseau musculaire de ces souris diabétiques nous montre que le prolongement du neurone qui entoure la fibre musculaire apparaît plus mince ou plus épais que celui de souris non diabétiques. Ainsi, le diabète entraîne des modifications au niveau de la terminaison du neurone sensoriel qui sont elles-mêmes associées à des troubles lors de la marche. Cela explique pourquoi chez les diabétiques, des déficits nerveux peuvent entraîner des chutes.

Exercice 8

Lorsqu'un nerf est pincé entre deux vertèbres, des lésions peuvent apparaître. On s'intéressera ici aux conséquences de ces lésions puis nous verrons si une récupération est possible.

Le doc. 2 nous montre que chez une souris ayant subi une lésion du nerf sciatique, le nombre de glissades lors d'un test d'équilibre sur une poutre augmente de manière importante une heure après la lésion : on passe de 0 glissade à 7 glissades lors du test. On constate aussi qu'après la lésion, le pourcentage des fuseaux neuromusculaires associés à des axones sensoriels du nerf sciatique diminue à 30 % jusqu'à devenir nul au 5^e jour après la lésion (doc. 3). On voit d'ailleurs dans le doc. 4 qu'aucun axone ne s'enroule autour des fibres musculaires le 5^e jour alors que c'était le cas avant la lésion. Ainsi, la lésion du nerf sciatique entraîne une disparition des fibres nerveuses sensitives qui forment le fuseau musculaire autour du muscle.

Au bout de 15 jours cependant, la fibre musculaire est de nouveau entourée d'une fibre nerveuse (doc. 4) et le pourcentage de fuseaux musculaires associés à des axones sensoriels est de l'ordre de 90%. Dans le même temps, le nombre de glissades diminue régulièrement et devient inférieur à une glissade en moyenne au bout de 15 jours. On en déduit que la souris a récupéré ses fonctions sensorielles au bout de 15 jours.

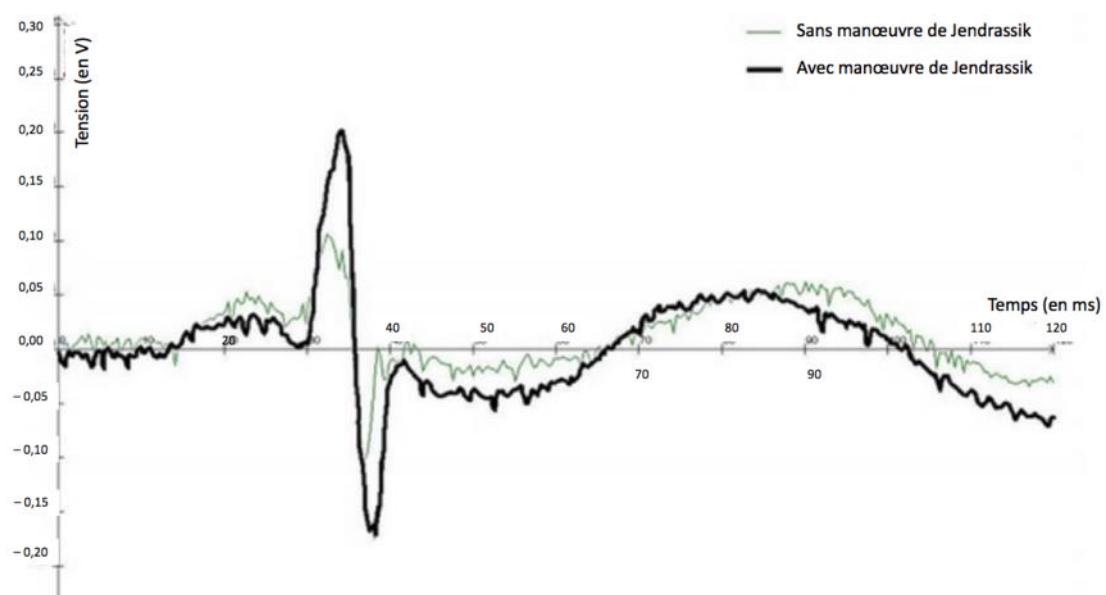
On peut conclure que les lésions nerveuses liées au pincement du nerf sont réversibles au bout de 15 jours.

Exercice 9

Stratégie de résolution

Pour vérifier que la manœuvre de Jendrassik permet d'améliorer la sensibilité du test de réflexe achilléen, il faut mesurer la réponse électrique du muscle à l'aide d'électrodes placées sur le muscle qui subira un étirement par choc sur le tendon. L'intensité de la réponse sera enregistrée selon deux conditions : sans manœuvre (condition témoin) et avec manœuvre de Jendrassik. Si l'hypothèse est valide et que la manœuvre est efficace, on devrait observer une plus forte réponse lorsque la manœuvre est effectuée.

Résultats



Exploitation des résultats

On observe que l'intensité de la réponse est plus importante lorsque la manœuvre de Jendrassik est effectuée par rapport à la situation où elle n'est pas réalisée. On sait que la manœuvre de Jendrassik permet de relâcher les muscles de l'organisme non sollicités par la manœuvre et donc ceux des membres inférieurs. On en déduit que le relâchement provoqué par la manœuvre de Jendrassik permet d'obtenir une réponse plus importante du muscle et d'améliorer la sensibilité du test.

Chapitre 16. Le cerveau : son rôle dans les mouvements volontaire et sa fragilité

À la suite des mouvements réflexes vus dans le chapitre 15, le chapitre 16 est consacré tout d'abord à l'étude du rôle du cerveau dans la commande des mouvements volontaires. Ce chapitre aborde également un certain nombre de dysfonctionnements du système nerveux central et le mode d'action des substances exogènes sur cet organe fragile.

THEME 5 Corps humain et santé	
Connaissances	Capacités, attitudes
<p>Le cerveau est composé de neurones et de cellules gliales assurant le bon fonctionnement de l'ensemble. > Unité 2</p> <p>L'exploration du cortex cérébral permet de situer les aires motrices spécialisées à l'origine des mouvements volontaires. > Unités 1 et 4</p> <p>Les messages nerveux moteurs qui partent du cerveau cheminent par des faisceaux de neurones qui « descendant » dans la moelle jusqu'aux neurones moteurs. Le corps cellulaire du neurone-moteur reçoit des informations diverses qu'il intègre sous la forme d'un message moteur unique et chaque fibre musculaire reçoit le message d'un seul neurone moteur. > Unité 3</p> <p>Certains dysfonctionnements du système nerveux modifient le comportement et ont des conséquences sur la santé. > Unité 5</p> <p>L'apprentissage ou la récupération de la fonction cérébrale après un accident reposent sur une capacité essentielle : la plasticité cérébrale. > Unité 4</p>	<p>Observer au microscope des coupes de système nerveux central et/ou extraire, exploiter des informations sur le rôle des cellules gliales. > Unité 2</p> <p>Utiliser un logiciel de visualisation et/ou extraire et exploiter des informations, notamment à partir d'IRMf, afin de caractériser les aires motrices cérébrales. > Unités 1 et 4, activités expérimentales</p> <p>Recenser, extraire et exploiter des informations permettant de : comprendre et prévenir certains dysfonctionnements nerveux (par exemple : accident vasculaire cérébral, maladies neurodégénératives, infections virales...) ; mettre en évidence la plasticité du cortex à partir de situations d'apprentissages ou de récupération post-dysfonctionnement. > Unité 4</p>
<p>Les aires corticales communiquent entre elles par des voies neuronales où se propagent des potentiels d'action dont la fréquence d'émission est modulée par un ensemble de neurotransmetteurs. > Unité 5</p> <p>La prise de substances exogènes (alcool, drogues) peut entraîner la perturbation des messages nerveux et provoquer des comportements addictifs. > Unité 5</p>	<p>Extraire des informations pour comprendre certains comportements addictifs face à des molécules exogènes. > Unité 5, activités expérimentales</p> <p>Utiliser un logiciel de modélisation et visualisation moléculaire pour comparer neurotransmetteurs et molécules exogènes. > Unité 5, activités expérimentales</p>

Compétences travaillées (et quelques capacités associées)	Place dans le chapitre
<p>Pratiquer des démarches scientifiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Formuler et résoudre une question ou un problème scientifique. • Observer, questionner, formuler une hypothèse, en déduire ses conséquences testables ou vérifiables, expérimenter, raisonner avec rigueur, modéliser, argumenter. • Interpréter des résultats et en tirer des conclusions. • Discerner, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exercice 8 • Unité 1, exercices 3 et 4 • Unité 1, exercice 2 • Unité 4
<p>Concevoir, créer, réaliser</p> <ul style="list-style-type: none"> • Concevoir et mettre en œuvre un protocole. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exercice 9
<p>Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Planifier et organiser son travail. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exercice 9
<p>Pratiquer des langages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant. • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique. • Utiliser des logiciels d'acquisition, de simulation et de traitement de données 	<ul style="list-style-type: none"> • Exercices 5 et 6 • Unités 2 et 3 • Unité 5, activités pratiques
<p>Adopter un comportement éthique et responsable</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fonder sur des arguments scientifiques ses choix de comportement vis-à-vis de la santé. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 5

Choix pédagogiques

Ce chapitre a plusieurs objectifs :

- montrer l'existence d'une commande corticale du mouvement, notion abordée dans les **unités 1, 3 et 4** ;
- étudier un exemple de dysfonctionnement du système nerveux, dans l'**unité 2**. Comme suggéré dans les instructions officielles, un seul exemple est abordé avec la sclérose en plaque ;
- expliquer le mode d'action des substances exogènes et le rôle du circuit de récompense dans l'apparition des dépendances, ce qui est l'objet de l'**unité 5**.

Unité 1

- > L'unité 1 permet d'aborder le contrôle de la motricité volontaire par le cerveau. Comme souvent en physiologie, c'est l'absence de contrôle volontaire par destruction de l'organe qui permet ici de mettre en évidence le rôle des aires corticales. Le principe de l'IRM anatomique et fonctionnelle est expliquée dans le **document 1** étant donné l'importance de cette méthode d'imagerie dans la suite du chapitre.
- > Un cas classique d'accident vasculaire cérébral est ainsi proposé dans le **document 2**, exemple qui pourra être traité sous forme d'activité pratique avec le logiciel Éduanatomist. L'occlusion de l'artère sylvienne est ici à l'origine de la destruction d'une partie des neurones du cortex cérébral du côté gauche. Les signes cliniques (paralysie du côté droit) permettent ainsi de formuler une hypothèse sur l'hémisphère cérébral contrôlant la partie droite du corps.
- > Cette hypothèse pourra être testée à l'aide du **document 3**, qui présente la localisation de l'aire cérébrale impliquée dans les mouvements de la main gauche. Ce document pourra une nouvelle fois facilement être remplacé par une étude via le logiciel Éduanatomist. Il peut également être complété par l'**activité expérimentale** p. 410.
- > Le **document 4** présente des données obtenues par stimulation transcrânienne ou par stimulation directe concernant les aires corticales contrôlant les mouvements, qui complètent les données obtenues par IRM du document 3.
- > Enfin le **document 5** propose une carte motrice complète et le célèbre homunculus moteur. Il est intéressant de faire remarquer aux élèves la part importante des aires cérébrales contrôlant les mouvements des mains, des lèvres et de la langue et de mettre ces données en parallèle avec ce qui a été observé concernant les particularités de l'espèce humaine au sein des primates et plus largement dans le règne animal.

Unité 2

- > L'unité 2 permet d'aborder à la fois la diversité des cellules du cerveau et le rôle des cellules gliales, et d'étudier un exemple de maladie neurologique : la sclérose en plaque. L'infographie du **document 1** donne des informations sur cette maladie : symptômes, prévalence etc.
- > Le **document 2** présente par une imagerie (IRM) des lésions caractéristiques de la sclérose en plaque. Le **document 3** présente plus en détail ces lésions et permet de mettre en évidence la disparition de la gaine de myéline autour des fibres nerveuses.
- > Le **document 4** présente les différentes cellules gliales présentes dans le cerveau (oligodendrocytes, astrocytes).

- > Le **document 5** montre la discontinuité de la gaine de myéline et les nœuds de Ranvier. Le document 6 montre comment la démyélinisation réduit la vitesse de conduction de l'influx nerveux.
- > Enfin le **document 7** donne des informations sur la maladie et les pistes de recherche d'un traitement de la sclérose en plaque.

Unité 3

- > L'unité 3 a pour objectif d'étudier à la fois le trajet descendant des neurones pyramidaux jusqu'au neurone moteur et de mettre en évidence l'intégration des messages nerveux.
- > Ainsi le **document 1** présente une coupe du cortex où les neurones pyramidaux sont visibles. Cette coupe est complétée par un schéma (**document 2**) présentant le trajet des axones des neurones pyramidaux du cortex cérébral à la moelle épinière. Dans ces deux premiers documents, l'intégration des messages nerveux de différentes origines est évoquée.
- > Dans le **document 3**, on évoque l'existence de différents types de synapses (le fonctionnement des synapses est étudié dans le chapitre 15 en se limitant aux synapses excitatrices). L'effet des synapses excitatrices et inhibitrices sur le potentiel de membrane des neurones post-synaptiques est indiqué. On évoque sans les nommer explicitement les potentiels post-synaptiques excitateurs et inhibiteurs (PPSE et PPSI).
- > Le **document 4** présente des exemples de sommation temporelle et spatiale. Ce document permet de comprendre comment l'arrivée successive ou simultanée de plusieurs trains de potentiel d'action peut modifier le potentiel de membrane jusqu'à atteindre le potentiel seuil.

Unité 4

- > L'unité 4 est centrée sur la plasticité cérébrale. L'exemple choisi permet de comprendre comment l'entraînement permet de modifier les cartes motrices après des heures de pratique, ici de piano.
- > Le **document 1** présente le Français Alexandre Kantorow, lauréat du concours international Tchaïkovski 2019, et la difficulté des morceaux interprétés.
- > Le **document 2** compare l'habileté motrice de non-musiciens et de pianistes professionnels. La mise en parallèle avec le **document 3** permettra de mettre en évidence des modifications cérébrales susceptibles de modifier l'habileté motrice. En effet, ce dernier document montre que la volume de certaines aires cérébrales augmentent avec l'entraînement (aires motrices, associatives et auditives).
- > En plus de l'augmentation des aires cérébrales, on peut également montrer aux élèves avec le **document 4** que l'entraînement augmente l'efficacité des voies motrices.
- > Enfin, pour finir cette unité sur la plasticité cérébrale, l'étude des aires motrices chez des singes ayant subi des amputations accidentelles permet d'observer des modifications des cartes motrices, ce qui démontrer que la plasticité cérébrale ne concerne pas uniquement des situations d'apprentissages.

Unité 5

- > L'unité 5 a un objectif d'éducation à la santé puisqu'elle aborde les effets des substances psychoactives sur le cerveau.
- > Le **document 1** présente un texte expliquant l'évolution de l'humeur en cas de sevrage tabagique. Le **document 2** indique les effets ressentis lors de la première prise de cannabis. Il est important de souligner que de nombreux primo-usagers déclarent avoir ressenti des effets désagréables. Ces deux premiers documents permettent de mettre en évidence les effets néfastes de l'usage de ces substances psychoactives.
- > Le **document 3** montre les effets négatifs de la prise d'alcool sur les performances lors d'une épreuve de mémorisation verbale chez des adolescents. Le risque de dépendance est évoqué dans le **document 4** par un court texte.
- > Les autres documents abordent les mécanismes mise en jeu lors de la dépendance. Le **document 5** avec un rappel sur le circuit de la récompense, déjà vu abordé classe de 2^e. Le **document 6** permet de démontrer que la prise de substances psychoactives (cocaïne, éthanol des boissons alcoolisées, nicotine du tabac, THC du cannabis) entraîne hausse de la libération de dopamine dans le noyau accumbens (circuit de la récompense) et donc un risque de dépendance. Enfin le **document 7** permet de comprendre que la plupart des substances psychoactives (ici la nicotine) peuvent se fixer sur des récepteurs situés sur les neurones de l'aire tegmentale ventrale, elle aussi impliquée dans les circuits de récompense. Ce document est couplé à une **activité expérimentale** (p. 411).

Corrigé des parcours des unités

Unité 1

Question 1

Par IRM, on peut localiser dans l'encéphale du patient souffrant d'une hémiplégie droite. On constate qu'une zone située dans la partie gauche de l'encéphale semble anormale. On constate par ailleurs que l'artère sylvienne gauche semble bouchée, ce qui pourrait être la cause de cette anomalie visible du côté gauche de l'encéphale : privée de sang, une partie des cellules nerveuses ont dégénéré. On peut donc faire l'hypothèse que c'est l'encéphale du côté gauche qui contrôle les mouvements de partie droite du corps.

Question 2

Dans le doc. 3, on mesure l'activité cérébrale d'un patient réalisant des mouvements de la main gauche. On constate que la zone active se situe dans la partie droite de l'encéphale. L'hypothèse est donc vérifiée. On voit aussi que chaque zone de l'encéphale contrôle des mouvements précis : des stimulations électriques au travers de la boîte crânienne permettent de déclencher des mouvements du pouce, de l'avant-bras ou de l'œil selon la zone cérébrale stimulée.

Question 3

Le cerveau contrôle les mouvements du corps grâce à des neurones situés dans une zone du cortex cérébral que l'on nomme le cortex moteur (doc. 5). La taille de ces zones corticales n'est pas proportionnelle à la taille des organes : de grandes zones contrôlent les mouvements des mains et de la bouche par exemple. En cas de lésion d'une partie du cortex moteur, les mouvements contrôlés par ces neurones deviennent impossibles. Enfin, l'encéphale du côté droit contrôle la partie gauche du corps et vice versa.

Unité 2

> Éléments de correction

Le système nerveux comporte des cellules nerveuses et également d'autres cellules dites gliales. Les cellules nerveuses sont les neurones et les cellules gliales sont les oligodendrocytes et les astrocytes. Les oligodendrocytes forment une gaine de myéline autour des axones des cellules nerveuses (doc. 5).

Cette gaine joue un rôle dans la transmission du message nerveux puisque sa destruction entraîne une baisse de la vitesse de sa conduction (doc. 6). Chez les personnes atteintes de sclérose en plaque, la gaine de myéline autour des fibres nerveuses est détruite (doc. 3) ce qui entraîne des symptômes tels que des troubles moteurs et cognitifs (doc. 1). La sclérose en plaque tire son nom des plaques visibles à l'IRM (doc. 2) et qui sont en fait des lésions de la substance blanche ou de la substance grise (doc. 7).

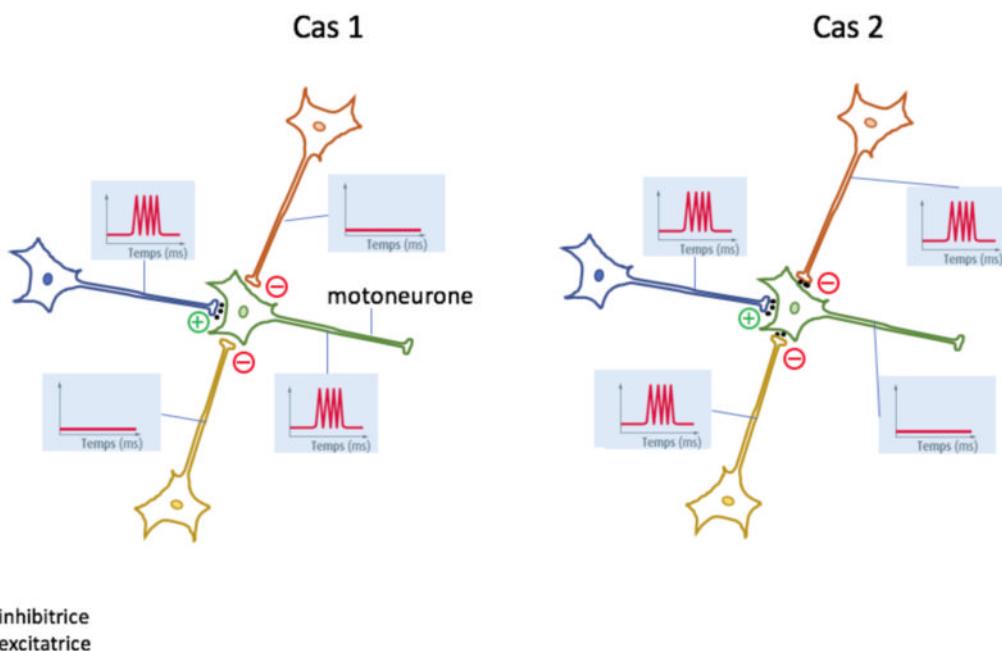
En conclusion, les oligodendrocytes, des cellules gliales, participent à la conduction de l'influx nerveux en fabriquant une gaine de myéline autour des axones. L'absence de cette gaine induit un trouble de la conduction nerveuse et des symptômes nerveux. C'est ce que l'on observe dans la sclérose en plaque.

> Support à l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et réponse partielle à la question posée	Démarche pertinente mais maladroite	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet Des connaissances manquent et/ou des informations n'ont pas été extraites des documents		Complet ou suffisant
Communication Texte	Non conforme	Le texte reprend une partie des documents	Le texte inclut toutes les notions présentées par les documents en précisant les causes et les conséquences	Le texte est bien structuré, la syntaxe correcte, sans fautes d'orthographe et fait référence explicitement aux documents

Unité 3

> Éléments de correction



Intégration de messages nerveux par un motoneurone

> Support à l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite ou réponse partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents	Absent	Incomplet Des connaissances manquent et/ou des informations n'ont pas été extraites des documents	Complet ou suffisant	
Communication Schéma	Non conforme	Schéma incomplet	Schéma complet mais peu propre/lisible ou non fonctionnel	Schéma complet, propre et fonctionnel

Unité 4

> Éléments de correction

Diapositive	Contenu
Introduction	On cherche à montrer que le cortex cérébral se modifie dans certaines situations. On étudiera l'exemple des modifications observées chez les pianistes (doc. 1) et chez des signes ayant subi une amputation accidentelle (doc. 5)
Une plus grande habilité chez les pianistes...	On constate que les pianistes possèdent une plus grande habileté motrice que les non-pianistes (doc. 2) et que leurs voies motrices sont également plus efficaces (doc. 4).
...liée à des modifications du cortex moteur	On voit que le cortex moteur des pianistes diffère de celui des non-pianistes : le volume de certaines aires cérébrales est plus important chez les pianistes comme par exemple l'aire auditive, l'aire motrice et l'aire associative (doc. 3).
Des modifications après une amputation	Le cortex moteur se réorganise également lors d'accident de type amputation : les zones qui contrôlaient le membre amputé sont réaffectées à d'autres fonctions (doc. 5)
Conclusion	L'étude des processus à l'œuvre en situation d'apprentissage ou après un accident montre que le cortex cérébral possède une plasticité.

> Support à l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Exposé	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et réponse partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des connaissances et/ou des documents	Absent	Incomplet Des connaissances manquent et/ou des informations n'ont pas été extraites des documents		Complet ou suffisant
Communication Diaporama accompagnant une présentation orale	Non conforme	Les éléments du diaporama respectent la demande notionnelle de la consigne	Les éléments du diaporama sont conformes aux informations de la double page notionnelle de la consigne	Le diaporama est correctement structuré, un titre est présent sur chaque diapositive.

Unité 5

Question 1

Le doc. 1 montre que la consommation chronique de tabac entraîne des modifications de l'humeur, de l'agitation et de l'anxiété. De la même manière, les consommateurs de cannabis peuvent percevoir des effets désagréables lors de la première utilisation, comme des difficultés de concentration, des difficultés à s'exprimer et des troubles de la mémoire ou des hallucinations visuelles (doc. 2). La mémorisation peut aussi être altérée par la prise d'alcool, et on s'aperçoit que des jeunes consommant de l'alcool régulièrement peuvent obtenir des scores inférieurs à des personnes âgées de plus de 65 ans.

Question 2

Le doc. 5 indique que les substances provoquant une dépendance agissent sur le circuit de la récompense, dont le neurotransmetteur principal est la dopamine. Le doc. 6 montre que la prise de cocaïne, d'alcool, de nicotine (liée à la consommation de tabac) ou de THC (liée à la consommation de cannabis) provoque une libération de dopamine dans le noyau accumbens. On peut supposer que la stimulation de ces neurones active le circuit de la récompense (doc. 5) et entraîne une dépendance. Cette dernière peut avoir des conséquences graves pour la santé et au plan social, professionnel ou scolaire le plan (doc. 4).

Question 3

Le tabac contient de la nicotine qui peut se fixer sur les neurones dopaminergiques du circuit de la récompense (doc. 7). Cette fixation entraîne la libération de dopamine (doc. 6) dans le circuit de récompense (doc. 5). Lorsque la concentration de nicotine baisse, le circuit de récompense n'est plus stimulé ce qui entraîne un état de manque et des symptômes tels qu'une anxiété et une agitation (doc. 1). Les effets néfastes du tabac sur la santé sont considérables (6 millions de morts par an dans le monde ; doc. 1).

Propositions de parcours « pas-à-pas » pour les unités en tâche complexe

Unité 2

Question 1

Doc. 1 à 3. Déterminez l'origine et les conséquences de la sclérose en plaque.

La sclérose en plaque est due à la destruction de la gaine de myéline qui entoure les axones des neurones. Cela a pour conséquences des troubles nerveux comme des troubles de la marche, de l'équilibre, des troubles visuels, etc.

Question 2

Doc. 4. Montrez que le système nerveux n'est pas constitué uniquement de cellules nerveuses.

Le système nerveux est constitué de neurones mais aussi de cellules gliales comme les oligodendrocytes et les astrocytes qui sont quatre fois plus nombreuses que les cellules nerveuses.

Question 3

Doc. 5 à 7. Indiquez le rôle que joue la myéline dans la transmission du message nerveux.

La myéline permet d'augmenter la vitesse de conduction de l'influx nerveux en formant une gaine autour des axones des neurones.

Question 4

En conclusion, montrez que les neurones ne sont pas les seules cellules impliquées dans la conduction du message nerveux.

Les cellules gliales participent elles aussi à la conduction des messages nerveux comme par exemple les oligodendrocytes qui forment la gaine de myéline autour des axones.

Unité 3

Question 1

Doc. 1 à 3. Illustrez l'intégration d'un message nerveux dans le cas d'un motoneurone de la moelle épinière.

Les cellules nerveuses communiquent entre elles et reçoivent parfois plusieurs informations. L'intégration des messages nerveux consiste pour une cellule nerveuse à émettre ou non un message nerveux en fonction des autres messages qu'elle reçoit. Cette intégration peut avoir lieu par exemple dans le cortex moteur ou au départ des motoneurones dans la moelle épinière.

Question 2

Doc. 3. Indiquez l'effet de l'arrivée d'un potentiel d'action sur le potentiel de membrane des cellules post-synaptiques dans les deux types de synapses.

Dans les synapses excitatrices, l'arrivée d'un potentiel d'action entraîne une hausse de potentiel de membrane et qui peut amener à la formation d'un potentiel d'action. Dans les cellules excitatrices, au contraire, le potentiel de membrane est diminué ce qui ne provoque pas de potentiel d'action.

Question 3

Doc. 4. Expliquez dans quelles conditions le potentiel de membrane de la cellule post-synaptique peut dépasser la valeur seuil.

La valeur seuil, c'est-à-dire la valeur à partir de laquelle un potentiel d'action est déclenché, peut être dépassée si plusieurs messages nerveux excitateurs arrivent au même moment : la hausse de potentiel d'action qui en résulte est additionnée, c'est la sommation spatiale. Le seuil peut aussi être atteint lorsque des messages nerveux excitateurs arrivent de manière successive mais rapprochée : la hausse de potentiel d'action qui en résulte est additionnée, c'est la sommation temporelle. Si des messages à la fois inhibiteurs et excitateurs parviennent de façon simultanée ou rapprochée, la hausse et la baisse de potentiel de membrane associée à chacun est additionnée, dans le temps et dans l'espace. Il peut en résulter une hausse de potentiel de membrane supérieure à la valeur seuil.

Unité 4

Question 1

Doc. 1 et 2. Montrez que les pianistes possèdent une plus grande habileté motrice que les non-pianistes. Formulez une hypothèse permettant d'expliquer cette observation.

On constate dans le doc. 2 que les pianistes ont des temps de réponse plus faible que les non-pianistes dans la réussite du test de motricité. On peut supposer que la pratique du piano leur a permis d'acquérir une plus grande habileté motrice.

Question 2

Doc. 3 et 4. Indiquez comment la pratique du piano modifie le système nerveux.

La pratique du piano a entraîné chez les pratiquants une hausse du volume de certaines aires cérébrales : aires auditives, aires motrices et aires associatives. Les voies motrices (doc. 4) sont également améliorées chez les pianistes puisque l'électromyogramme montre une plus forte amplitude chez les musiciens après une stimulation du cortex moteur associé au mouvement du pouce. Ces modifications entraînent une plus grande habileté motrice des musiciens.

Question 3

Doc. 5. Comparez les cartes motrices des singes macaques ayant subi une amputation de la patte antérieure avec les singes témoins. Justifiez alors le terme de plasticité cérébrale utilisé pour décrire ce phénomène.

La carte motrice des singes amputés montre que des zones cérébrales initialement affectées aux mouvements de la main vont être réaffectées pour contrôler les mouvements d'autres parties du corps comme le moignon. Ce remodelage du cerveau montre que cet organe est plastique, d'où le terme de plasticité cérébrale.

Corrigés des exercices

Exercice 2

Piano et main dominante

1. Le doc. 1 montre que chez les pianistes et les non-pianistes, le temps pour réaliser un test de dextérité de la main droite est quasi identique. En revanche, les pianistes réalisent le test de dextérité de la main gauche un peu plus rapidement que les non-pianistes.
2. Le cortex moteur des non-pianistes montre une asymétrie : la zone qui contrôle les mouvements de la main droite (cortex moteur gauche) à une surface plus importante que le cortex droit contrôlant les mouvements de la main gauche. Chez les pianistes, ces deux zones ont une surface quasi identique.
3. On constate que les pianistes contrôlent de manière plus précise les mouvements, notamment de la main non dominante (dans le cas étudié, il s'agit de la main gauche car tous les pianistes et non-pianistes sont droitiers). Cela pourrait expliquer pourquoi ils réussissent un peu mieux le test de dextérité de la main gauche. On peut penser que cette meilleure dextérité est liée à l'entraînement qui a modifié les cartes motrices par plasticité cérébrale.

Exercice 3

L'amyotrophie spinale

Le doc. 1 montre que la surface occupée par la matière grise chez les patients atteints de SMA est inférieure à la surface occupée chez les témoins quel que soit le niveau de la colonne vertébrale. Cela provient probablement de la dégénérescence des motoneurones évoquée dans le texte.

À l'opposé, les patients atteints de SMA présentent une densité de matière grise supérieure dans la zone cérébrale contrôlant les mouvements (cortex moteur) en comparaison aux témoins. Ainsi, la plus grande surface cérébrale contrôlant les mouvements compense la perte des motoneurones de la moelle épinière.

Exercice 4

Les suites d'un accident vasculaire

On cherche à montrer comment la récupération motrice s'effectue après un AVC ayant entraîné un déficit moteur de la main droite. On voit dans le doc. 1 que la carte motrice des patients deux jours après l'AVC et celle des témoins sont similaires. Dans les deux cas, la zone activée par des mouvements de la main droite est située dans le cortex moteur gauche. En revanche, au bout de 10 jours, on constate que la zone active lors des mouvements de la main droite chez les patients entraîne une activité du côté du cortex moteur droit : il y a une modification de la carte motrice, signe d'une plasticité cérébrale. Cette modification est associée à une récupération partielle des capacités motrices.

Exercice 5

Dépendance et excitabilité synaptique

Éléments de réponse

La prise de molécules exogènes psychoactives comme l'éthanol (alcool), la nicotine (tabac) ou le THC (cannabis) perturbe le fonctionnement de certaines aires corticales (aires du circuit de récompense). Ces aires communiquent entre elles par des voies neuronales. Les molécules psychoactives agissent en induisant la sécrétion accrue de certains neurotransmetteurs comme la dopamine, ce qui peut déclencher un comportement d'addiction.

Le document proposé montre que l'excitabilité synaptique de neurones dopaminergiques est également modifiée en présence de substances psychoactives. En effet, l'excitabilité synaptique est plus importante après l'administration *in vitro* de morphine, de nicotine ou d'éthanol. Cela va entraîner une plus forte réponse de ces neurones et donc une plus forte activité des aires du circuit de récompense.

La consommation de substances psychoactives, outre le risque de dépendances, entraîne des modifications du comportement et des diminutions des capacités cognitives.

Exercice 6

Rôle des astrocytes dans la transmission synaptique

Éléments de réponse

Le cerveau n'est pas uniquement composé de neurones, il contient aussi des cellules gliales. Ces cellules assurent diverses fonctions qui permettent le bon fonctionnement de l'ensemble du système nerveux.

Les oligodendrocytes sont des cellules gliales formant une gaine de myéline autour des axones, ce qui permet d'augmenter la vitesse de conduction des messages nerveux. En cas d'atteinte de cette gaine de myéline, comme dans le cas de la sclérose en plaque, différents troubles apparaissent.

En effet, Le doc. 2 montre que lorsque les astrocytes sont stimulés cela déclenche la libération de certaines molécules dans la fente synaptique. Cette libération de molécules diminue l'efficacité de la transmission synaptique entre deux neurones. Ainsi, l'astrocyte peut moduler l'efficacité de la transmission de messages d'une cellule nerveuse à l'autre en libérant certaines molécules dans les synapses. Les astrocytes sont donc des cellules gliales qui jouent un rôle dans la transmission du message nerveux d'une cellule à l'autre.

Exercice 7

Fumer du cannabis à 14 ans : quels sont les risques pour le cerveau ?

Éléments de réponse

On cherche à déterminer les conséquences de l'usage du cannabis sur le fonctionnement du cerveau. Le doc. 1 montre que plusieurs zones de l'encéphale présentent un plus fort volume de matière grise chez les adolescents ayant fumé une ou deux fois du cannabis par rapport au groupe témoin. Par la suite, on observe que les résultats obtenus à un test de raisonnement dépendent en partie du volume de matière grise. En effet, plus le volume de matière grise est important dans certaines régions est important, plus le score au test de raisonnement est faible. De la même manière, le score au test de dextérité manuelle est inversement proportionnel au volume de matière grise dans certaines zones cérébrales.

Ainsi, les documents montrent que l'usage du cannabis réduit performances cognitives et manuelles chez les adolescents, même après seulement une ou deux prises. Rappelons que le cannabis peut entraîner de plus une dépendance en stimulant les voies dopaminergiques du circuit de récompense.

Exercice 8

Stratégie de résolution :

Pour vérifier si M. T pourra toujours exercer son métier d'écrivain, on va localiser les zones cérébrales utiles à la lecture (aire VWFA) et à l'écriture (aire motrice). On va ensuite comparer la localisation de ces aires avec l'imagerie qui montre la zone lésée chez M. T afin de déterminer si cette lésion va entraîner des déficits dans l'une ou l'autre de ces fonctions.

Exploitation des résultats :

On voit que l'aire visuelle de reconnaissance des mots est située dans l'hémisphère gauche ainsi que l'aire motrice de contrôle des mouvements de la main droite. L'aire motrice de la main gauche est située dans l'hémisphère droit.

On voit que la zone cérébrale touchée est localisée dans l'hémisphère droit. On sait que M.T est gaucher.

On peut en déduire qu'il est donc possible que la fonction d'écriture avec la main gauche soit affectée par cet AVC, mais la fonction de lecture devrait être préservée.

Chapitre 17. Le fonctionnement des cellules musculaires

En lien avec l'étude de la commande nerveuse à l'origine d'un réflexe ou d'un mouvement volontaire (chapitres 15 et 16), on s'intéresse dans le chapitre 17 aux mécanismes de la contraction musculaire produisant ce mouvement, et plus particulièrement aux mécanismes cellulaires, donnant ainsi l'occasion d'enrichir la notion de cellule spécialisée. À partir de données issues d'observations et de modélisations, les élèves explorent les niveaux d'organisation successifs en jeu afin de comprendre les aspects mécaniques de cette contraction, avant d'interroger, par des expérimentations, les voies métaboliques qui permettent de fournir l'énergie, sous forme d'ATP, nécessaire à cette contraction.

Ainsi, dans l'**unité 1**, on part de l'échelle de l'organisme jusqu'à l'échelle de la cellule puis on poursuit dans l'**unité 2** jusqu'à celle de l'unité contractile, le sarcomère. L'**unité 3** permet de comprendre à l'échelle moléculaire le rôle des ions calcium (en lien avec le chapitre 15) et de l'ATP. Dans l'**unité 4**, les élèves remobilisent la notion de matrice extracellulaire vue en seconde à travers l'exemple d'une myopathie. Les différentes voies métaboliques impliquées dans la production d'ATP par oxydation progressive du glucose et la réoxydation des composés réduits sont ensuite abordées successivement et reliées au type d'effort : la glycolyse dans l'**unité 5**, la respiration cellulaire dans l'**unité 6** et la fermentation lactique dans l'**unité 7**. Les conséquences pour la santé de l'usage de produits dopants sont abordées à partir d'un exemple sous la forme d'une préparation à l'**oral du Bac**. Une vigilance particulière est à adopter dans ce chapitre concernant l'identification par l'élève du niveau d'organisation auquel on se place à chaque fois dans les différentes unités.

**Thème 5. Corps humain et santé :
Le fonctionnement des cellules musculaires**

Connaissances	Capacités, attitudes
<p>Le muscle strié est un ensemble de cellules musculaires dites striées, organisées en faisceaux musculaires. Le raccourcissement et l'épaississement des muscles lors de la contraction musculaire permettent le mouvement relatif des deux os auxquels ils sont reliés par des tendons. >Unité 1</p> <p>La cellule musculaire, cellule spécialisée, est caractérisée par un cytosquelette particulier (actine et myosine) permettant le raccourcissement de la cellule. >Unité 2</p> <p>La contraction musculaire nécessite des ions calcium et l'utilisation d'ATP comme source d'énergie. >Unité 3</p> <p>Dans certaines myopathies, la dégénérescence des cellules musculaires est due à un défaut dans les interactions entre les protéines membranaires des cellules et la matrice extracellulaire. >Unité 4</p> <p>L'énergie est apportée sous forme de molécules d'ATP à toutes les cellules. Il n'y a pas de stockage de l'ATP, cette molécule est produite par les cellules à partir de matière organique, notamment le glucose. L'oxydation du glucose comprend la glycolyse (dans le hyaloplasme) puis le cycle de Krebs (dans la mitochondrie) : dans leur ensemble, ces réactions produisent du CO₂ et des composés réduits NADH, H⁺. La chaîne respiratoire mitochondriale permet la réoxydation des composés réduits, par la réduction de dioxygène en eau. Ces réactions conduisent à la production d'ATP qui permet les activités cellulaires. >Unités 5 et 6</p> <p>Il existe une autre voie métabolique dans les cellules musculaires, qui ne nécessite pas d'oxygène et produit beaucoup moins d'ATP. Les métabolismes anaérobie ou aérobie dépendent du type d'effort à fournir. >Unité 7</p> <p>Des substances exogènes peuvent intervenir sur la masse ou le métabolisme musculaire, avec des effets parfois graves sur la santé. >Objectif oral 1</p>	<p>Manipuler, modéliser, recenser, extraire et organiser des informations et/ou manipuler (dissections, maquettes, etc.) pour comprendre le fonctionnement du système musculo-articulaire.</p> <p>Réaliser et/ou observer au microscope optique des préparations de cellules musculaires striées pour enrichir la notion de cellule eucaryote spécialisée. >Unité 1</p> <p>Observer au microscope électronique des préparations de cellules musculaires striées pour enrichir la notion de cellule eucaryote spécialisée.</p> <p>Utiliser un logiciel de modélisation moléculaire (pour observer le pivotement des têtes de myosine. >Unité 2</p> <p>Remobiliser les acquis sur la matrice extracellulaire à travers l'exemple d'une myopathie >Unité 4</p> <p>Réaliser des expérimentations assistées par ordinateur (ExAO) : respiration cellulaire et/ou fermentation.</p> <p>Extraire et organiser des informations pour identifier les différentes voies métaboliques. Localiser les réactions métaboliques nécessaires à la contraction musculaire dans une cellule.</p> <p>>Unités 5, 6 et 7</p> <p>Observer des électronographies de mitochondries. >Unité 6</p> <p>Calculer le rendement en kJ (ou nombre de molécules d'ATP) de la fermentation lactique et de la respiration cellulaire, pour une même quantité de glucose. >Unités 6 et 7</p> <p>Extraire et mettre en relation des informations sur un produit dopant et ses conséquences sur l'organisme >Objectif oral 1</p>

Compétences travaillées et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
Pratiquer des langages <ul style="list-style-type: none"> Utiliser un logiciel de traitement de données Communiquer à l'écrit sous forme d'un texte Communiquer à l'écrit par un schéma Utiliser un logiciel de simulation 	<ul style="list-style-type: none"> Unités 3, 5 et 6 Unités 1, 2 et 5 Unités 1, 6 et 7 Unité 2
Pratiquer des démarches scientifiques <ul style="list-style-type: none"> Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution Interpréter des résultats expérimentaux des données et en tirer des conclusions Observer, expérimenter, calculer 	<ul style="list-style-type: none"> Unités 1, 2, 3, 4 et 6 Unités 3, 5 et 6 Unités 1, 2, 6 et 7
Concevoir, créer, réaliser <ul style="list-style-type: none"> Concevoir et mettre en œuvre un protocole 	<ul style="list-style-type: none"> Unités 5 et 6
Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre <ul style="list-style-type: none"> Identifier les techniques pour garder une trace : faire un poster scientifique 	<ul style="list-style-type: none"> Unité 4
Adopter un comportement éthique et responsable <ul style="list-style-type: none"> Fonder sur des arguments scientifiques ses choix de comportement vis-à-vis de la santé Appliquer des règles de sécurité au laboratoire 	<ul style="list-style-type: none"> Objectif oral 1 Unités 1, 3, 5 et 6

Choix pédagogiques

Unité 1

> Cette première unité permet de rechercher les structures et les mécanismes en jeu à différentes échelles, de l'organisme à la cellule, à partir de données anatomiques, de données microscopiques et de modélisations, en considérant l'état relâché et l'état contracté du muscle. On établit la relation entre mouvement, contraction du muscle et contraction de la cellule musculaire. Cette unité est à mettre en lien avec le chapitre 15 concernant la contraction du muscle suite au message nerveux.

> Le **document 1** permet d'identifier deux groupes de muscles antagonistes en jeu dans des mouvements de flexion (rapprochement entre 2 segments osseux sur le plan sagittal ou repliement d'un membre au niveau d'une articulation) et d'extension (leur éloignement ou son redressement) autour de l'articulation du genou ou de la cheville. C'est le cas par exemple du biceps fémoral, qui permet notamment la flexion de la jambe au niveau du genou, et du quadriceps fémoral qui permet l'extension de la jambe.

Cette étude sommaire d'un écorché peut être complétée et donne l'occasion de prendre conscience que chez l'humain, près de 570 muscles striés squelettiques constituent environ 40 % de la masse corporelle totale (environ 30 kg chez un sujet masculin de 70 kg). Ils sont reliés à 206 os (nombre d'os articulés constants de l'être humain adulte). Dans le détail, on trouve par exemple 170 muscles au niveau de la tête et du cou, environ 200 dans le tronc et une cinquantaine dans chaque membre. Cette approche anatomique donne aussi une idée de la complexité de l'organisation musculaire d'un membre, en amont d'une simplification des structures effectuée dans une modélisation pour mieux comprendre les mécanismes en jeu. De nombreuses illustrations et données sont disponibles en ligne, notamment celles du site *Anatomie humaine* <https://www.anatomie-humaine.com/-Myologie,34-.html> ou encore celles, interactives, du site Zygotebody : <https://www.zygotebody.com/>.

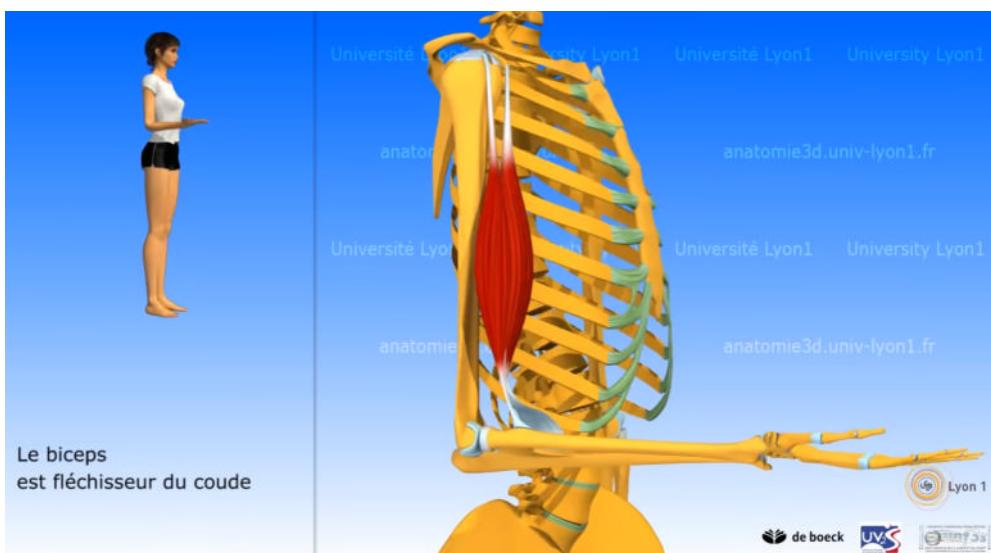
> Le **document 2** présente le résultat d'une telle modélisation pour l'exemple des mouvements de flexion et d'extension de l'avant-bras sur le bras au niveau du coude. Elle permet aussi d'introduire le rôle des tendons, structures permettant aux muscles de s'insérer sur les pièces squelettiques. La simulation d'une flexion de l'avant-bras sur le bras (repliement de 30° ou de 55°) est liée à un raccourcissement du muscle 2 (biceps brachial) et à un allongement du muscle 1 (triceps brachial). On montre ainsi que les muscles, os et articulations sont disposés en leviers : dans la réalité, quand le biceps se raccourcit de 1cm, la main se déplace sur une distance de 7cm. Ce système de levier amplifie la vitesse de raccourcissement du muscle. Un point de vigilance est ici de questionner l'élève sur le sens de la relation de causalité, souvent inversé : ce n'est pas parce qu'on réalise une flexion de l'avant-bras sur le bras que le biceps se raccourcit et grossit mais bien l'inverse (si c'était le cas, il faudrait proposer un autre mécanisme en amont qui permet de faire bouger les os, mais alors avec quelles structures ?). La dissection proposée (ou encore une simulation avec une maquette analogique) peut contribuer à inverser cette conception.

Le document peut être complété avec un autre exemple en lien avec le document 1, montrant que les tendons sont résistants mais présentent une faible élasticité : leur longueur ne varie quasiment pas lors d'un mouvement. Pour un homme d'1 mètre 80, on obtient les valeurs suivantes en moyenne :

	Pied en extension (mouvement)
Triceps sural	Raccourcissement de l'ordre de 12 % (de 43 à 38 cm), « Épaississement » du muscle
Tendon d'Achille	Pas de modification

Modification du triceps sural et du tendon d'Achille lors de l'extension du pied

> L'**activité numérique** proposée permet de mesurer le même type de données avec d'autres angles de repliement. De nombreux exemples de modélisations plus proches de la réalité sont disponibles sur le site *Chaîne Anatomie 3D* (onglet Vidéos) : <https://www.youtube.com/user/Anatomie3DLyon?feature=> de l'Université Lyon 1. On peut reprendre l'exemple des muscles impliqués ici : le biceps brachial <https://www.youtube.com/watch?v=7sVoshhNzbQ>, et le triceps brachial : <https://www.youtube.com/watch?v=T5A9QO9HJ-E>



Capture d'écran d'une vidéo du site Anatomie 3D de l'Université de Lyon 1

> La dissection simple proposée à travers le **document 3** (protocole téléchargeable) a pour objectif d'accéder à la réalité des structures abordées, dans un premier temps aux échelles de l'organe et des tissus. Les relations anatomiques entre muscles, os et tendons (parties blanches nacrées car moins vascularisées que le muscle) sont dégagées et identifiées : il faut donc aller un peu plus loin dans le dégagement des structures que le résultat montré sur la photo du document 3. On observe alors que les tendons relient les muscles aux os. On observe aussi et on questionne la relation intime entre tendons et muscles, ce qui nous emmène au niveau d'organisation cellulaire développé dans les documents suivants.

L'exemple choisi ici respecte la circulaire du Ministère de l'éducation nationale n° 2016-108 du 8-7-2016 concernant les dissections animales en cours de SVT en collège et en lycée. « *Dans le cadre des travaux pratiques de sciences de la vie et de la Terre (SVT) [...], des dissections ne peuvent être réalisées que sur des invertébrés, à l'exception des céphalopodes et sur des vertébrés ou sur des produits issus de vertébrés faisant l'objet d'une commercialisation destinée à l'alimentation. Par conséquent, il n'est plus procédé à des dissections d'animaux morts élevés à seule fin d'expériences scientifiques.* » Il est donc également possible de travailler sur une patte de lapin ou de poulet par exemple.

> Le **document 4** place la cellule musculaire au centre de la « poupée russe » qu'est un muscle. Le muscle extenseur digital choisi ici est un muscle à faisceaux parallèles, d'autres organisations existent (muscles pennés par exemple). Une présentation simple en 3D en est donnée ici (2^e partie de la vidéo) par l'Université de Lyon : <https://www.youtube.com/watch?v=c6PbymeF98c>

On souligne que le programme emploie le terme de cellule musculaire et non pas de fibre musculaire, parfois encore usité par ailleurs. Un lien est à faire avec l'approche historique du concept de cellule abordé en classe de 1^e, en enseignement scientifique. On préfèrera donc le terme de cellule musculaire à celui de fibre musculaire afin de pas entretenir voire engendrer une confusion dans l'esprit de l'élève quant à la question de l'unité élémentaire des organismes, par référence indirecte à la théorie fibrillaire d'Albrecht von Haller, admise par la plupart des grands naturalistes de la seconde moitié du 18^e siècle et du début du 19^e siècle, qui posa la fibre comme élément fondamental commun à tous les êtres vivants.

Cette théorie avait alors accrédité l'idée que ce n'est pas au niveau microscopique de la cellule, observée alors dans certains tissus, mais à un moindre niveau d'analyse (celui de la fibre et du tissu) qu'il faut aller chercher la réponse à la question de l'unité élémentaire des organismes. Depuis la biologie « a trouvé son atome » (F. Jacob) en la théorie cellulaire formulée en deux moments-clés, en 1839 par Schwann et en 1855 par Virchow. Il s'agit là d'un point de vigilance à expliciter à l'élève, la place de la cellule dans cette étude du muscle n'étant pas du tout évidente à priori – du moins à partir de simples observations microscopiques, l'histoire des origines du concept de la cellule en atteste, du fait des structures spécifiques imbriquées en jeu aux différentes échelles.

Dans le même ordre d'idées, on précise la nature cellulaire d'un tendon en réinvestissant la notion de matrice extracellulaire vue en seconde : les cellules musculaires sont accompagnées d'un réseau de cellules conjonctives (les fibroblastes) associées par la matrice extracellulaire. Ces cellules conjonctives fournissent cette matrice extracellulaire en protéines fibrillaires comme le collagène. Les différentes enveloppes de tissu conjonctif se réunissent aux extrémités des muscles pour former les tendons.

> Le **document 5** montre un résultat possible d'une observation microscopique d'un échantillon de muscle d'une patte postérieure de grenouille (protocole téléchargeable). Cette observation peut être faite à partir de la dissection précédente (document 3) ou à partir de préparation du commerce. Plusieurs aspects de la spécialisation de la cellule musculaire sont à relever à cette échelle : grande longueur, nombreux noyaux périphériques, cytoplasme présentant des stries. Encore une fois, il s'agit de bien s'assurer de la bonne identification par les élèves des éléments observés afin de limiter toute confusion (par exemple les noyaux pris pour des cellules).

> Le **document 6** complète les deux documents précédents en introduisant l'aspect fonctionnel de la contraction du muscle à l'échelle cellulaire : un raccourcissement peut être observé et quantifié par comparaison d'une même portion de cellule à l'état relâché et à l'état contracté. Ce constat sera complété par une étude expérimentale dans l'unité suivante. Une courte vidéo peut aussi être fournie, sans faire mention des conditions expérimentales utilisées dans un 1^{er} temps :

<https://www.youtube.com/watch?v=HzP6hYKMVzU>

ou

<https://www.youtube.com/watch?v=W7c1dAOVbw>

Unité 2

> Cette unité propose de rechercher les arguments, à différentes échelles infracellulaires, permettant de soutenir le modèle du mécanisme de la contraction d'une cellule musculaire. Pour ceci, des données obtenues au MET et avec des modélisations moléculaires sont fournies, en considérant à chaque fois l'état relâché et l'état contracté d'une cellule musculaire. On précise ainsi l'organisation particulière du cytoplasme de la cellule musculaire squelettique en s'intéressant aux filaments du cytosquelette qui le constituent afin d'identifier l'unité contractile, le sarcomère.

> Les **documents 1 à 3** permettent de fournir des arguments visant à identifier le sarcomère comme unité de base du modèle du mécanisme de la contraction de la cellule musculaire, tel que présenté de façon simplifiée dans le document 6. Le **document 1**, associant plusieurs électronographies au MET à mettre en lien avec l'électronographie au MEB de l'image d'ouverture du chapitre, permet d'observer la spécialisation du cytoplasme d'une cellule musculaire et de commencer à repérer, en première approche, le sarcomère au sein d'une telle cellule, en tant qu'unité constitutive des myofibrilles, formé de filaments fins et épais et délimité par deux stries Z. Les sarcomères sont responsables de la striation transversale observée en microscopie optique (à partir d'une coupe longitudinale du muscle). Il est important de veiller à ce qu'il n'y ait pas confusion des échelles pour l'élève : encore une fois, le fait de parler de cellule musculaire plutôt de fibre a toute son importance dans cette unité où l'on introduit le terme de myofibrille, structure intracellulaire. La coupe transversale permet de différencier filaments fins et filaments épais.

Des données en microscopie électronique à transmission complémentaires sont disponibles sur le site du *Département de Pathologie de la Faculté de médecine de l'Université de São Paulo* (Brésil) :

<http://anatpat.unicamp.br/bineumusnlme.html>

> La **présentation animée** associée complète le schéma en 3D du document 1 et permet de visualiser aux différentes échelles, les électronographies de coupes longitudinales ou transversales, à l'état contracté ou relâché, en lien avec les représentations schématiques et avec le modèle du mécanisme de la contraction donné dans le document 6. Cette présentation est en anglais, mais c'est surtout les images qui sont à prendre en compte. Attention, le terme de fibre (« fiber ») utilisé dans cette présentation (et de façon assez générale dans d'autres présentations disponibles en ligne) est à associé au terme de cellule musculaire.

> Le **document 2** montre, à partir d'une autre méthode, la succession des sarcomères au sein des myofibrilles en permettant de mettre en évidence les deux principales protéines constitutives, la myosine et l'actine. On comprend ainsi que, comme certaines cellules musculaires mesurent plusieurs centimètres de long, des milliers d'unités sarcomériques doivent s'assembler en longues chaînes périodiques, les myofibrilles, qui couvrent toute la cellule musculaire et relient ainsi mécaniquement deux éléments squelettiques.

> Il est intéressant de faire part à l'élève que les images du document 2, ainsi que celle correspondant à la coupe transversale du document 1 ou encore celle correspondant au détail en 3D d'un sarcomère du document 4, ont été obtenues à partir de muscles de vol de la drosophile. Pour autant ces études fondamentales restent pertinentes pour comprendre la contraction d'un muscle humain du fait que l'organisation structurelle des sarcomères (et donc leurs dimensions), mais aussi leurs composants moléculaires ont été hautement conservés au cours de l'évolution.

Référence : Loison O et al. (2018) « Polarization-resolved microscopy reveals amuscle myosin motor-independent mechanism of molecular actin ordering during sarcomere maturation ». *PLoS Biol* 16(4): e2004718. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2004718>

> Le **document 3** permet de comparer des sarcomères quand la cellule est relâchée et quand elle est contractée (obtenu par congélation rapide en azote liquide). L'étude des différentes électronographies de la page, idéalement complétée avec d'autres exemples fournis par le professeur (voir ressource citée dans le document 1), permet de montrer que les sarcomères sont des unités stéréotypées d'une longueur

d'environ 2,3 µm dans les différentes cellules musculaires relâchées et d'environ 1,7 µm à l'état contracté *in vivo* (voir complément ci-après). On observe également que les filaments épais de myosine conservent leur longueur lorsque le sarcomère se raccourcit, alors que la distance séparant la strie Z du début des filaments épais diminue. À partir d'autres données fournies par le professeur, on peut ajouter que les dimensions du sarcomère ne dépendent pas de la croissance, de la maturation, ou encore du niveau d'entraînement du muscle.

Depuis l'expérience de Gordon et al. en 1966, il est admis que cette longueur optimale, correspondant à la plus grande force développée du muscle au repos, se trouve au voisinage de la longueur de repos L_0 . Elle correspond à la longueur où se fait le plus grand nombre de ponts actine-myosine. Dans un premier temps, ces connaissances sur la dynamique des sarcomères proviennent principalement des études *in vitro* des fibres musculaires et de l'analyse des modèles de diffraction optique obtenus à partir des muscles vivants. Les deux approches impliquent des procédures hautement invasives et aucune ne permet l'examen de sarcomères individuels chez des sujets vivants. Actuellement, aucune technologie n'est encore capable de capturer des données de sarcomères dynamiques adéquates *in vivo*. Ces méthodes telles que la diffraction, l'endoscopie et la tomographie à cohérence optique ont été appliquées au muscle, mais elles sont extrêmement invasives, sensibles aux artefacts de mouvement et / ou imprécises.

> Les documents 4 et 5 permettent de fournir des arguments au modèle du mécanisme de la contraction de la cellule musculaire concernant la relation intime entre les filaments épais et les filaments fins au sein d'un sarcomère, tel que présenté de façon simplifiée dans le document 6. **Le document 4** apporte un premier argument à partir d'une observation au MEB de l'ultrastructure d'un sarcomère (Heuser, 1983) : des liaisons entre filaments épais de myosine et filaments fins d'actine sont observables dans la cellule contractée mais pas lorsqu'elle est relâchée. Ces liaisons sont donc transitoires. Il est également intéressant de signaler à l'élève que la forme et l'orientation de ces liaisons sont fortement affectées par les différentes méthodes de préparation des échantillons : tout comme les modélisations moléculaires proposées, ces électronographies, bien qu'indispensables pour soutenir des éléments du modèle théorique, ne sont pas pour autant une photographie de la disposition *in vivo* de ces structures.

Référence : Heuser, J. E., & Cooke, R. (1983). « Actin-myosin interactions visualized by the quick-freeze, deep-etch replica technique ». *Journal of Molecular Biology*, 169(1), 97–122. doi:10.1016/s0022-2836(83)80177-6

> Le **document 5** ajoute des données moléculaires concernant les molécules de myosine formant le filament épais. Le type de myosine présent dans les cellules musculaires squelettiques est la myosine II. Une molécule de myosine, faite de plusieurs chaînes polypeptidiques, comprend une partie filamentuse (« queue ») et deux parties globulaires (deux « têtes »). La forme particulière de cette protéine peut être décrite et mise en relation avec le document précédent montrant que ce sont deux parties globulaires d'une des extrémités de la molécule de myosine qui assure la liaison entre les filaments fins et épais. Les modélisations moléculaires montrent de plus deux conformations possibles de ces extrémités globulaires des protéines de myosine, se traduisant par un pivotement de 45° vers le centre du sarcomère, fournit un argument supplémentaire au modèle proposé. Ces modélisations sont issues de données cristallographiques (rayons X) provenant de la référence suivante.

Référence : Gourinath, S., Himmel, D. M., Brown, J. H., Reshetnikova, L., Szent-Györgyi, A. G., & Cohen, C. (2003). « Crystal Structure of Scallop Myosin S1 in the Pre-Power Stroke State to 2.6 Å Resolution ». *Structure*, 11(12), 1621–1627. doi:10.1016/j.str.2003.10.013

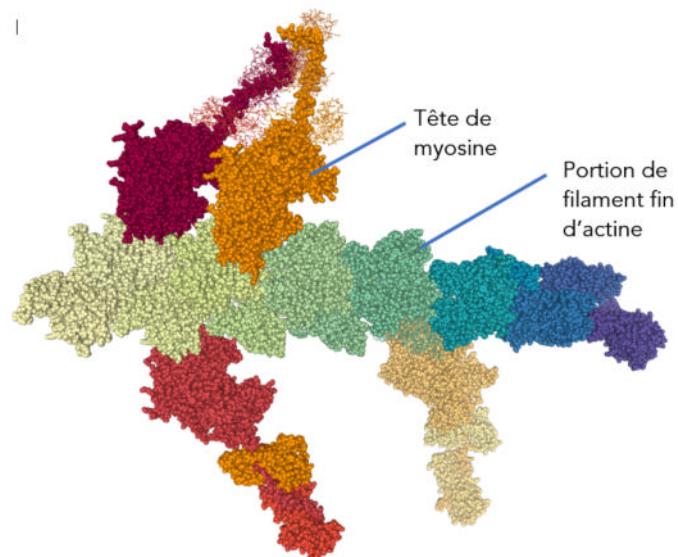
On peut aussi consulter :

Preller, M., & Manstein, D. J. (2013). « Myosin Structure, Allostery, and Mechano-Chemistry ». *Structure*, 21(11), 1911–1922. doi:10.1016/j.str.2013.09.015

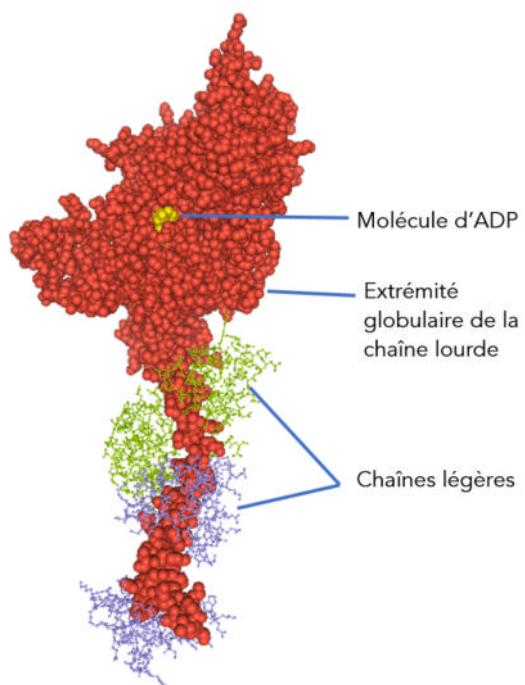
<https://doi.org/10.1016/J.STR.2013.09.015>

> L'**activité numérique** proposée permet de retrouver les données concernant la myosine avec le logiciel de visualisation en ligne Libmol : la myosine y est réduite à sa tête et à deux chaînes légères qui entourent sa base. Elle est présentée dans un état 1 (liaison à l'actine) ou dans un état 2 (détachée de l'actine) ce qui

permet d'illustrer la flexibilité de sa tête en donnant la possibilité d'explorer ces deux portions de molécule sous d'autres représentations ou en mettant en évidence les deux chaînes légères associées à la chaîne lourde au niveau de cette partie globuleuse d'un des dimères. Elle permet aussi d'aller plus loin en explorant une portion de filament fin d'actine avec plusieurs têtes de myosine connectées : chaînes V,W,X,Y,Z,0-9 : actine ; chaînes A,D,G,P : myosine II (têtes de myosine) ; chaînes B,E,H,Q : myosine II (chaîne légère de régulation) ; chaînes C,F,I,R : myosine II (chaîne légère de régulation). Enfin, en transition avec l'unité suivante, il est possible de visualiser une molécule d'ADP fixée sur la tête de myosine.



Modélisation moléculaire d'un filament fin d'actine en liaison avec des têtes de myosine, obtenue avec Libmol.



Modélisation moléculaire d'une tête de myosine, obtenue avec Libmol

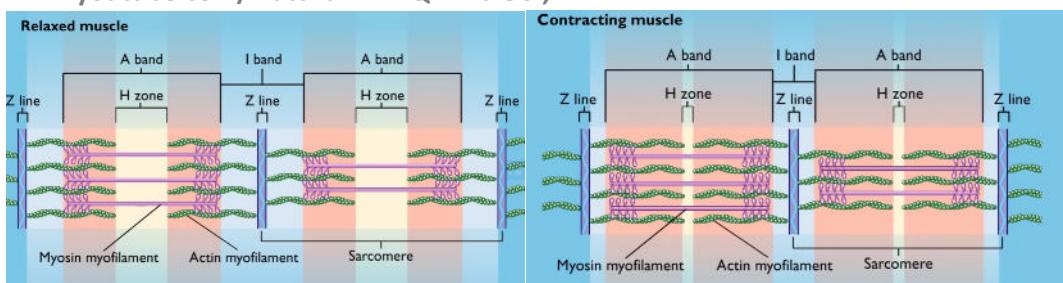
> Le **document 6** constitue le document de référence de cette unité. Il désigne le sarcomère comme unité fonctionnelle de la contraction au sein de la cellule. Il en précise l'organisation dans un plan de coupe longitudinal. Chaque filament fin d'actine est constitué d'un assemblage en double-hélice d'actine globulaire. Chaque filament épais de myosine est formé de plusieurs centaines de molécules de myosine II

disposées parallèlement les unes aux autres au niveau de la bande sombre de chaque sarcomère. Les filaments d'actine sont fixés de part et d'autre des stries Z. Ils sont seuls présents au niveau des bandes claires. Filaments fins et épais se chevauchent partiellement.

Ce modèle explicatif simplifié proposé ici reprend le modèle de glissement des filaments (vs/ leur raccourcissement) élaboré à l'origine par deux équipes de recherches en 1954, Andrew F. Huxley and Rolf Niedergerke de l'Université de Cambridge, d'une part, Hugh Huxley and Jean Hanson du Massachusetts Institute of Technology, d'autre part. Ce modèle a été complété en 1969 par un article de Hugh Huxley publié dans *Science*, qui ajoute que le glissement des filaments se produit par l'attachement et le détachement cycliques de la myosine sur les filaments d'actine. Il est intéressant de noter que les deux articles d'origine, publiés dans le numéro du 22 mai 1954 de la revue scientifique *Nature* sous le thème commun « Changements structurels du muscle pendant la contraction », s'appuient sur des données expérimentales sous-jacentes et des propositions différentes mais ont abouti à des conclusions fondamentalement similaires.

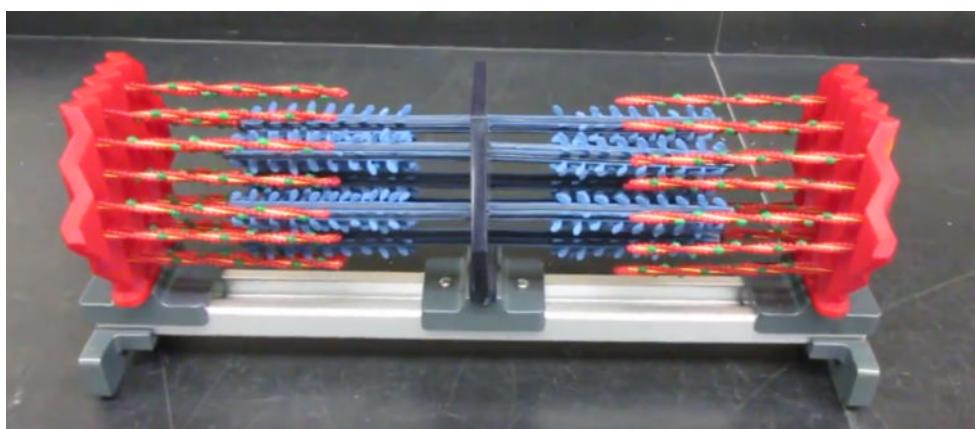
De nombreuses animations de ce modèle sont disponibles sur Internet et permettent une approche dynamique et attrayante. Deux ressources peuvent par exemple être utilement fournies à l'élève afin de compléter la représentation proposée du modèle :

- dans le temps : une animation très proche de ce modèle est présentée dans la vidéo suivante : <https://www.youtube.com/watch?v=NmQiknrbiO0> ;



Capture d'écran. MacGrawHill animations.

- dans l'espace : un modèle 3D est disponible sur le marché afin de visualiser ce mécanisme dans l'espace et est présenté dans la vidéo suivante, suffisante pour le présenter à l'élève : https://www.youtube.com/watch?v=r8I-Z-6_iGs .



Capture d'écran. Dr V AP.

> Remarques

Il est à indiquer à l'élève (comme cela est évoqué dans la légende du document 6) que l'organisation du sarcomère est plus complexe que cette représentation schématique, de nombreuses autres protéines ayant été identifiées ces dernières années.

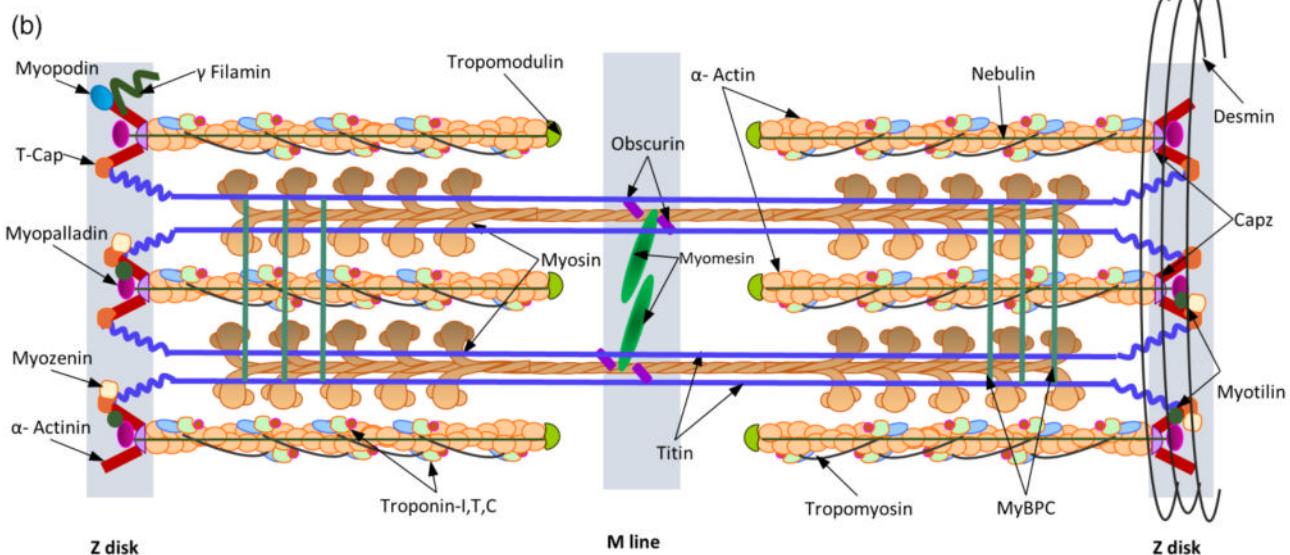
En particulier, dans les filaments fins, l'actine est associée à une protéine fibreuse, la tropomyosine, elle-même liée à la troponine, protéine globulaire formée de 3 sous-unités, dont une qui se lie aux ions calcium (voir unité suivante, doc. 5). Elles assurent le contrôle de la contraction.

La titine, énorme protéine filamentante, longue de 1 µm, est liée, par son bout N-terminal, à une strie Z et par son bout C-terminal à la bande centrale du filament épais (dépourvue de tête de myosine) à laquelle elle est fortement attachée. Ayant des propriétés élastiques remarquables, elle maintient les filaments épais centrés sur le sarcomère et limite l'éirement du sarcomère. Autre protéine géante ($\approx 1\mu\text{m}$ de longueur), la nébuline, est étroitement associée aux filaments fins d'actine et est en interaction avec de nombreuses autres protéines. Elle renforce notamment la probabilité d'attachement des têtes de myosine sur le filament d'actine.

La myomésine est la protéine constitutive de la ligne M qui traverse le centre du sarcomère : elle stabilise les filaments épais de myosine en les reliant ensemble et à la titine.

La strie Z est composée de nombreuses protéines, comme l' α -actinin qui assure le lien entre les filaments fins en les interconnectant entre eux par des ponts moléculaires lâches ou encore la desmine, qui relie les myofibrilles les unes aux autres dans le sarcomère et les fixe d'un côté à la lame basale et de l'autre à la face cytosolique de l'enveloppe nucléaire (ce dernier exemple permet de faire le lien avec l'unité 4).

Ci-dessous un document complémentaire pour illustrer ce point :



Principales protéines impliquées dans la structure du sarcomère

Source : « Mukund, K., & Subramaniam, S. (2019). Skeletal muscle: A review of molecular structure and function, in health and disease. » *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine*. doi:10.1002/wsbm.1462

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wsbm.1462>

On peut aussi se référer à l'article suivant, qui comporte une figure (voir ci-dessus) pouvant être projetée à l'élève pour lui faire prendre conscience de cette complexité :

Szikora et al. (2019). « Nanoscopy reveals the layered organization of the sarcomeric H-zone and I-band complexes. » *The Journal of Cell Biology*. 219. 10.1083/jcb.201907026.

https://pure.mpg.de/rest/items/item_3181824_2/component/file_3181827/content

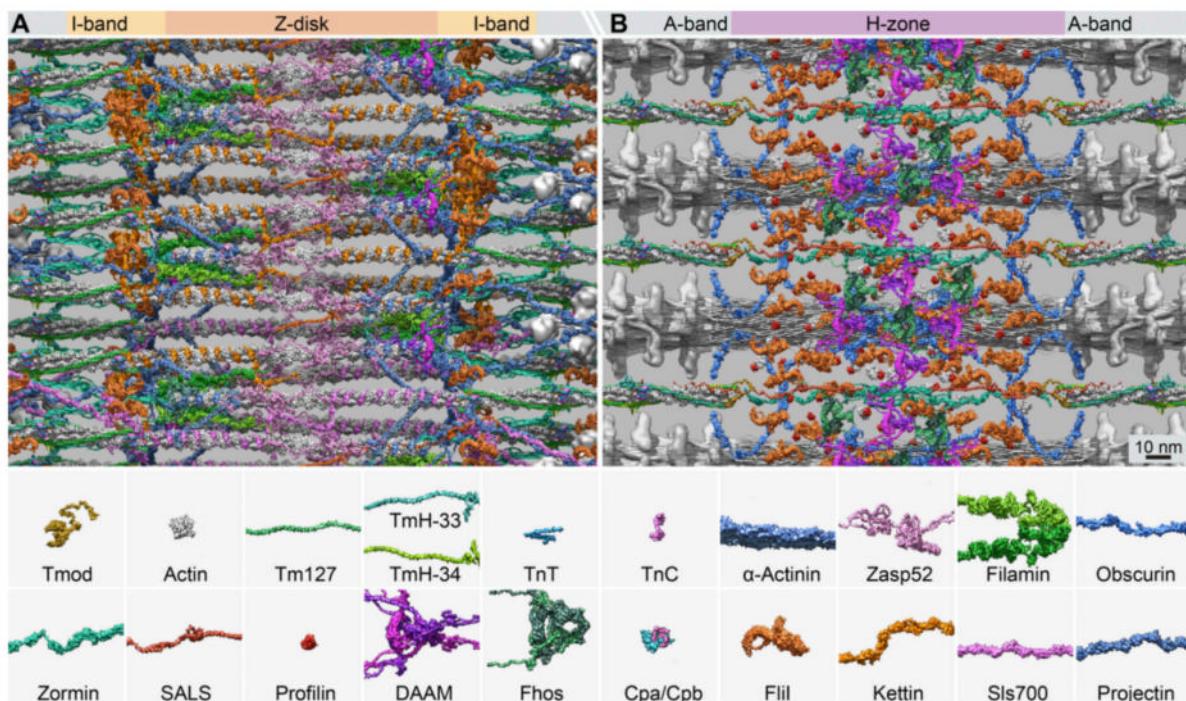


Figure 10. **Molecular model of the I-band and H-zone. (A and B)** A section through the I-band (A) and H-zone (B), indicating 25 proteins. Proteins are shown according to our template-based protein structure modeling and placed according to the localization data presented combined with the known lattice structure of the IFM. The graphical legend at the bottom indicates the different proteins. Scale bar, 10 nm.

Unité 3

> Cette unité s'intéresse aux conditions de fixation des têtes de myosine issues des filaments épais sur les filaments fins d'actine et donc du glissement relatif de ces derniers vers le centre du sarcomère. Le fil directeur est une approche expérimentale permettant de montrer le rôle de l'ATP, molécule-clé de l'énergétique cellulaire, mais aussi celui des ions calcium. Cette unité est à mettre en lien avec le chapitre 15 concernant la contraction du muscle suite au message nerveux.

> Le **document 1** permet d'introduire l'idée que l'ATP est une molécule produite dans toutes les cellules dès le début de la vie embryonnaire. La quantité d'ATP synthétisé ainsi que le niveau d'inhibition de cette synthèse par l'ion cyanure, connu comme poison mortel notamment par paralysie des muscles respiratoires, ont été déterminés pour les embryons de souris à 2 cellules, 4 cellules, 8 cellules, ainsi qu'au stade morula (M) et blastocyste (B). Les résultats montrent que du stade 2 cellules au stade blastocyste tardif, il y a une augmentation de la synthèse d'ATP. La comparaison des résultats expérimentaux montre aussi que l'ion cyanure limite fortement la production d'ATP dans ces cellules embryonnaires.

On pourra se référer à l'article d'origine pour la méthode employée dans le détail. La teneur totale en ATP a été déterminée par un dosage luciférine-luciférase (voir activité associée au document 4). Référence : L. Ginsberg et N. Hillman (1973). « ATP metabolism in cleavage-staged mouse embryos », *Embryol. exp. Morph.* Vol. 30, J, pp. 267-281.

<https://pdfs.semanticscholar.org/04a9/d3a60552a7713bf8a6e1b9c20d1d8e0dd1c1.pdf>

> Le **document 2** permet de mettre en évidence le rôle de l'ATP dans le travail mécanique des cellules musculaires : en présence d'ions calcium, son ajout dans la cellule provoque une contraction prolongée. Il est à noter que l'enregistrement effectué montre un artefact transitoire induit directement par l'impulsion laser (exposition à la lumière 347 nm) et apparaissant comme une diminution de la tension mesurée.

> Dans le **document 3**, l'activité proposée permet aux élèves de tester expérimentalement les conditions nécessaires à la contraction de cellules musculaires de lapin et de crabe. Les raccourcissements observés en présence d'ATP et d'ions calcium exclusivement (photo en bas à gauche et en bas à droite) montrent que la molécule d'ATP et les ions calcium sont nécessaires à la contraction. Des mesures peuvent être réalisées en tenant compte des courbures des échantillons (avec un fil à coudre par exemple ou par mesures successives des différents segments). Des vidéos correspondantes à ces expérimentations sont disponibles.

Cellules musculaires de crabe avec ATP seul : <https://youtu.be/oI1ZMQnfMJ4>

Cellules musculaires de crabe avec ATP+Ca²⁺ : https://youtu.be/zq3a_7oSQC

Cellules musculaires de crabe avec ATP-CN⁻+Ca²⁺: <https://youtu.be/8LcJSvNzSBA>

Cellules musculaires de lapin avec ou sans ATP :

<https://www.youtube.com/watch?v=zgCAJRbUXRs&feature=youtu.be>

> Le **document 4** présente la molécule d'ATP et explique l'apport d'énergie important par hydrolyse de l'ATP. L'ATP, ou adénosine triphosphate, est un nucléotide et se compose d'une base azotée, l'adénine, attachée au carbone d'un sucre à 5 atomes de carbone, le désoxyribose, et une chaîne de trois acides phosphoriques. L'électronégativité permet de caractériser l'influence que possèdent les atomes sur les électrons de la liaison covalente qui les unit. Plus ce différentiel d'électronégativité est grand, plus la liaison est fragilisée (valeurs selon l'échelle de Pauling). De plus, les cellules vivantes maintiennent un rapport de concentrations entre l'ATP et ADP voisin de 5, ce qui est une dizaine d'ordres de grandeur supérieur au rapport de concentration qui s'établit à l'équilibre, où presque tout l'ATP est dissocié en ADP et phosphate. Pour ces raisons, l'hydrolyse de la liaison phosphoanhydride de l'ATP libère de l'énergie. C'est une réaction exergonique. L'ATP permet donc le travail cellulaire en couplant les réactions exergoniques aux réactions endergoniques, qui nécessitent de l'énergie.

Afin de rendre plus parlant l'indication de la valeur de 50kJ libérée par mole d'ATP, on peut réaliser le calcul suivant. On peut estimer que la consommation énergétique moyenne d'un individu est d'environ 8 360 kJoules par 24 heures apportée sous forme de molécules organiques (généralement glucides et lipides). Avant de pouvoir être utilisée par les cellules, cette énergie doit servir à fabriquer de l'ATP. Une partie étant perdue sous forme de chaleur, le rendement de cette synthèse est nécessairement inférieur à 1, de l'ordre de 0,5.

C'est donc environ 4 180 kJoules qui seront fournis aux cellules suite à l'hydrolyse de 83,6 moles d'ATP, soit un peu plus de 42 kg (la masse molaire de l'ATP étant de 507,18 g/mol). Sachant que le stock d'ATP/ADP, pour tout l'organisme, est d'environ 0,1 mole (autour de 50 g), cela implique qu'il soit renouvelé 835 fois par jour, soit approximativement une fois toutes les 1,7 minutes.

Cette valeur est une moyenne pour un organisme et peut être largement inférieure pour une cellule, en cas de très forte demande énergétique (typiquement une cellule musculaire lors d'un effort intense), pour se chiffrer en secondes. Ce calcul est bien sûr fondé sur de nombreuses approximations et le résultat n'est pas à prendre comme un chiffre exact, mais il donne un ordre de grandeur et permet de conclure qualitativement que l'ATP est une molécule possédant un turnover extrêmement rapide (voir introduction de l'unité 5).

> L'**activité pratique** associée au document 4 propose une approche originale de cette molécule essentielle qu'est l'ATP dont les élèves entendent parler tout au long de leur cursus sans jamais constater concrètement son existence. Elle s'appuie sur la bioluminescence, émission de lumière froide par des êtres vivants, ici celui de la luciole. Les produits sont d'un coût raisonnable et l'intensité lumineuse obtenue est suffisante pour qu'un luminomètre peu performant relié à une interface d'acquisition de données (ExAO)

donne de bons résultats. La nécessité de l'ATP dans la réaction de bioluminescence permet par exemple son dosage dans différents tissus ou cellules dont on l'aura extrait.

> Le **document 5** est important car il permet de faire le lien avec le chapitre 15. Il s'agit donc ici de comprendre de façon simple le lien entre augmentation de la concentration en ions calcium suite à un message nerveux et contraction musculaire. On rappelle que les interactions moléculaires entre troponine et tropomyosine ne sont pas attendues dans le détail en classe de terminale. Pour autant, les modèles tridimensionnels d'une portion d'un filament fin d'actine révélés par la microscopie électronique permettent aux élèves d'associer aisément le démasquage d'un site de fixation de la myosine par changement d'organisation de certaines protéines (non citées donc) associées au filament d'actine à la présence ou non d'ions calcium dans le cytoplasme de la cellule musculaire. La fixation de la myosine sur l'actine peut donc se produire aussi longtemps que la concentration en calcium reste élevée, un relâchement étant obtenu par un retour à la concentration initiale. On estime que le temps nécessaire pour ramener le taux de calcium intracellulaire à sa valeur de repos est de l'ordre de 30 ms par pompage actif vers la lumière du réticulum sarcoplasmique par des ATPases calcium-dépendantes appelées SERCA, les canaux calciques à l'origine de la libération se fermant rapidement de plus.

Référence : Wakabayashi T. (2015). « Mechanism of the calcium-regulation of muscle contraction--in pursuit of its structural basis ». *Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and biological sciences*, 91(7), 321–350. <https://doi.org/10.2183/pjab.91.321>

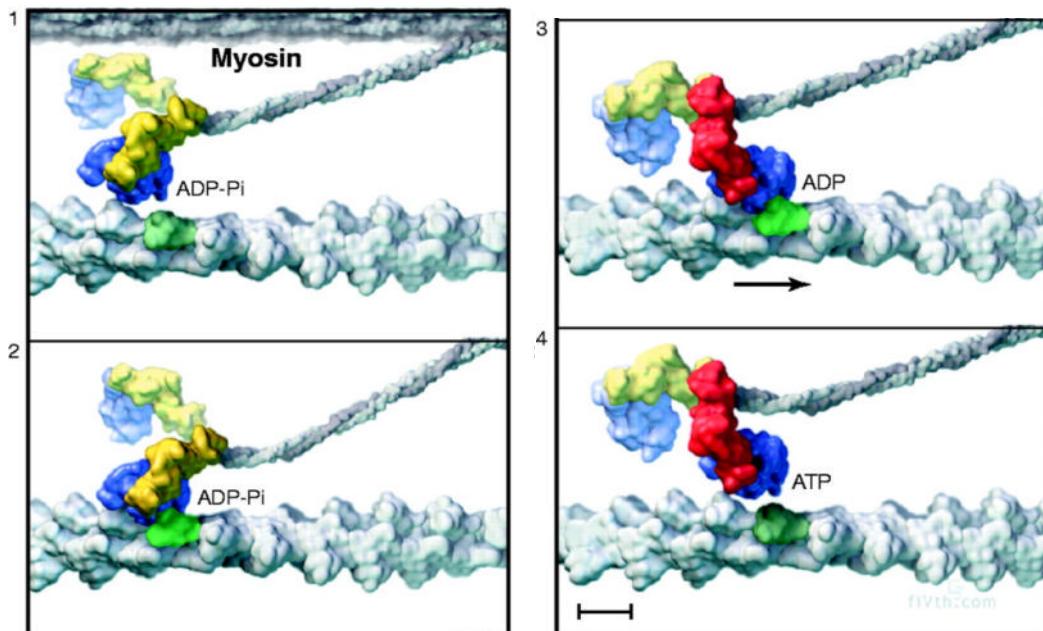
> Le **document 6** présente un modèle possible des mécanismes moléculaires à l'origine de la contraction des cellules musculaires. Il s'agit donc d'un détail du mécanisme présenté dans le document 6 de l'unité 2. Ce modèle permet de montrer comment l'ATP déclenche le détachement de la tête de myosine et de l'actine, et non sa fixation, ce qui peut paraître contre-intuitif. Cette action de l'ATP se fait en plusieurs temps. Lors de l'étape d'activation de la tête de myosine suite à l'hydrolyse de l'ATP, la molécule change de conformation (tête pliée) et, tant que des sites de fixation sont démasqués en présence de calcium, se fixe au filament d'actine. La libération des produits d'hydrolyse de l'ATP s'accompagne d'un nouveau changement de conformation de la myosine qui provoque une traction du filament d'actine vers le centre du sarcomère. La fixation d'une nouvelle molécule d'ATP sur la tête de myosine permet son détachement suite à un nouveau changement de conformation. Cette dernière étape ne pouvant avoir lieu suite à la mort de l'individu, par défaut de production d'ATP, les liaisons entre filaments restent figées, ce qui explique la rigidité cadavérique. On peut de plus signaler que des études cinétiques montrent que cette suite linéaire d'événements ainsi présentée correspond en réalité à l'enchaînement des événements le plus fréquent, mais non exclusif, comme suggéré par le filigrane ajouté dans l'étape de fixation.

C'est donc la succession activation/fixation/phase motrice/séparation qui fait qu'à chaque cycle de contraction, une tête de myosine interagit avec un site de l'actine situé de plus en plus près de la strie Z. Les nombreuses têtes de myosine effectuent chacune pour leur compte des cycles de contraction, si bien que les filaments épais tractent les filaments fins vers le milieu de chaque sarcomère. Comme la même chose se produit à l'autre extrémité du filament de myosine, les deux stries Z se rapprochent, ce qui correspond à un raccourcissement du sarcomère.

Référence : Knupp, & Squire. (2019). « Myosin Cross-Bridge Behaviour in Contracting Muscle—The T1 Curve of Huxley and Simmons (1971) Revisited ». *International Journal of Molecular Sciences*, 20(19), 4892. doi:10.3390/ijms20194892

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31581677>

Des animations 3D sont disponibles dont celle-ci :



http://bam.lab.mcgill.ca/project_pages/pictures/myosin.gif

Figure issue de l'article ; <https://science.science.org/content/sci/288/5463/88/F1.large.jpg>

Référence : Vale, R. D. (2000). « The Way Things Move: Looking Under the Hood of Molecular Motor Proteins ». *Science*, 288(5463), 88–95. doi:10.1126/science.288.5463.88

<https://science.science.org/content/288/5463/88>

Unité 4

> Dans cette unité, on part de l'étude d'un exemple de myopathie, la dystrophie musculaire de Duchenne, pour montrer l'importance des interactions entre protéines membranaires, matrice extracellulaire et filaments des myofibrilles. Au centre d'un tel ensemble, on trouve une molécule essentielle : la dystrophine, une protéine du cytosquelette sous-membranaire. Les acquis de la classe de seconde sur la matrice extracellulaire et ceux de la classe de première sur les mutations sont mobilisés. L'un ou l'autre exemple de pistes thérapeutiques en lien avec ces connaissances fondamentales peut être précisé à partir des liens fournis vers des recherches en cours.

> Le **document 1** introduit l'exemple d'une myopathie étudiée dans cette unité, la dystrophie musculaire de Duchenne (DMD), par une description sommaire de la dégénérescence musculaire caractéristique de cette maladie.

Référence : <https://www.afm-telethon.fr/concerne-par-la-maladie>

> L'interview du **document 2** complète cette description des symptômes à l'échelle des fonctions par un descriptif à l'échelle cellulaire. On comprend que le maintien de l'intégrité de la cellule musculaire est affecté de façon systématique ce qui engendre une régénération importante et continue comme visible sur la microphotographie d'un tissu musculaire d'un malade. Ce processus fini par être remplacé par du tissu conjonctif (fibrose). On trouvera cette image en meilleure résolution sur le site de l'Inserm suivant ainsi qu'un résumé de résultats visant à stopper ce processus de remplacement progressif des fibres musculaires par du tissu fibreux obtenus par l'équipe de Bénédicte Chazaud. Des souris atteintes de dystrophie musculaire de Duchenne ont récupéré plus de 20 % de force musculaire avec une destruction

des fibres musculaires et une création de tissu fibreux qui ont diminué (respectivement – 56 % et – 23 %) et surtout une régénération de fibres musculaires qui a augmenté (+ 38%).

<https://presse.inserm.fr/myopathie-un-gain-de-force-musculaire-chez-la-souris/33116/>

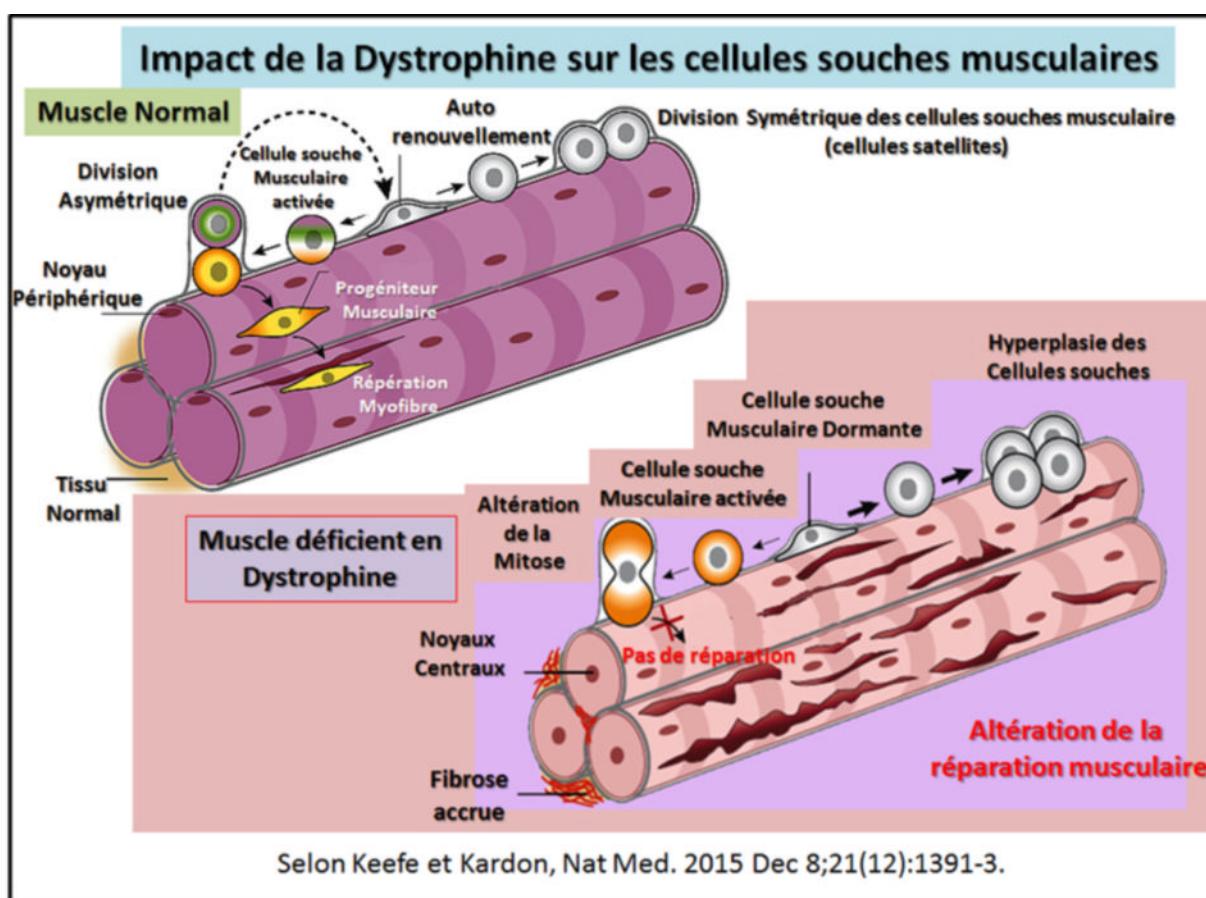
Pour la publication scientifique :

Juban, G., Saclier, M., Yacoub-Youssef, H., Kernou, A., Arnold, L., Boisson, C., ... Chazaud, B. (2018). « AMPK Activation Regulates LTBP4-Dependent TGF- β 1 Secretion by Pro-inflammatory Macrophages and Controls Fibrosis in Duchenne Muscular Dystrophy. » *Cell Reports*, 25(8), 2163–2176.e6. doi:10.1016/j.celrep.2018.10.077

[https://www.cell.com/cell-reports/fulltext/S2211-1247\(18\)31681-4?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2211124718316814%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/cell-reports/fulltext/S2211-1247(18)31681-4?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2211124718316814%3Fshowall%3Dtrue)

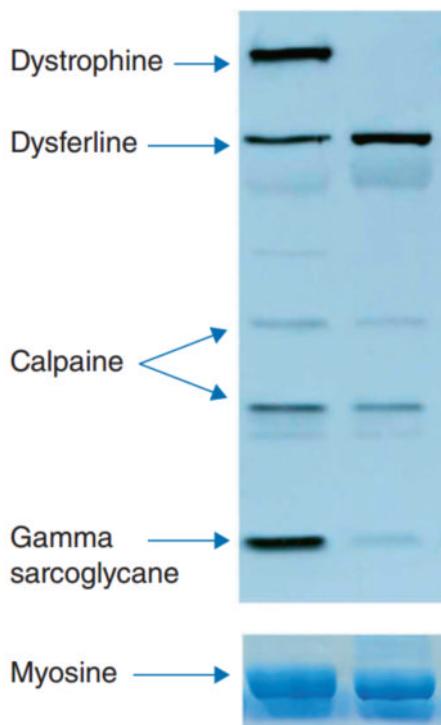
En complément, une autre étude a précisé le rôle de la dystrophine dans le processus de stimulation des cellules souches et le processus de réparation musculaire. Dans le cas de la DMD, les cellules souches musculaires vont finalement rester dormantes et ne pas ou peu participer au processus de réparation. L'illustration suivante reprenant celle de cette étude peut également être mise en lien avec le document 3.

Référence : Keefe, A. C., & Kardon, G. (2015). « A new role for dystrophin in muscle stem cells ». *Nature Medicine*, 21(12), 1391–1393. doi:10.1038/nm.4006



> Le document 3 s'appuie sur une méthode histopathologique (par biopsie musculaire) avec marquage immunohistochimique (fluorescence) de la dystrophine par un anticorps spécifique : les coupes transversales permettent de visualiser la taille des cellules musculaires, plus petites et séparées les unes des autres, et l'absence de dystrophine dans la région subsarcolemmique chez le patient atteint par comparaison avec un individu contrôle. Une illustration 3D qui peut permettre d'illustrer ces deux photos est donnée dans la publication citée précédemment (Keefe, 2015, voir ci-dessus).

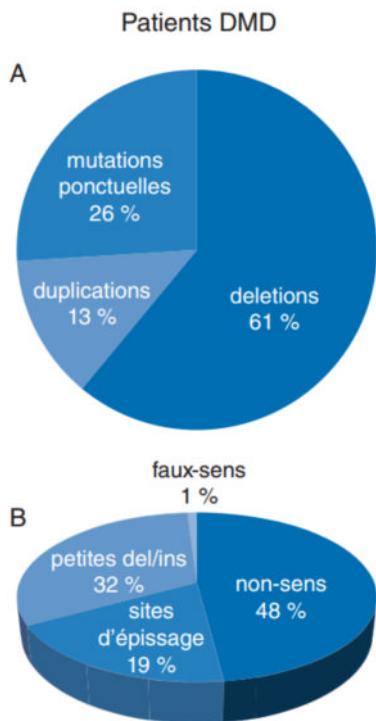
En complément, dans la référence (revue de littérature) donnée ci-dessous, une technique d'électrophorèse associée à des marqueurs spécifiques permet de rechercher la présence de certaines protéines musculaires membranaires et sous-membranaires (individu contrôle à gauche, individu atteint à droite, sans dystrophine, et une diminution secondaire de la gamma-sarcoglycane).



Référence (en français) : Leturcq, F., & Tuffery-Giraud, S. (2015). « Aspects génétiques et moléculaires des dystrophinopathies. » *Archives de Pédiatrie*, 22(12), 12S3–12S11. doi:10.1016/s0929-693x(16)30002-1

> Le **document 4** fournit quelques informations concernant le gène DMD qui code la protéine dystrophine. Les acquis de la classe de première en génétique, particulièrement sur les mutations, sont remobilisés. La localisation de ce gène sur le chromosome X explique le fait qu'elle ne touche que les garçons. Sa transmission se fait sur le mode récessif. De plus la proportion de néo-mutations est particulièrement élevée (un tiers des cas sporadiques de DMD, 1/10 000 gamètes) en raison de la taille exceptionnelle du gène DMD ($2,2 \cdot 10^6$ paires de bases), ce qui en fait le plus long gène humain connu. La durée de la transcription de ce gène immense est estimée à 16 heures. Le transcript de l'isoforme musculaire comporte 79 exons et code pour une protéine pleine longueur de 427 kDa localisée sur la face interne du sarcolemme.

Les mutations du gène DMD sont très hétérogènes. On trouvera des compléments dans la dernière référence citée, comme le diagramme ci-dessous.



> Le **document 5** permet de remobiliser la notion de matrice extracellulaire, un assemblage de molécules qui lie les cellules entre elles et les organise en tissus. Cet assemblage assure notamment la résistance et l'élasticité de la peau. Deux composants essentiels de la matrice extracellulaire sont à repérer : le collagène VI et le perlécan. Une mise en évidence de la laminine $\beta 1$ est également disponible dans la bibliographie ci-dessous. Une microphotographie montrant l'aspect fibrillaire de la matrice extracellulaire et les myofibrilles au niveau d'une cellule musculaire en coupe longitudinale peut servir de document complémentaire (voir référence ci-dessous). Un schéma montrant les différentes molécules impliquées peut être trouvé dans la dernière référence ci-dessous.

Références :

- Images du document 5 : Bovolenta, M., Neri, M., Martoni, E., Urciuolo, A., Sabatelli, P., Fabris, M., ... Gualandi, F. (2010). « Identification of a deep intronic mutation in the COL6A2 gene by a novel custom oligonucleotide CGH array designed to explore allelic and genetic heterogeneity in collagen VI-related myopathies. » *BMC Medical Genetics*, 11(1). doi:10.1186/1471-2350-11-44

<https://bmcmedgenet.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2350-11-44>

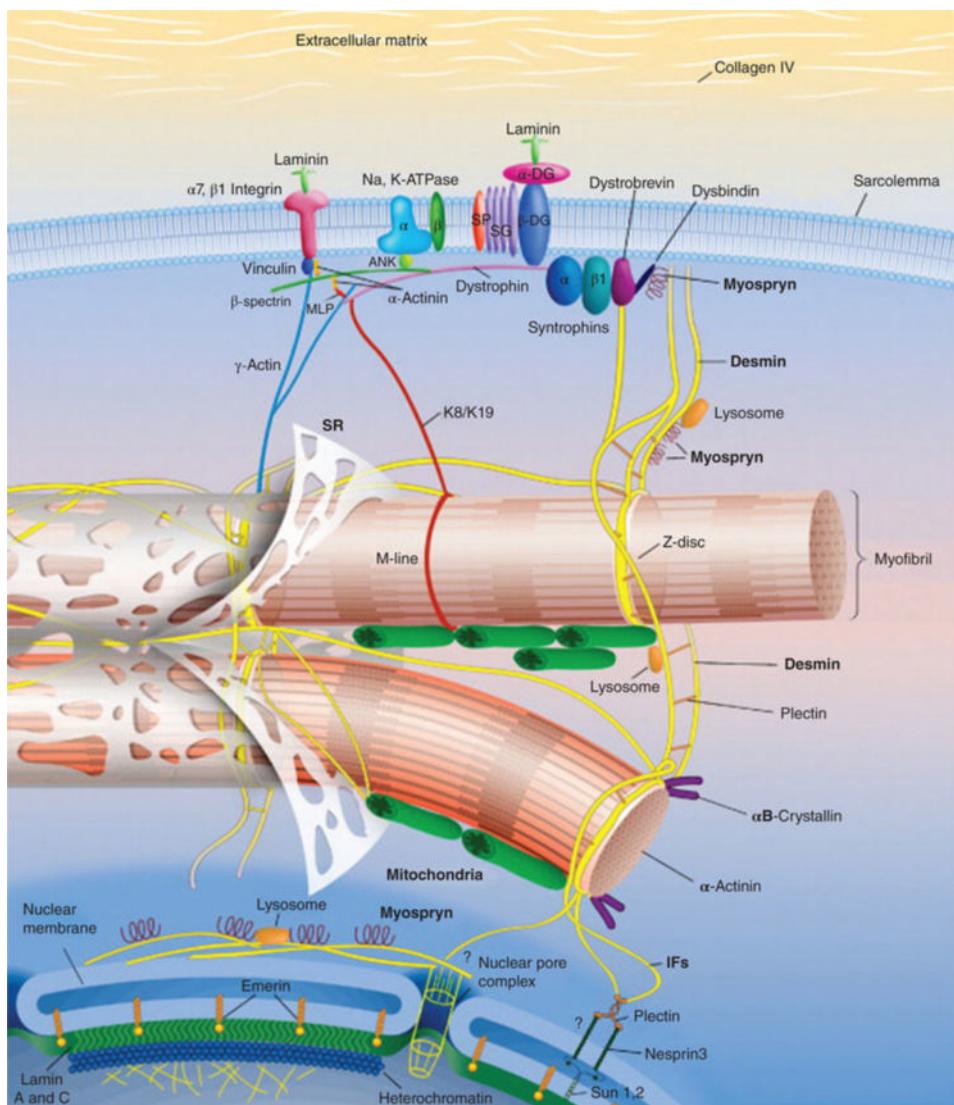
- Microphotographie montrant matrice extracellulaire et myofibrilles au niveau d'une cellule musculaire en coupe longitudinale : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0028237>

- Schéma de la matrice extracellulaire d'une cellule musculaire (voir figure 10 de la revue de littérature ci-dessous) :

Mukund, K., & Subramaniam, S. (2019). « Skeletal muscle: A review of molecular structure and function, in health and disease. » *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine*. doi:10.1002/wsbm.1462

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wsbm.1462>

> Le schéma du **document 6** et les connaissances concernant la notion de matrice extracellulaire permettent de comprendre en première approche que le maintien de l'intégrité de la cellule musculaire nécessite des protéines situées au niveau du sarcolemme. Ces protéines permettront un ancrage et une adhésion structurellement fonctionnels avec les cellules voisines qui également réaliseront une cohésion de la cellule musculaire pour la rendre capable de subir sans rupture les cycles de contraction-relaxation. Ainsi, aussi bien du côté interne cytoplasmique (où se situent les filaments épais qui glissent sur les filaments fins au sein des myofibrilles) que vis-à-vis de l'extérieur et du réseau de collagènes et de laminines qui forment la matrice extracellulaire, il doit y avoir un ensemble de protéines qui conserve flexible et intacte la membrane de la fibre durant les cycles de contractions. Au centre d'un tel ensemble, l'élève peut relever à partir de la représentation possible simplifiée proposée qu'on trouve une molécule essentielle, la dystrophine. Une représentation possible plus complète pourra lui être montrée, toujours dans le souci de montrer qu'un schéma reste une représentation simplifiée d'un modèle explicatif possible (voir référence ci-dessous).



Représentation 3D possible du réseau protéique reliant myofibrilles, filaments intermédiaires, sarcolemme et matrice extracellulaire au sein d'une cellule musculaire squelettique. Le complexe dystrophine-dystroglycane (DG) interagit avec les filaments d'actine du cytosquelette hors myofibrille et les kératines (K8 / K19) reliant ainsi les myofibrilles au sarcolemme. Les filaments intermédiaires (IF), composés principalement de desmine, relient également les myofibrilles (au niveau des stries ou disques Z) aux protéines membranaires et sous-membranaires et à d'autres organites, tels que le noyau, les mitochondries, les lysosomes et potentiellement le réticulum sarcoplasmique (SR). La desmine interagit avec de nombreuses autres protéines. Abréviations : MLP, striated muscle-specific LIM protein ; SG, sarcoglycane.

Source : <https://www.jci.org/articles/view/38027/figure/1>

Références :

- Microphotographie montrant la matrice extracellulaire et myofibrilles au niveau d'une cellule musculaire en coupe longitudinale : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0028237>
- Représentation 3D possible du réseau protéique reliant myofibrilles, filaments intermédiaires, sarcoleme et matrice extracellulaire : <https://www.semanticscholar.org/paper/Overview-of-the-Muscle-Cytoskeleton.-Henderson-Gomez/0a51cf40b63793fd709f0e3bd40621431d32ad64>
- Schéma du réseau protéique subsarcolemmique (voir figure 11 de la revue de littérature ci-dessous) : Mukund, K., & Subramaniam, S. (2019). « Skeletal muscle: A review of molecular structure and function, in health and disease. » *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine.* doi:10.1002/wsbm.1462
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wsbm.1462>

> **Pistes thérapeutiques.** Déetecter et ralentir l'évolution de cette pathologie, offrir une meilleure qualité de vie pour les patients atteints est le but des nombreuses recherches actuelles, qu'elles soient fondamentales ou appliquées. On en trouvera une présentation complète en français, mise à jour régulièrement, et avec de nombreux schémas sur le site du Laboratoire de physiologie et de médecine expérimentale du cœur et des muscles de l'université de Montpellier :

<https://u1046.edu.umontpellier.fr/163-2/abrege-des-proteines-musculaires/la-dystrophie-musculaire-de-duchenne-dmdbmd/>

Des interviews de chercheurs lors des congrès annuels « Myology » de l'Institut de myologie organisé par l'AFM-Téléthon (et présentant notamment des pistes thérapeutiques) donnent un aperçu toujours utile du monde de la science. On peut présenter par exemple aux élèves l'interview réalisée en 2019 d'Olivier Dorchies (Genève, Suisse), qui a montré l'efficacité d'un médicament utilisé dans le cancer pour le traitement de dystrophies musculaires. Des essais cliniques sont en cours en Europe pour la myopathie de Duchenne.

<https://www.afm-telethon.fr/actualites/myology-2019-interviews-video-127192>

<https://youtu.be/Tt9-DFtHDrk>

Unité 5

Dans cette unité, on cherche à comprendre comment le glucose, molécule-clé du métabolisme des organismes vivants, intervient dans la production d'ATP au sein de la cellule musculaire. Pour ceci, on part d'une approche expérimentale du métabolisme énergétique chez d'autres organismes, dans des conditions aérobies (abordé en classe de seconde) mais aussi anaérobies (nouveau), couplée à une approche historique d'une première voie métabolique en jeu : la glycolyse. La notion de voie métabolique abordé en classe de seconde est ici remobilisée ainsi que celle d'enzyme vue en spécialité en première.

> Le **document 1 et l'activité pratique associée** permettent de montrer par une approche expérimentale l'existence de différentes voies cataboliques du glucose que peuvent utiliser certains organismes suivant qu'ils sont ou non présence de dioxygène. Le premier exemple choisi dans le document 1, la bactérie *Zymomonas mobilis*, montre qu'en plus d'utiliser le glucose par la respiration cellulaire en présence de dioxygène, celle-ci peut utiliser une autre voie métabolique en l'absence de dioxygène : la fermentation alcoolique. Le suivi des concentrations de glucose et d'éthanol permet de les différencier. Cet exemple est également intéressant car il permet d'évoquer des recherches concernant le développement de souches industrielles pouvant servir dans la production de biocarburant et de faire le lien avec la transition

énergétique et écologique abordée dans le thème « science, climat et société » en enseignement scientifique.

Le second exemple proposé sous forme d'une **activité pratique** permet de mettre en évidence cette autre voie métabolique chez la levure *Saccharomyces cerevisiae*. Cette dernière activité pratique peut être l'occasion de donner davantage d'autonomie à l'élève afin de se rapprocher des conditions des ECE.

Référence :

Yang, S., Tschaplinski, T.J., Engle, N.L. et al. (2009). « Transcriptomic and metabolomic profiling of Zymomonas mobilis during aerobic and anaerobic fermentations. » *BMC Genomics* 10, 34 <https://doi.org/10.1186/1471-2164-10-34>

> Le **document 2** introduit en première approche une autre voie métabolique possible à partir du glucose dans les cellules musculaires : la fermentation lactique. Elle se caractérise par la production de lactate et est notamment engagée au début d'un exercice physique. On peut postuler que cette voie permet aux cellules musculaires de pallier un approvisionnement en dioxygène insuffisant nécessaire à la voie métabolique de la respiration cellulaire mais aussi d'assurer un apport rapide et massif d'ATP (l'unité 7 donnera l'occasion d'y revenir sur les différentes voies métaboliques en fonction du type d'effort).

Concernant le lactate, une revue de littérature permet de discuter et revoir certaines idées. On a souvent considéré le lactate engendré comme un déchet, un générateur de crampes et autres maux susceptibles de générer de la fatigue, crampes et courbatures, ce qui est faux (voir **exercice 5 p. 447** sur ce point). Outre le fait que le lactate permet la limitation de l'acidose intramusculaire (en favorisant la sortie de protons par les transporteurs de lactate au niveau de la membrane des muscles), Brooks rappelle qu'il est aussi un substrat énergétique pour les fibres lentes, un précurseur pour fabriquer du glucose au niveau du foie, et, il est également une « molécule signal», qui circule dans le corps à travers le sang, permettant ainsi la communication entre les différents tissus, notamment pour les adaptations du métabolisme aérobie (cycle de Cori, voir **exercice bac pp. 518-519**).

Un référence : Brooks GA. « The Science and Translation of Lactate Shuttle Theory. » *Cell Metab.* 2018 Apr 3;27(4):757-785

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29617642>

> Les **documents 3 et 4** proposent une approche historique de la détermination du devenir du glucose dans le cytoplasme, tout particulièrement des cellules musculaires. Les connaissances d'enseignement scientifique concernant la nature de la science sont à mobiliser par l'élève. Cette histoire des idées (voir référence ci-dessous que le professeur pourra consulter au préalable) montre que la recherche des intermédiaires métaboliques fut longue et difficile, du fait notamment de leur nature éphémère mais aussi du fait que certains des composants chimiques avaient été placés dans la mauvaise partie du casse-tête, brouillant l'image globale.

Il est donc particulièrement important de ne pas induire l'idée de marche linéaire vers la connaissance que pourrait suggérer une lecture rapide de cette frise chronologique : on comprend à travers une lecture minutieuse que cette quête a nécessité plusieurs modèles qui ont été en partie réfutés mais aussi de nouveaux modes opératoires, qu'elle a donné lieu à des impasses, des doutes, une confrontation de plusieurs idées, etc.

Certains historiens scientifiques, dont Thomas Kuhn, pensent que le travail des années 1930 dans les laboratoires de Meyerhof, Parnas, Embden, Warburg et quelques autres a été la marque d'une véritable révolution scientifique. À Heidelberg, Meyerhof et ses assistants ont publié plus de 200 articles et joué un rôle central dans la reconstitution du puzzle complexe de la glycolyse. Meyerhof et ses collègues ont été les pionniers de notre compréhension de la façon dont l'énergie est transformée, stockée et libérée biochimiquement pour le travail dans la cellule. La voie glycolytique complète a été élucidée en 1940.

Pour appuyer encore ces éléments de la nature de la science, on peut ajouter encore aux documents 3 et 4 l'une ou l'autre donnée issue de la même référence suivante :

Otto Meyerhof and the Physiology Institute: the Birth of Modern Biochemistry. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2020. Sat. 9 May 2020. <https://www.nobelprize.org/prizes/themes/otto-meyerhof-and-the-physiology-institute-the-birth-of-modern-biochemistry-2>

- 1918 a marqué le premier jalon expérimental dans la carrière de Meyerhof, quand il a montré qu'une coenzyme impliquée dans la production d'acide lactique dans le muscle était la même coenzyme que Harden et Young avaient trouvé impliquée dans la fermentation alcoolique dans la levure. Ce fut aussi une première preuve importante de l'unité dans la vie des processus biologiques fondamentaux.
- Jusqu'au milieu des années 1930, les tentatives de tester des modèles de fermentation alcoolique et de glycolyse avaient le plus souvent démenti les constructions théoriques. On peut citer le démantèlement par Lundsgaard du propre cycle d'acide lactique de Meyerhof. De 1922 aux débuts des années 1930, la plupart des scientifiques, suivant la théorie de Meyerhof, pensaient que l'acide lactique lui-même jouait un rôle dans le mécanisme de la contraction. Dès 1926, Meyerhof a remis en question publiquement la certitude de sa propre théorie avant la plupart des autres scientifiques. Pourtant, en l'absence d'un meilleur modèle (par exemple, le lactocidogène d'Embden, en débat avec le cycle lactique de Meyerhof s'est avéré ne pas être une solution satisfaisante), Meyerhof a continué à soutenir la théorie générale du cycle de l'acide lactique, et une grande partie des efforts de son groupe à la fin des années 1920 ont continué à être dirigés vers le démêlage du rôle de l'acide lactique dans la glycolyse musculaire. En 1930, par une lettre, un physiologiste danois, E. Lundsgaard a déclaré à Meyerhof qu'il avait trouvé des muscles empoisonnés avec de l'acide iodatique contractés sans production d'acide lactique. Venu à Heidelberg, Lundsgaard est resté au laboratoire de Meyerhof pendant plus de six mois en 1930, période pendant laquelle Meyerhof, Lohmann, Lipmann et Blaschko ont travaillé avec lui pour affiner et étendre son travail initial. En 1931, Meyerhof a officiellement abandonné son hypothèse.
- Le défi auquel Meyerhof est confronté à son arrivée à Heidelberg en 1929 était d'identifier les rôles spécifiques joués par chaque composé dans la chaîne complexe d'interactions chimiques qui conduisent à la libération d'énergie qui entraîne la contraction musculaire. Il y avait de nombreuses questions auxquelles il fallait répondre. Par exemple, quelle était la nature chimique de chaque composé ? De quels autres composés le long de la voie dérivaient-ils ? Avec quels composants chacun a-t-il interagir à l'étape suivante du parcours ? Quels nouveaux composés se sont formés ou quels déchets ont été laissés ? Comment le pH et la température ont-ils affecté les réactions ? Quelles enzymes ont déclenché chaque réaction ? Au cours des huit années suivantes, ils ont découvert plus d'un tiers des enzymes de la glycolyse, avec huit autres groupes de recherche se combinant pour trouver le reste. Lohmann, Kiessling, Schuster, Lehmann et Ochoa étaient les plus actifs à l'Institut de physiologie pour identifier, caractériser et purifier partiellement ces enzymes. La relation étroite de Meyerhof avec Warburg a été d'une grande aide ici, car c'est lui qui a développé de nouvelles techniques rapides et efficaces pour purifier et cristalliser les enzymes.

Date	Enzyme	Auteurs
1909	Alcool déshydrogénase	Bateilli et Stern
1911	Pyruvate décarboxylase	Neuberg et Hildesheimer
1927	Hexokinase	Meyerhof
1933	Lactate déshydrogénase	Andersson
1933	Glucosephosphate isomérase	Lohmann
1934	Pyruvate kinase	Parnas
1935	Phosphoglycérate phosphomutase	Meyerhof et Kiessling
1935	Enolase	Meyerhof et Kiessling
1936	6-phosphofructokinase	Ostern, Guthke et Terzakowec
1936	Fructose-biphosphate aldolase	Meyerhof, Lohmann et Schuster
1936	Trioséphosphate isomérase	Meyerhof, Lohmann et Schuster
1936	Glycogène phosphorylase	Cori et Cori
1936	Phosphoglucomutase, glucose-phosphomutase	Cori et Cori
1939	Triosephosphate déshydrogénase, glycéraldéhyde-phosphate déshydrogénase (NADP +)	Warburg et Christian
1942	Phosphoglycérate kinase	Bücher

Chronologie de l'identification des enzymes de la glycolyse

Tableau adapté de celui de Marcel Florkin au Chapitre 24, Vol 31 de *Comprehensive Biochemistry*.

- En 1932, un modèle cohérent et précis de l'ensemble de la voie était encore clairement nécessaire. Avec l'accumulation de données de son propre laboratoire et d'autres laboratoires, Embden a construit une proposition détaillée de séquences de réaction pour presque toute la voie glycolytique. Malheureusement, Embden est décédé en 1933 avant d'avoir eu l'occasion de jouer un rôle majeur dans les tests du modèle théorique. Meyerhof a rapidement reconnu la grande valeur du modèle d'Embden. Au cours des cinq années suivantes, les groupes de recherche de Meyerhof, Parnas, Needham, Warburg, Cori et von Euler ont efficacement élaboré les détails de la glycolyse. De nombreuses étapes de réaction ont été élucidées au laboratoire de Meyerhof. Pour cette raison, la glycolyse est appelée depuis voie de Embden-Meyerhof.

Date	Étape	Auteurs
1911	Acide pyruvique	Neuberg et Wastenson
1928	Acétaldéhyde	Neuberg et Reinfurth
1933	Acide D-3-phosphoglycérique	Embden, Deuticke et Kraft
1933	F-1,6-PP	Embden, Deuticke et Kraft
1934	G-6-P, F-6-P	Meyerhof
1934	Acide 2-phosphoénolpyruvique	Lohmann et Meyerhof
1934	Phosphodihydroxyacétone	Meyerhof et Lohmann
1935	Acide D-2-phosphoglycérique	Meyerhof et Kiessling
1936	D-glycéraldéhyde-3-P	Meyerhof, Lohmann et Schuster
1936	G-1-P	Cori et Cori
1939	Acide D-1,3-diphosphoglycérique	Negelein et Brömel

Reconnaissance des étapes intermédiaires de la voie glycolytique

Tableau adapté de celui de Marcel Florkin au Chapitre 24, Vol 31 de *Comprehensive Biochemistry*.

> Le **document 5 associé à des notions-clés** concernant la réaction d'oxydo-réduction présente la voie métabolique de la glycolyse sous une forme qui permet de réinvestir la notion de voie métabolique vue en seconde et d'enzyme en première spécialité SVT. Elle se produit dans le cytoplasme en 10 étapes. Seuls les intermédiaires principaux sont nommés en représentant à chaque fois le nombre d'atomes de carbone : on comprend que la glycolyse aboutit à une oxydation partielle du glucose, molécule à 6 atomes de carbone, en deux molécules de pyruvate, molécule à 3 atomes de carbone (d'où le nom de glycolyse). Elle comprend plusieurs réactions catalysées chacune par une enzyme spécifique et produisant une série de métabolites intermédiaires. Elle conduit à la synthèse de 4 molécules d'ATP. On peut relever que pour du glucose qui provient directement du sang, il faut 2 ATP pour le transformer en fructose 1,6-bisphosphate soit un bénéfice net de la glycolyse de 2ATP. On peut noter que la glycolyse ne demande pas de dioxygène, elle est donc toujours anaérobie.

> La glycolyse conduit également à la synthèse de deux molécules de NADH, H⁺. Le **document 6** explique le rôle de transporteur d'électron du NADH, H⁺ forme réduite du NAD⁺. On peut ajouter que le stock intracellulaire de NAD étant limité, il doit être régénéré en permanence.

> La stabilité cinétique de l'ATP et du NADH, en l'absence de catalyseurs spécifiques, est essentielle pour leur fonction biologique car elle permet aux enzymes de contrôler les flux d'énergie et de pouvoir réducteur au sein de la cellule.

Unité 6

Dans cette unité, on s'intéresse au déroulement de la glycolyse en présence de dioxygène : la respiration cellulaire. Dans un premier temps, la localisation de cette voie métabolique dans la mitochondrie donne l'occasion d'étudier un organite, en veillant à en donner une image réaliste dans la cellule musculaire. Dans un second temps, on s'intéresse à la voie métabolique en elle-même, notamment à partir de quelques éléments historiques avant d'en venir à la version actuellement retenue. Les notions de voie métabolique et de respiration cellulaire abordées en classe de seconde sont ici remobilisées ainsi que celle d'enzyme vue en spécialité en première.

> Le **document 1** permet de décrire la morphologie possible d'un exemple de mitochondrie. L'élève pourra repérer la matrice, la double membrane, l'espace inter-membranaire et les invaginations nommées crêtes mitochondriales. L'une de celle-ci (zone délimitée en pointillé) est détaillée dans le document 6.

Référence pour les documents 1 et 6 :

Davies, K. M., Anselmi, C., Wittig, I., Faraldo-Gomez, J. D., & Kuhlbrandt, W. (2012). « Structure of the yeast F1Fo-ATP synthase dimer and its role in shaping the mitochondrial cristae ». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(34), 13602–13607. doi:10.1073/pnas.1204593109

<https://www.pnas.org/content/109/34/13602>

> L'**activité pratique** associée permet de déterminer la molécule qui est oxydée par les mitochondries lors de la respiration, en lien avec l'unité précédente. Une suspension de mitochondries est obtenue à partir d'un myocarde de mammifère par exemple. On teste la molécule de glucose et la molécule issue de la glycolyse, le pyruvate. Seul le pyruvate conduit à une consommation du dioxygène.

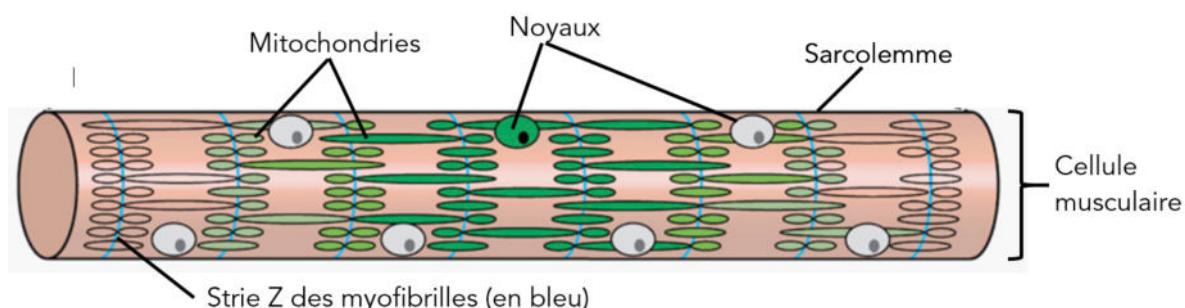
> Le **document 2** permet de comparer la répartition de mitochondries chez des levures cultivées en aérobiose ou en anaérobiose et de montrer que les mitochondries ne doivent pas être considérées comme des entités uniques, mais plutôt comme un réseau dynamique et dont le nombre et l'architecture (processus de biogenèse, de fission/fusion, voir schéma dans la référence ci-dessous) change dans des conditions physiologiques normales. L'absence de mitochondries en anaérobiose alors qu'elles sont nombreuses chez des levures cultivées en anaérobiose permet de penser qu'elles jouent un rôle central dans la respiration cellulaire. On peut postuler qu'il en est de même chez d'autres organismes, comme les

humains : des observations déjà anciennes montrent que plus une cellule musculaire est sollicitée (entraînement), plus elle possède de mitochondries et plus les crêtes de leurs membranes internes sont développées. On pourra aussi se référer à l'**exercice 4**.

Référence : Gan, Z., Fu, T., Kelly, D.P. et al. « Skeletal muscle mitochondrial remodeling in exercise and diseases. » *Cell Res* 28, 969–980 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41422-018-0078-7>

<https://www.nature.com/articles/s41422-018-0078-7>

> Le **document 3** montre la distribution et la forme des mitochondries d'un muscle de vol de drosophile (larves de troisième stade) pris ici comme modèle d'étude, cet arrangement stéréotypé des mitochondries étant conservé dans les muscles des mammifères. Cette organisation permet de dépasser une vision trop caricaturale des mitochondries dans la cellule musculaire. La cellule musculaire montre de très nombreuses mitochondries. On peut observer qu'elles sont localisées dans des régions cellulaires distinctes : entre les myofibrilles (en contact étroit avec elles au niveau de la zone de part et d'autre de la strie Z, mitochondries intermyofibrillaires), près du noyau et dans la zone sous le sarcolemme (mitochondries subsarcolemmales). Dans le muscle squelettique, les mitochondries existent en tant que réseau membranaire réticulaire et elles possèdent de subtiles différences dans les propriétés biochimiques et fonctionnelles qui sont caractérisées par leurs emplacements anatomiques. On peut en donner une représentation possible plus proche de la réalité au sein d'une portion de cellule musculaire (mais toujours en discutant de la taille des mitochondries représentées par rapport aux microphotographies fournies) :



Organisation schématique des mitochondries au niveau d'une cellule musculaire squelettique

Référence des photos du document 3 :

Wang, Zong-Heng et al. « Analysis of mitochondrial structure and function in the Drosophila larval musculature. » *Mitochondrion* vol. 26 (2016): 33-42. doi:10.1016/j.mito.2015.11.005

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4752903/>

> Le **document 4** apporte quelques éléments historiques et explique de façon résumée comment Krebs a compris d'une part l'idée d'un cycle de réactions enzymatiques par recyclage du citrate et d'autre part quelle est la molécule entrant dans le cycle, l'acétyl-coenzyme A, une molécule à 2 atomes de carbone, proche du pyruvate.

> Le **document 5** explique le devenir du pyruvate issu de la glycolyse au cours du cycle de Krebs au sein de la matrice mitochondriale. Une première étape consiste en la conversion du pyruvate (qui a été transporté de l'hypoplasmé vers la matrice mitochondriale) en acétyl-coenzyme A. Les réactions principales du cycle de Krebs sont des décarboxylations (trois molécules de CO₂ sont libérées par molécule de pyruvate, la totalité de la chaîne carbonée étant alors oxydée) et conduisent à la formation de composés réduits NADH et FADH₂. Ainsi l'essentiel de l'énergie libérée produite par l'oxydation du glucose n'est pas directement stockée dans de l'ATP, mais dans des transporteurs réduits NADH, H⁺ et FADH₂.

> Les documents 6 et 7 expliquent la production d'ATP en lien avec la réoxydation de ces composés réduits au niveau de la chaîne respiratoire mitochondriale. Le **document 6** est un détail de la mitochondrie

présentée dans le document 1, obtenu avec la même technique. Il s'agit d'une représentation possible d'une crête mitochondriale : elle nous montre que des sphères pédonculées sont présentes au niveau de ce repli de la membrane interne. Ce sont des enzymes : les ATP synthases, intervenant dans la synthèse de l'ATP.

Référence : Davies, K. M., Anselmi, C., Wittig, I., Faraldo-Gomez, J. D., & Kuhlbrandt, W. (2012). « Structure of the yeast F1Fo-ATP synthase dimer and its role in shaping the mitochondrial cristae. » *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(34), 13602–13607. doi:10.1073/pnas.1204593109 <https://doi.org/10.1073/pnas.1204593109>

> Le **document 7** explique que cette synthèse d'ATP par l'ATP synthase est réalisée par couplage avec un transport de protons entre l'espace intermembranaire et la matrice mitochondriale séparés par cette membrane interne. Ces protons ont été transportés dans cet espace intermembranaire à partir de la matrice par des complexes protéiques enchaînés dans la membrane mitochondriale interne. Ces complexes forment la chaîne respiratoire mitochondriale et constituent une série d'accepteurs d'électrons provenant des coenzymes réduits NADH, H⁺ et FADH₂. Ces composés réduits y sont réoxydés par la réduction de dioxygène en eau, l'accepteur final d'électrons étant donc le dioxygène. Chaque transfert d'électrons est associé à un transfert de protons.

On pourra compléter des deux documents avec des représentations et animations 3D du fonctionnement de cette chaîne respiratoire et de l'ATP synthase, à voir en vision « myope », comme par exemple :

– pour la chaîne respiratoire : <https://youtu.be/LQmTKxI4Wn4>

– pour l'ATP synthase : <https://youtu.be/kXpzp4RDGJI>

On peut signaler que, pour les moteurs biologiques, comme les têtes de myosine, l'ATP sert d'énergie chimique et son hydrolyse est couplée à des changements de conformation qui exercent une force mécanique, les synthases ATP inversent ce processus : conversion d'un gradient électrochimique d'ions H⁺ en énergie cinétique de rotation, puis couplage de la rotation à la formation de liaisons phosphoanhydrides à haute énergie.

> À l'issue de cette unité, l'élève pourra calculer le nombre de molécules d'ATP suite à la glycolyse et à la respiration cellulaire, pour une molécule de glucose, en partant des valeurs suivantes au niveau de l'ATP synthase : classiquement, on admet les valeurs de 3 ATP produits pour une molécule de NADH et 2 ATP pour une molécule de FADH₂.

Réactions	Nombre d'ATP produit directement au niveau du substrat	Nombre d'ATP produit par chaîne respiratoire et ATP synthase
Glycolyse : glucose → 2 pyruvate	4ATP -2ATP = 2 ATP	2 NADH,H ⁺ soit 2x3 = 8 ATP
Cycle de Krebs pour 2 pyruvate (décarboxylation des 2 pyruvate et cycle en lui-même)	2 ATP	8 NADH,H ⁺ +2FADH ₂ soit (8x3+2x2) =28 ATP
Total	4 ATP	34 ATP
Total pour une molécule de glucose	38 ATP	

On obtient donc au total 38 ATP par molécule de glucose suite aux trois ensembles de réactions. Cette production théorique n'est cependant jamais atteinte en raison des pertes par dissipation à travers la membrane interne des mitochondries ainsi qu'en raison du coût énergétique du transport actif du pyruvate depuis le cytosol jusqu'à la matrice mitochondriale, de sorte que les estimations actuelles s'établissent autour de 30 à 32 molécules d'ATP formées par molécule de glucose oxydée.

Unité 7

Dans cette dernière unité, la relation entre type d'effort, fermentation lactique et respiration cellulaire est interrogée. La démarche proposée en vient notamment à distinguer deux types de cellules musculaires en lien avec une voie métabolique privilégiée et à évoquer la plasticité musculaire associée.

> Le **document 1** permet à l'élève de comprendre la voie métabolique à l'origine de la production de lactate (mesurée lors d'un effort intense dans l'unité 5) comme un dénouement possible de la glycolyse en conditions anaérobies. Ainsi, la fermentation lactique est une autre voie métabolique permettant la réoxydation des coenzymes réduits NADH, H⁺. Par comparaison avec le cycle de Krebs, l'élève constate que le lactate est une molécule à 3 carbones comme le pyruvate : il n'y a pas de décarboxylation supplémentaire, et donc ni de composés réduits supplémentaires produit, ni d'ATP supplémentaire. Le bilan de la glycolyse suivie de la fermentation lactique en reste donc à 4 – 2 soit 2 ATP par molécule de glucose. On précise que la lactatémie ne reflète le métabolisme anaérobie que pour des puissances d'exercices élevées. En dessous, elle reflète la stimulation de la respiration mitochondriale pour ajuster le métabolisme aérobie à la puissance de travail imposée : le lactate et le pyruvate étant en équilibre, et ce dernier étant à un niveau plus élevé afin d'alimenter la respiration, le lactate est plus élevé aussi.

> Un regard critique s'impose également quant aux effets du lactate sur la fatigue, les crampes et les douleurs musculaires retardées du type courbatures) : voir aussi **exercice 5 p. 447** et **exercice bac pp. 518-519**.

Référence : Léger Luc, Cazorla Georges, Petibois Cyril et al., « Lactate et exercice : mythes et réalités », *Staps*, 2001/1 (no 54), p. 63-76. DOI : 10.3917/sta.054.0063. URL : <https://www.cairn.info/revue-staps-2001-1-page-63.htm>

> Deux types d'effort sont présentés dans le **document 2**. Les valeurs indiquées des dépenses énergétiques permettront à l'élève de quantifier l'ATP correspondant (voir unité 3 doc. 4 et ici, infra).

À raison de 50kJ/mole d'ATP et d'une masse molaire de l'ATP de 507,18g/mol (donc 1 mole d'ATP = 1,8 kg d'ATP), on a :

- marcheur athlétique : 5625 kJ pour 1h15 ce qui donne 1,25 kJ par seconde donc 45 g d'ATP par seconde ou 200 kg d'ATP consommés en 1h15.
- sprinteuse athlétique : 130 kJ en 10 secondes. Ce qui donne 13 kJ par seconde donc 470 g d'ATP par seconde ou 4,7 kg d'ATP consommés en 10 seconde.

Pour mémoire, le stock d'ATP/ADP, pour tout l'organisme, est estimé à environ 0,1 mole (autour de 50 g). Ce calcul est bien sûr fondé sur de nombreuses approximations et le résultat n'est pas à prendre comme un chiffre exact, mais il donne un ordre de grandeur

> On recherche ensuite dans quelles conditions les métabolismes anaérobies ou aérobies sont mobilisés par la cellule musculaire (documents 3 et 4). On signale l'existence d'un autre métabolisme anaérobie que la voie de la fermentation lactique mobilisé dans les toutes premières secondes et qui n'implique pas le glucose, mais cette voie n'est pas au programme (cette voie de la phosphocréatine permet une production d'ATP très rapide car la phosphocréatine stockée dans le cytoplasme de la cellule musculaire peut transférer un groupement phosphate à l'ADP, grâce à un couplage énergétique. Les stocks de phosphocréatine sont cependant épuisés au bout de quelques secondes d'effort d'intensité maximale. Ils sont reconstitués à l'issue de l'effort avec consommation d'ATP, voir **exercice bac pp. 518-519**). Les données présentées dans le **document 3** permettent à l'élève d'interroger la contribution des voies métaboliques anaérobies et aérobies lors de différents types d'efforts. On montre que l'importance de l'approvisionnement en énergie

anaérobie diminue et, par conséquent, l'approvisionnement en énergie aérobie augmente à mesure que la distance parcourue ou que la durée de l'effort augmente.

Il peut être intéressant d'engager une discussion avec les élèves concernant la méthode d'obtention des données à l'origine de ces graphiques, notamment le 2^e. Dans ce dernier, la contribution du système énergétique a été évaluée par les auteurs à partir d'une analyse sommaire des données dans la littérature de la contribution aérobie relative à l'apport énergétique total pendant les périodes d'exercice maximal, données obtenues par différentes équipes mais surtout par différentes méthodes.

On pourra par exemple fournir le tableau suivant issue de cette revue de littérature pour faire comprendre que ce graphique est davantage une construction intellectuelle, ici, de plus, didactisée pour le manuel de l'élève, que le résultat d'une mesure directe :

Tableau des références utilisées par les auteurs dans l'analyse sommaire des données dans la littérature de la contribution aérobie relative à l'apport énergétique total pendant les périodes d'exercice maximal.

Source : Gastin, P. B. (2001). « Energy System Interaction and Relative Contribution During Maximal Exercise. » *Sports Medicine*, 31(10), 725–741. doi:10.2165/00007256-200131100-00003

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11547894>

⇒ *Voir pages suivantes*

Table I. Estimates of relative aerobic energy system contribution during single bouts of dynamic high intensity exercise

Study	Exercise	Participants	Method	Duration (sec)	% Aerobic
Bangsbo et al. ^[73]	Cycle	3 ST cyclists	ODI	179	74
	Run	14 ET runners		181	78
	Run	15 T soccer		205	78
	Run	5 T oarsmen		243	83
Calbet et al. ^[66]	Cycle ^a	19 UT	ODI	30	23
				45	31
				148	59
Craig et al. ^[74]	Cycle	6 ST cyclists	ODI	70	50
		6 ET cyclists		70	55
		6 ST cyclists		120	63
		6 ET cyclists		120	67
		6 ST cyclists		300	86
		6 ET cyclists		300	85
Di Prampero et al. ^[75]	Run	MD runners	MM	102	62
				132	69
				209	78
				452	89
				778	93
Faina et al. ^[56]	Cycle	8 T cyclists	ODI	225	85
		8 T swimmers		302	82
		7 T kayakists		356	88
Gastin & Lawson ^[62]	Cycle ^a	8 UT	ODI	15	19
				30	29
				45	39
				60	46
				75	52
				90	58
Gastin & Lawson ^[76]	Cycle ^a	6 ST cyclists	ODI	90	53
		8 ET triathletes		90	56
		8 UT		90	58
		9 UT		62	51
Gastin et al. ^[40]	Cycle ^a	6 UT/6 ET	ODI	90	57
		9 UT		94	59
		9 UT		186	76
		6 UT/6 ET		208	74
Green et al. ^[77]	Cycle	10 T cyclists	ODI	173	76
		1 ST		15	22
Hermansen & Medbø ^[67]	Run	MD ^b runners	DM	30	29
				60	43
				60	51
				60	46
				120	59
				240	75
Hill ^[78]	Run	6 MD runners	DM	49	37
		7 MD ^b runners		61	38
		5 MD runners		120	61
		9 MD ^b runners		146	67
				246	80
		8 MD ^b runners		309	83

Table I. Contd

Study	Exercise	Participants	Method	Duration (sec)	% Aerobic
Kavanagh & Jacobs ^[64]	Cycle ^a	5 UT	ODA	30	18
Locatelli & Arsac ^[79]	Run ^a	4/4 ^b ST runners	DM	11	3
Medbø & Sejersted ^[80]	Run	6 ET	ODI	55	50
		6 ST		57	44
Medbø & Tabata ^[25]	Cycle	14 UT	ODI	34	30
		13 UT		75	47
				156	65
Morton & Gastin ^[81]	Swim bench ^a	7 UT	ODI	60	40
		7 ST		60	46
Morton ^[82]	Swim bench ^a	UT	ODI	45	50
				60	44
Nummela & Rusko ^[83]	Run	8 ET	ODI	49	46
		8 ST runners		50	37
O'Brien et al. ^[68]	Cycle ^a	9 UT	ODI	30	30
				30	33
				60	46
				60	48
Olesen et al. ^[84]	Run	6 runners	ODI	62	37
		8 SMD runners		64	44
				139	60
				146	72
		6 runners		148	57
				148	68
Péronnet & Thibault ^[85]	Run	ST runners	MM	6	5
				10	8
		MD runners		20	14
				44	30
				102	57
				132	65
				209	76
				226	78
				291	82
		ET runners		452	88
				778	94
				1654	98
Ramsbottom et al. ^[86]	Run	11/1 ^b runners	ODI	171	69
				182	71
Ramsbottom et al. ^[87]	Run	32/17 ^b UT	ODI	173	68
				178	70
Serresse et al. ^[88]	Cycle ^a	23 T	DM	10	3
		21 T		30	28
		20 T		90	46
Smith & Hill ^[65]	Cycle ^a	6 UT	DM	30	16
Spencer & Gastin ^[89]	Run	3 ST runners	ODI	22	29
		6 MD runners		49	43
		5 MD runners		113	66
		6 MD runners		235	84

Continued over page

Table I. Contd

Study	Exercise	Participants	Method	Duration (sec)	% Aerobic
Spencer et al. ^[90]	Run	4 ST runners	ODI	52	46
		5 MD runners		118	69
				242	83
van Ingen Schenau et al. ^[91]	Run	ST runners	MM	10	4
				20	8
		MD runners	MM	44	17
Ward-Smith ^[92]	Run	ST runners	MM	10	7
				20	14
		MD runners	MM	45	28
Withers et al. ^[26]	Cycle ^a	ET runners	ODI	105	52
				218	72
		ET runners		816	92
Withers et al. ^[93]	Cycle ^a		ODI	1687	96
		3 UT		30	28
				60	49
Withers et al. ^[93]	12 ET		ODI	90	61
				45	40
				60	47
Withers et al. ^[93]	12 ET		ODI	75	54
				90	60

^a All-out.^b Female.

DM = direct measures; ET = endurance trained; MD = middle distance; MM = mathematical model; ODA = oxygen deficit using an assumed mechanical efficiency; ODI = oxygen deficit using individual mechanical efficiency; SMD = sprint and middle distance; ST = sprint trained; T = trained, unspecified; UT = untrained.

> Le **document 4** permet à l'élève de comprendre une conséquence des données des documents précédents : la performance pour des efforts nécessitant de soutenir des puissances très élevées durant de courtes périodes (comme la course à pied sur 400 m par exemple) dépend de la capacité anaérobie glycolytique, c'est-à-dire de la capacité des cellules musculaires à réaliser la fermentation lactique. On peut postuler que cette performance est en partie au moins liée aux enzymes en jeu qui sont disponibles pour ces voies métaboliques dans les cellules musculaires concernées et qu'un entraînement efficace devrait reposer sur une amélioration de cette disponibilité.

> Les **documents 5 et 7** permettent à l'élève de découvrir deux types de cellules musculaires, qui coexistent dans un même muscle : d'une part les cellules de type I, ou fibres rouges, qui se distinguent par une teneur en enzymes de la fermentation lactique faible et une teneur en enzymes du cycle de Krebs et de la chaîne respiratoire élevée, donc pouvant être associée au métabolisme aérobie ; d'autre part, les cellules de type II, ou fibres blanches, au diamètre plus grand, qui se distinguent par une teneur en enzymes de la fermentation lactique élevée et une teneur en enzymes du cycle de Krebs et de la chaîne respiratoire faible, donc pouvant être associée au métabolisme anaérobie. On peut signaler qu'à l'heure actuelle, il n'existe pas assez de données dans la littérature pour établir des corrélations entre tous les types de cellules musculaires déterminés selon les diverses méthodes à disposition et les différents types d'exercice musculaire. En fait, à ce jour, seule la distinction la plus élémentaire entre cellules musculaires lentes de type I et rapides de type II a pu être corrélée de manière satisfaisante avec les exercices d'endurance ou de résistance chez l'humain.

> Le **document 5** montre que la musculature d'athlètes performants dans des sports de résistance (exercice de courte durée approchant la charge maximale) comme ici le sprint contient une plus grande proportion de cellules musculaires de type II donc associées au métabolisme anaérobie. Un entraînement spécifique en endurance (exercices de longue durée n'atteignant pas la charge maximale) conduit à une augmentation de la proportion des cellules de type I associées au métabolisme aérobie.

> Le document 6 permet à l'élève de visualiser cette plasticité musculaire en comparant la répartition des deux types de cellules musculaires dans un même ensemble de muscle chez des individus comparables.

> La déduction que la connaissance du type de cellule musculaire permet de prédire le succès athlétique doit cependant être nuancée. On a décrit par exemple des variations de 50 à 98 % de la proportion de fibres lentes déterminées par biopsie du quadriceps fémoral chez deux athlètes qui courent une épreuve de 10 km dans le même temps. Il est fort probable que le type de fibre musculaire ne soit pas le seul déterminant de la performance maximale atteignable, soit en endurance, soit en force et vitesse. Il paraît ainsi également nécessaire de prendre en compte d'autres facteurs de la performance, comme pour l'endurance, la VO₂ max, le débit cardiaque maximal, voire des facteurs centraux ou pour la force, des facteurs neuromusculaires (synchronisation des unités motrices, coordination intra- et intermusculaire) et d'autres liés à l'étirement de la structure tendo-musculaire.

Référence : Costill DL, Fink WJ, Pollock ML. « Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. » *Med Sci Sports* 1976;8:96-100.

Quelques ressources

>Données anatomiques

<https://www.anatomie-humaine.com/-Myologie,34-.html>

<https://www.youtube.com/user/Anatomie3DLyon/videos>

>Cellule musculaire squelettique

Mukund, K., & Subramaniam, S. (2019). « Skeletal muscle: A review of molecular structure and function, in health and disease. » *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine*. doi:10.1002/wsbm.1462

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wsbm.1462>

>Données en microscopie électronique à transmission

<http://anatpat.unicamp.br/bineumusnlme.html>

>Myopathies

<https://www.afm-telethon.fr/concerne-par-la-maladie>

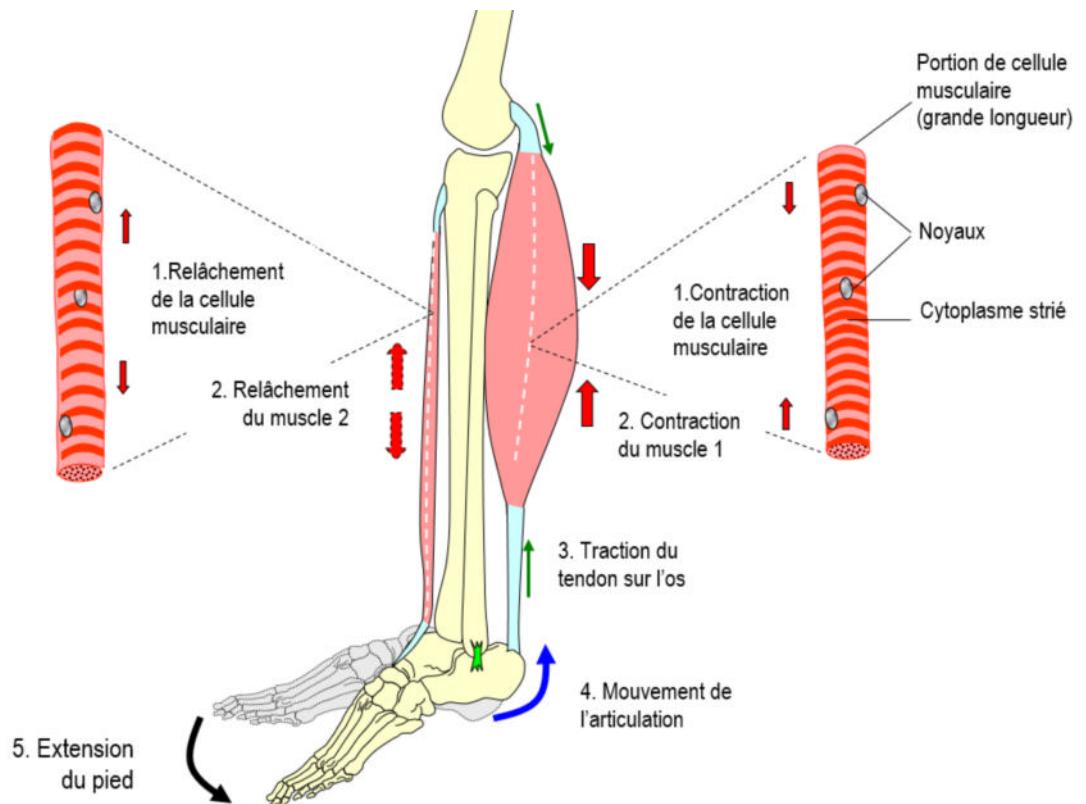
<https://u1046.edu.umontpellier.fr/163-2/abrege-des-proteines-musculaires/la-dystrophie-musculaire-de-duchenne-dmdbmd/>

Corrigé des parcours « tâche complexe »

Unité 1

> Éléments de correction

- La forme attendue est un texte illustré d'un schéma légendé. On attend que le texte présente une courte introduction reprenant la problématique et les éléments de méthode utilisés pour y répondre, une courte conclusion répondant au problème et que les idées développées soient séparées et logiquement organisées. On attend aussi qu'il soit fait référence aux documents. Le schéma est à réaliser soigneusement et à légender précisément. Une référence peut être faite avec le chapitre 15 concernant le message nerveux et la contraction musculaire.
- Dans un 1^e paragraphe, il s'agit de préciser les structures anatomiques en jeu en mettant en relation l'échelle de l'organe avec l'échelle cellulaire. La dissection d'un membre postérieur d'une grenouille du genre *Rana* (document 3) permet de repérer l'organisation des différentes structures anatomiques impliquées dans le mouvement : un muscle est attaché à deux os via des tendons. La représentation schématique aux différentes échelles d'un muscle comme l'extenseur digital (document 4) permet de comprendre qu'un muscle est constitué de plusieurs faisceaux de cellules musculaires. Chaque cellule musculaire et chaque faisceau est entouré de tissu conjonctif formé de cellules conjonctives appelées fibroblastes : la matrice extracellulaire riche en collagène forme un réseau qui rend solidaire les différentes cellules musculaires et les faisceaux de cellules musculaires. Ces enveloppes de tissu conjonctif se regroupent aux extrémités du muscle pour former les tendons. Une observation microscopique d'une cellule musculaire (document 5) permet d'en dégager les caractéristiques : grande longueur (plusieurs cm contre 20 µm pour la plupart des types cellulaires), plusieurs noyaux et cytoplasme présentant des stries.
- Dans un 2^e paragraphe, on précise le mécanisme en jeu en mettant en relation échelle de l'organe et échelle cellulaire. Le document 1 permet de repérer des muscles impliqués dans la flexion alors que d'autres sont impliqués dans l'extension (citer un exemple à chaque fois). Une modélisation permet de préciser le mécanisme à un niveau simplifié par rapport à la réalité (document 2). Ainsi, la simulation d'une flexion de l'avant-bras sur le bras est liée à un raccourcissement du muscle 2 (biceps brachial) associé à un allongement du muscle 1 (triceps brachial). La flexion de l'avant-bras est d'autant plus grande que le raccourcissement ou l'allongement des muscles est grand (valeurs à citer). À l'échelle cellulaire (document 6), on observe qu'une portion de cellule musculaire contractée est épaissie et plus courte que la même portion de cellule musculaire relâchée. La portion de cellule musculaire relâchée mesure 120 µm entre les repères A et B alors que la même portion de cellule contractée mesure 107 µm, ce qui représente un raccourcissement de l'ordre de 11 %. Une telle diminution de longueur pour un certain nombre de cellules musculaires dans le muscle 2 (suite à des messages nerveux) peut donc entraîner une contraction à l'échelle du muscle qui va tirer sur les tendons. Les tendons vont exercer une traction sur l'os. Dans le muscle 1, les cellules musculaires se relâchent et donc augmentent de longueur, ce qui va permettre un allongement du muscle. Cette action coordonnée des deux muscles va entraîner un mouvement des os et donc du membre concerné.
- Le schéma met en relation l'échelle de l'organe avec l'échelle cellulaire : il s'appuie sur un schéma de la modélisation (document 2), en y intégrant une cellule musculaire (partie droite du schéma 4) dans le muscle qui se relâche ou qui se contracte, avec les légendes des différentes structures (documents 3 et 4) et en y ajoutant des flèches montrant les raccourcissements/élongations de la cellule et des muscles et le mouvement finalement effectué.



Action des muscles dans l'extension du pied

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée : <ul style="list-style-type: none"> • Ne met pas en relation les structures en jeu à l'échelle de l'organe avec celles à l'échelle cellulaire • Ne met pas en relation le raccourcissement à l'échelle de l'organe avec celui à l'échelle cellulaire 	Démarche pertinente <ul style="list-style-type: none"> • Presque tous les documents sont exploités • La relation entre l'échelle de l'organe et l'échelle cellulaire est indiquée mais le principe des deux muscles fonctionnant de façon antagoniste n'est pas abordé 	Démarche à la fois pertinente et cohérente

Contenu	Absent	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• n'identifie pas les éléments caractéristiques d'une cellule musculaire• ou ne quantifie pas le raccourcissement à l'échelle de l'organe et/ou à l'échelle cellulaire• ou ne précise pas le rôle des tendons à l'échelle de l'organe et à l'échelle cellulaire	Complet ou suffisant
Communication	Non conforme	<ul style="list-style-type: none">• Le texte ne précise pas l'origine des informations citées dans les documents ou• Il n'y a pas d'illustrations	<ul style="list-style-type: none">• Le texte n'inclue qu'une partie des références aux documents Ou<ul style="list-style-type: none">• le schéma n'est pas correctement légendé ou soigné

Unité 2

> Éléments de correction

- La forme attendue est un texte. On attend que le texte présente une courte introduction reprenant la problématique et le type de données utilisées pour y répondre, une courte conclusion répondant au problème et que les idées développées soient séparées et logiquement organisées. On attend aussi qu'il soit fait référence aux documents.
- Dans une 1^e partie, il s'agit de fournir des arguments visant à identifier le sarcomère comme unité fonctionnelle du modèle du mécanisme de la contraction de la cellule musculaire : identification et situation du sarcomère dans l'organisation de la cellule musculaire (doc. 1), éléments constitutifs (doc. 2), principe du glissement des filaments les uns par rapport aux autres (doc. 3).
- Dans une 2^e partie, on s'intéresse à fournir des arguments au modèle du mécanisme de la contraction de la cellule musculaire concernant la relation entre les filaments épais et les filaments fins au sein d'un sarcomère.
- En conclusion, la contraction musculaire correspond à un raccourcissement des sarcomères dû au glissement relatif des filaments d'actine et de myosine en lien avec l'attachement et le détachement cycliques de la myosine sur les filaments d'actine : les deux stries Z délimitant un sarcomère se rapprochent l'un de l'autre. Un raccourcissement global de la cellule musculaire selon l'axe longitudinal peut s'expliquer par ce phénomène se produisant simultanément pour tous les sarcomères de la cellule.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée : <ul style="list-style-type: none"> • Extraction d'informations concernant le sarcomère mais pas de mise en relation explicite avec le modèle à soutenir • Extraction d'informations concernant les liaisons filaments fins d'actine/filaments épais de myosine mais pas de mise en relation explicite avec le modèle à soutenir 	Démarche pertinente <ul style="list-style-type: none"> • Presque tous les documents sont exploités, l'ordre est cohérent • ... mais mise en relation partielle (sarcomère ou liaisons entre filaments) avec le modèle à soutenir 	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents. N'a pas exploité la comparaison sarcomère relâché/contracté ou les modélisations des têtes de myosine.	Complet ou suffisant	
Communication	Non conforme	Il y a un texte mais non structuré en paragraphe	Texte structuré en paragraphe mais de façon non pertinente	Texte structuré de façon pertinente en paragraphes

Unité 3

> Éléments de correction

- La forme demandée est un exposé oral s'appuyant sur un diaporama. On attend que l'élève montre son implication et soit dynamique (attitude), qu'il adopte une position correcte, regarde l'auditoire, et tienne compte de ses réactions le cas échéant (posture), qu'il soit compris par l'auditoire et emploie une langue correcte et adaptée (qualités d'expression orale). L'ensemble du propos est structuré avec une introduction, une conclusion et s'appuie sur des diapositives où les images dominent et où le texte est réduit aux légendes et aux titres. Les références sont indiquées dans le diaporama.
- L'introduction comme la conclusion pourront s'appuyer sur une diapositive reprenant un schéma de sarcomères d'une cellule musculaire relâchée ou contractée, comme celui présenté dans le document 6 de l'unité 2.
- Pour montrer le rôle de l'ATP, des photos des résultats expérimentaux réalisées par l'élève peuvent illustrer cette partie du diaporama. Un lien pourra être fait avec le chapitre 15 concernant l'origine des ions calcium dont on précise le rôle en relation avec la modélisation moléculaire présentée dans le document 5.
- Pour représenter les étapes à l'échelle moléculaire de l'action de l'ATP sur le cycle activation/fixation/phase motrice/séparation des têtes de myosine, et apporter une plus-value à une simple reprise du schéma du document 6, il peut être pertinent d'animer ces différentes étapes en utilisant les outils dédiés du logiciel de diaporama.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents : <ul style="list-style-type: none"> • Traite <i>soit</i> des résultats expérimentaux <i>soit</i> des mécanismes modélisés • Lexique spécifique peu présent 	Complet ou suffisant : <ul style="list-style-type: none"> • Traite des résultats expérimentaux et des mécanismes modélisés • Lexique spécifique maîtrisé 	
Communication	Non conforme	Attitude et posture : Simple lecture des diapositives, peu réceptif aux réactions de l'auditoire Qualités d'expression orale : Voix pas toujours audible, débit précipité	Attitude et posture : Exploitation des diapositives peu chargées en textes et illustrées ; réagit à l'auditoire Qualités d'expression orale : Volume suffisant, rythme adapté, tentatives d'intonation. Phrases correctes.	Attitude et posture : Exploitation des diapositives peu chargées en textes et illustrées ; suscite de l'intérêt pour le sujet à l'auditoire Qualités d'expression orale : Volume suffisant, rythme adapté.

Unité 4

> Éléments de correction

- La forme demandée est un exposé oral s'appuyant sur un poster scientifique. On attend que l'élève montre son implication et soit dynamique (attitude), qu'il adopte une position correcte, regarde l'auditoire, et tienne compte de ses réactions le cas échéant (posture), qu'il soit compris par l'auditoire et emploie une langue correcte et adaptée (qualités d'expression orale). L'ensemble du propos est structuré avec une introduction, une conclusion et s'appuie sur un poster scientifique où textes et images se complètent. Les références sont citées dans le poster.
- Les articles originaux pourront être mis à disposition, dans l'idée d'une initiation à une revue de littérature. La lecture en sera myope, focalisée principalement sur les figures à l'origine du corpus documentaire choisi et limité fourni (documents du manuel ; complété avec l'un ou l'autre document supplémentaire).
- L'introduction rappelle la problématique en lien avec la notion de matrice extracellulaire. La conclusion fait état de l'intérêt de connaissances fondamentales concernant le rôle de la matrice extracellulaire au sein du tissu musculaire pour la recherche de pistes thérapeutiques.

- Pour décrire les manifestations de la maladie à l'échelle cellulaire, on attend que l'élève s'appuie sur le document 2 après avoir pris connaissance du document 1 ; pour identifier la dystrophine comme principale molécule en jeu dans cette maladie, les documents 3 et 4 sont à exploiter. On attend ici une mobilisation des acquis de la classe de première en génétique et particulièrement sur les mutations.
- Pour préciser les interactions en jeu dans cette maladie, on attend une remobilisation des connaissances concernant la matrice extracellulaire, et une mise en relation entre les documents 5 et 6, ainsi qu'avec les manifestations de la maladie à l'échelle cellulaire (documents 1 et 2).

• **Trame de l'exposé :**

_ La matrice extracellulaire est un assemblage de molécules qui lie les cellules entre elles et les organise en tissus, elle assure notamment la résistance et l'élasticité de la peau. On interroge les recherches concernant les myopathies afin de compléter les connaissances fondamentales concernant le rôle de cette matrice extracellulaire dans le tissu musculaire.

_ La dystrophie musculaire de Duchenne (DMD) est caractérisée par une dégénérescence musculaire (document 1). À l'échelle cellulaire, on comprend que le maintien de l'intégrité de la cellule musculaire est affecté de façon systématique, ce qui finit par désorganiser le muscle, en augmentant la part de tissu conjonctif au détriment des cellules musculaires (document 2 ; Juban, 2018). L'absence de dystrophine dans la région sous-membranaire des cellules musculaires chez les patients atteint de DMD par comparaison avec un individu contrôle laisse à penser que cette protéine joue un rôle-clé dans cette maladie (document 3 ; Leturcq, F., & Tuffery-Giraud, S., 2015). Le gène DMD qui code la protéine dystrophine est localisé sur le chromosome X, ce qui explique le fait que la maladie ne touche que les garçons. De plus, en raison de sa grande taille (plus long gène humain connu, durée de transcription de ce gène estimée à 16 heures), des mutations ont davantage de risque de se produire (et donc pour quelques-unes de subsister après réparation) lors de la méiose à l'origine des gamètes (document 4).

_ Deux composants essentiels de la matrice extracellulaire sont mis en évidence au niveau des cellules musculaires d'un individu sain à partir d'une analyse immunohistochimique d'une biopsie musculaire chez un individu sain : le collagène VI et le perlecan (document 5 ; Bovolenta, 2010). La dystrophine forme un réseau protéique avec les filaments d'actine du cytosquelette reliant ainsi les myofibrilles aux fibres de collagène qui forment la matrice extracellulaire : cet ensemble de protéines conserve flexible et intacte la membrane de la fibre durant les cycles de contractions. Son absence ou du moins une dystrophine tronquée est donc responsable des lésions cellulaires plus fréquentes que la normale au niveau du tissu musculaire.

_ En conclusion, diverses pistes thérapeutiques liées à ces connaissances fondamentales peuvent être évoquées. On peut par exemple chercher à stopper le processus typique de remplacement progressif des fibres musculaires par du tissu fibreux observé chez les patients atteints de DMD en agissant sur des molécules régulatrices. Une autre voie s'appuie sur la connaissance de la mutation causale chez le patient afin de pouvoir entreprendre une thérapie génique qui consiste à remplacer le gène DMD défectueux par un gène DMD thérapeutique, transporté à l'aide d'un vecteur dans les cellules musculaires concernées.

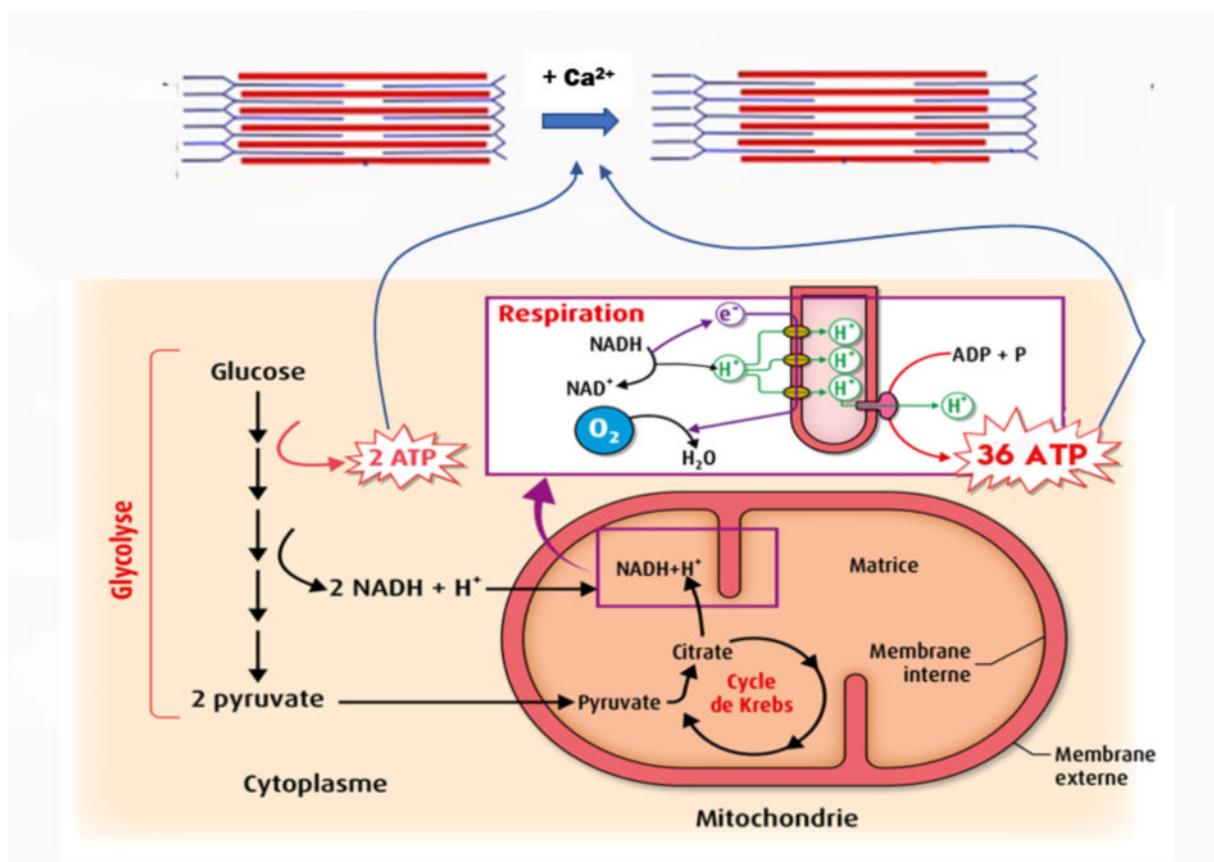
> Support pour l'autoévaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Démarche pertinente	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu	Absent	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents : • Identification de la dystrophine <i>ou</i> du rôle de la matrice extracellulaire • Lexique spécifique peu présent	Complet ou suffisant : • La dystrophine est identifiée et intégrée dans le réseau protéique reliant matrice extracellulaire et myofibrille • Lexique spécifique maîtrisé	
Communication	Non conforme	Attitude et posture : Simple lecture du poster, peu réceptif aux réactions de l'auditoire Qualités d'expression orale : Voix pas toujours audible, débit précipité	Attitude et posture : Exploitation des éléments du poster qui sont bien équilibrés entre texte et images ; réagit à l'auditoire Qualités d'expression orale : Volume suffisant, rythme adapté, tentatives d'intonation. Phrases correctes.	Attitude et posture : Exploitation des éléments du poster qui sont bien équilibrés entre texte et images ; suscite de l'intérêt pour le sujet à l'auditoire Qualités d'expression orale : Volume suffisant, rythme adapté, intonation expressive.

Unité 6

> Éléments de correction

- La forme attendue est un schéma fonctionnel. On attend que ce dernier reprenne la glycolyse couplée au cycle de Krebs et à la chaîne respiratoire/ATP synthase, en précisant les molécules intermédiaires les plus importantes, les composés réducteurs et l'ATP. Les voies métaboliques sont à localiser dans les différents compartiments cellulaires. Le schéma est à réaliser soigneusement et à légendier précisément.



La production d'ATP dans la cellule musculaire en présence de dioxygène à partir du glucose

- On peut calculer le rendement en ATP de la respiration cellulaire suite à la glycolyse, pour une molécule de glucose :

- par la chaîne respiratoire et l'ATP synthase, une molécule de NADH permet la synthèse de 3 ATP et un FADH₂ permet la synthèse de 2 ATP ;
- la glycolyse produit 2 pyruvate + 2 ATP + 2NADH donc $2 + (2 \times 3) = 8$ ATP
- la décarboxylation des 2 pyruvates fournit 2NADH
- le cycle de Krebs fournit pour chacun les 2 pyruvates : $2 \times (3\text{NADH} + 1\text{FADH}_2)$ soit $2 \times (4 \times 3 + 1 \times 2) = 28$ ATP

On obtient donc au total 36 ATP par molécule de glucose passant par la glycolyse et la respiration cellulaire.

D'après l'unité 3, doc. 4, l'hydrolyse d'1 mole d'ATP fournit 50 kJ soit pour 1 mole de glucose et donc 36 mole d'ATP, on obtient 1800 kJ.

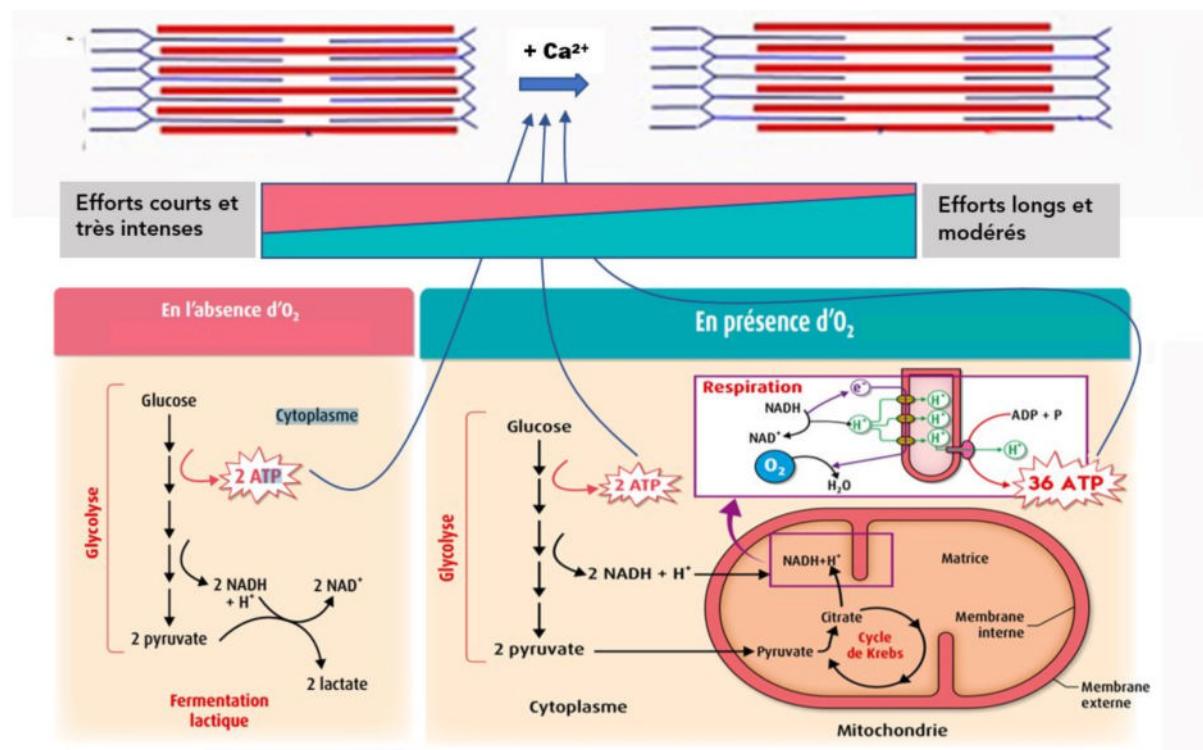
> Support pour l'autoévaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée	Pas de mise en relation entre glycolyse, cycle de Krebs et chaîne respiratoire ou Étapes mal localisées dans la cellule	Mise en relation pertinente entre glycolyse et étapes de la respiration cellulaire Et Étapes bien localisées dans la cellule mais calcul ATP incorrect	Mise en relation pertinente entre respiration cellulaire et glycolyse +étapes bien localisées + calcul ATP correct
Contenu	Absent	Incomplet	Les principaux intermédiaires sont indiqués Les composés réduits sont indiqués	
Communication	Non conforme	Conforme : schéma soigné et légendé		Conforme et original

Unité 7

> Éléments de correction

- La forme attendue est un schéma fonctionnel. On attend que le schéma reprenne celui obtenu à partir de l'unité précédente, donc la glycolyse couplée au cycle de Krebs et à la chaîne respiratoire/ATP synthase (métabolisme aérobie), et y ajoute la glycolyse couplée à la fermentation lactique (métabolisme anaérobie), en précisant les molécules intermédiaires les plus importantes, les composés réducteurs et l'ATP. Les voies métaboliques sont à localiser dans les différents compartiments cellulaires. La complémentarité des métabolismes aérobie et anaérobie selon le type d'effort est à indiquer. Le schéma est à réaliser soigneusement et à légendier précisément. Les données du document 3 montrent que l'importance de l'approvisionnement en énergie anaérobie diminue et, par conséquent, l'approvisionnement en énergie aérobie augmente à mesure que la distance parcourue (ou que la durée de l'effort) augmente.



Contribution de la fermentation lactique et de la respiration dans la production d'ATP dans la cellule musculaire à partir du glucose en fonction du type d'effort

> Support pour l'autoévaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche	Ne répond pas à la question posée <i>ou</i> Voies mal localisées dans la cellule	Pas de mise en relation entre métabolisme aérobie, métabolisme anaérobie et type d'effort	Mise en relation pertinente entre les deux métabolismes et type d'effort <i>et</i> Étapes bien localisées dans la cellule mais indication ATP incorrect	Mise en relation pertinente entre les deux métabolismes et type d'effort + étapes bien localisées + indication ATP correcte
Contenu	Absent	Incomplet	Les principaux intermédiaires sont indiqués Les composés réduits sont indiqués La complémentarité des métabolismes est précisée par type d'effort	
Communication	Non conforme	Conforme : schéma soigné et légendé	Conforme et original	

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas »

Unité 1

Question 1

À l'aide des informations contenues dans les doc. 1 à 4, indiquez les éléments anatomiques impliqués dans le mouvement aux différentes échelles.

La dissection d'un membre postérieur d'une grenouille du genre *Rana* (document 3) permet de repérer l'organisation des différentes structures anatomiques impliquées dans le mouvement : un muscle est attaché à deux os via des tendons. Le document 1 indique l'existence de muscles impliqués dans l'extension, comme le triceps sural, extenseur du pied, alors que d'autres sont impliqués dans la flexion, comme le tibial antérieur, fléchisseur du pied. La représentation schématique aux différentes échelles d'un muscle comme l'extenseur digital (document 4) permet de comprendre qu'un muscle est constitué de plusieurs faisceaux de cellules musculaires. Chaque cellule musculaire et chaque faisceau est entouré de tissu conjonctif formé de cellules conjonctives appelées fibroblastes : la matrice extracellulaire riche en collagène forme un réseau qui rend solidaire les différentes cellules musculaires et les faisceaux de cellules musculaires. Ces enveloppes de tissu conjonctif se regroupent aux extrémités du muscle pour former les tendons.

Question 2

D'après les documents 4 et 5, précisez quelles sont les particularités de la cellule musculaire d'un muscle squelettique.

Une observation microscopique d'une portion de cellule musculaire (document 5) permet d'en dégager les caractéristiques : grande longueur (plusieurs cm contre 20 µm pour la plupart des types cellulaires), plusieurs noyaux et cytoplasme présentant des stries. Le document 6 montre qu'une cellule musculaire est capable de se contracter.

Question 3

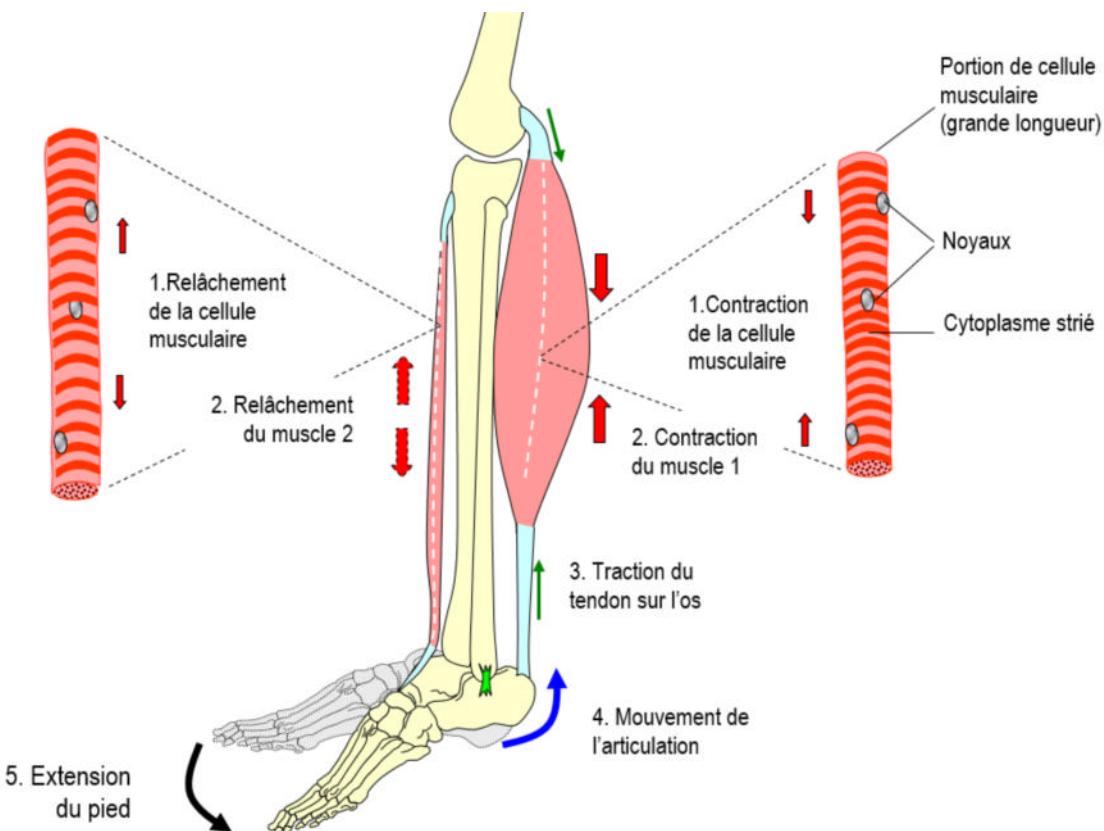
Quantifiez la variation de longueur du muscle à l'échelle de l'organe et à l'échelle de la cellule (documents 2 et 6).

À l'échelle de l'organe (document 2), la simulation d'une flexion de l'avant-bras sur le bras est liée à un raccourcissement du muscle 2 (correspondant au biceps brachial) de 6 mm pour un repliement de 55° associé à un allongement du muscle 1 (correspondant au triceps brachial) de 9 mm, ce qui représente un raccourcissement de l'ordre de 11 %. À l'échelle cellulaire (document 6), on observe qu'une portion de cellule musculaire contractée est épaisse et plus courte que la même portion de cellule musculaire relâchée. La portion de cellule musculaire relâchée mesure 120 µm entre les repères A et B alors que la même portion de cellule contractée mesure 107 µm, ce qui représente un raccourcissement de l'ordre de 11 %. Une telle diminution de longueur pour un certain nombre de cellules musculaires dans le muscle 2 (suite à des messages nerveux) peut donc entraîner une contraction à l'échelle du muscle qui va tirer sur les tendons. Les tendons vont exercer une traction sur l'os. Dans le muscle 1, les cellules musculaires se relâchent et donc augmentent de longueur, ce qui va permettre un allongement du muscle. Cette action coordonnée des deux muscles va entraîner un mouvement des os et donc du membre concerné.

Question 4

Schématisez la simulation effectuée avec le modèle numérique en y représentant une cellule musculaire striée entière, en place. Légennez les structures impliquées ainsi que les différentes étapes à l'origine d'un mouvement.

Le schéma met en relation l'échelle de l'organe avec l'échelle cellulaire : il s'appuie sur un schéma de la modélisation (document 2), en y intégrant une cellule musculaire (partie droite du schéma 4) dans le muscle qui se relâche ou qui se contracte, avec les légendes des différentes structures (documents 3 et 4) et en y ajoutant des flèches montrant les raccourcissements/élongations de la cellule et des muscles et le mouvement finalement effectué.



Action des muscles dans l'extension du pied

Unité 2

Question 1

À partir des documents 1 à 2, en référence au modèle du mécanisme de la contraction schématisé dans le document 6, décrivez l'unité contractile de la cellule musculaire.

Le document 6 présente le sarcomère comme unité fonctionnelle de la contraction au sein de la cellule. Le document 1, associant plusieurs électronographies au MET du cytoplasme de cellules musculaires, permet d'en préciser l'organisation. Le document 2 montre, à partir d'une autre méthode, les éléments constitutifs de ce cytoplasme. Ces données montrent que ce cytoplasme est rempli de myofibrilles présentant une succession d'un même élément d'organisation du cytosquelette : le sarcomère. Les deux plans de coupe longitudinal et transversal montrent qu'un sarcomère est formé

de filaments fins et de filaments épais disposés parallèlement les uns aux autres. Les filaments fins sont fixés de part et d'autre des stries Z. Ils sont seuls présents dans la partie périphérique du sarcomère. Filaments fin et épais se chevauchent partiellement de part et d'autre de la partie centrale du sarcomère. Le document 2 montre la succession des sarcomères au sein des myofibrilles en mettant en évidence les deux principales protéines constitutives, la myosine et l'actine.

Question 2

À partir du document 3, en référence au document 6, décrivez l'évolution de la disposition des filaments fins par rapport aux filaments épais au sein d'une unité contractile lors de la contraction musculaire.

Le document 6 présente le principe fonctionnel du raccourcissement des sarcomères : il s'agit d'un glissement relatif des filaments d'actine et de myosine. Le document 3 compare des sarcomères quand la cellule est relâchée et quand elle est contractée. On observe que les filaments épais de myosine conservent leur longueur lorsque le sarcomère se raccourcit alors que la distance séparant la strie Z du début des filaments épais diminue. Ces données sont en accord avec le modèle explicatif proposé.

Question 3

À partir des documents 4 et 5, en référence au document 6, précisez l'évolution au cours de la contraction musculaire de la relation entre les deux principales molécules impliquées.

Le document 4 apporte un premier argument à partir d'une observation au MEB de l'ultrastructure d'un sarcomère : des liaisons entre filaments épais de myosine et filaments fins d'actine sont observables dans la cellule contractée, mais pas lorsqu'elle est relâchée. Ces liaisons sont donc transitoires. Le document 5 ajoute des données moléculaires concernant les molécules de myosine formant le filament épais. Une protéine de myosine est formée d'une partie allongée (queue) et de deux parties globulaires (têtes) à une des extrémités. Ce sont ces têtes qui assurent la liaison entre les filaments fins et épais. Les modélisations moléculaires montrent de plus deux conformations possibles de ces extrémités globulaires des protéines de myosine se traduisant par un pivotement de 45° vers le centre du sarcomère, fournissant un argument supplémentaire au modèle proposé.

Question 4

À partir du document 3, estimatez le raccourcissement d'une myofibrille constituée d'une succession de 15000 sarcomères. Concluez à l'échelle de la cellule.

Les données du document 3, comparées à celle des autres documents, permet de montrer que la longueur d'un sarcomère est d'environ 2,3 µm à l'état relâché et d'environ 1,7 µm à l'état contracté donc un raccourcissement de 0,6 µm soit environ 30 %. À l'échelle d'une cellule musculaire de plusieurs centimètres de long, des milliers d'unités sarcomériques doivent s'assembler en longues chaînes périodiques, les myofibrilles, qui couvrent toute la cellule musculaire. Ici, pour une myofibrille de 15 000 sarcomères soit environ 3,4 cm à l'état relâché, le raccourcissement est d'environ 0,9 cm.

Unité 3

Question 1

À partir des documents 1,2 et 4, indiquez oralement les effets de l'ATP sur des cellules musculaires et précisez les caractéristiques de la molécule.

D'après les données du document 1, la quantité d'ATP synthétisé augmente de 0,2 à 1,5 pmole/embryon/heure chez le jeune embryon de souris alors qu'en présence d'ions cyanure, cette synthèse reste inférieure à 0,4 pmol/embryon/heure. On a montré par ailleurs que l'ion cyanure, connu comme poison mortel, a notamment pour conséquence une paralysie des muscles respiratoires. On peut donc penser que l'ATP est une molécule-clé dans la contraction musculaire.

> D'après les données du document 2, la tension développée par des cellules musculaires de lapin fraîchement prélevées et incubées avec un précurseur inactif de l'ATP et dans un milieu contenant des ions calcium augmente d'un peu moins de 100 à un peu moins de 200 U.A. entre 160 ms après transformation du précurseur en ATP actif (suite à une brève exposition à une impulsion lumineuse de 347 nm pendant 40 ms). Cela permet de mettre en évidence le rôle de l'ATP dans le travail mécanique des cellules musculaires : en présence d'ions calcium, son ajout dans la cellule provoque une contraction prolongée. Il est à noter que l'enregistrement effectué montre un artefact transitoire induit directement par l'impulsion laser (exposition à la lumière 347 nm) et apparaissant comme une diminution de la tension mesurée.

> L'ATP, ou adénosine triphosphate se compose d'une base azotée, l'adénine, attachée au carbone d'un sucre à 5 atomes de carbone, le désoxyribose, et d'une chaîne de trois acides phosphoriques. L'hydrolyse de la liaison phosphoanhydride de l'ATP libère de l'énergie. C'est une réaction exergonique, qui peut donc être couplée avec les réactions endergoniques dans la cellule et permettre le travail cellulaire. Ceci peut s'expliquer par la différence d'électronégativité entre le phosphore (2,19) et l'oxygène (3,44). L'électronégativité permet de caractériser l'influence que possèdent les atomes sur les électrons de la liaison covalente qui les unit : plus ce différentiel d'électronégativité est grand, plus la liaison est fragilisée.

Question 2

Après avoir réalisé les expérimentations présentées dans l'activité pratique associée au document 3, présentez oralement des résultats expérimentaux démontrant le rôle de l'ATP et du calcium.

La longueur d'un échantillon de cellules de lapin en présence d'ATP seul est de 2,3 cm alors qu'elle est de 1,4 cm après ajout d'ions calcium. La longueur d'un échantillon de cellules de lapin en présence d'ions calcium seul est de 1,8 cm alors qu'elle est de 1,3 cm après ajout d'ATP. Enfin, la longueur d'un échantillon de cellules musculaires de crabe reste inchangée à 2,4 cm en ajoutant des ions calcium à un milieu contenant de l'ATP avec des ions cyanure. Les raccourcissements observés en présence d'ATP et d'ions calcium exclusivement (photo en bas à gauche et en bas à droite) montrent donc que l'ATP et les ions calcium sont nécessaires simultanément à la contraction musculaire.

Question 3

À partir du document 5, décrivez le mécanisme d'action des ions calcium libérés dans le cytosol d'une cellule musculaire suite à un message nerveux (voir aussi schéma-bilan du chapitre 15).

Les modèles tridimensionnels d'une portion d'un filament fin d'actine révélés par la microscopie électronique permettent de mettre en évidence le démasquage d'un site de fixation de la myosine par changement d'organisation de certaines protéines associées au filament fin d'actine en présence d'ions calcium dans le cytoplasme de la cellule musculaire. Ce changement d'organisation est

réversible en l'absence de calcium. La fixation de la myosine sur l'actine peut donc se produire aussi longtemps que la concentration en calcium reste élevée.

Question 4

À partir du document 6, expliquez comment l'hydrolyse de l'ATP permet le glissement d'un filament fin d'actine par rapport à un filament épais de myosine.

Cette action de l'ATP se fait en plusieurs temps. Lors de l'étape d'activation de la tête de myosine suite à l'hydrolyse de l'ATP, la molécule change de conformation (tête pliée) et, tant que des sites de fixation sont démasqués en présence de calcium, se fixe au filament d'actine. La libération des produits d'hydrolyse de l'ATP s'accompagne d'un nouveau changement de conformation de la myosine qui provoque une traction du filament d'actine vers le centre du sarcomère. La fixation d'une nouvelle molécule d'ATP sur la tête de myosine permet son détachement suite à un nouveau changement de conformation. Ce modèle permet donc de montrer comment l'ATP déclenche le détachement de la tête de myosine et de l'actine.

Question 5

Montrez que la répétition du cycle de contraction au niveau des nombreuses têtes de myosine des myofilaments permet le raccourcissement des sarcomères (document 6 et document 6 de l'unité précédente)

À chaque cycle de contraction, une tête de myosine interagit avec un site de l'actine situé de plus en plus près de la strie Z. Les nombreuses têtes de myosine effectuent chacune pour leur compte des cycles de contraction, si bien que les filaments épais tractent les filaments fins vers le milieu de chaque sarcomère. Comme la même chose se produit à l'autre extrémité du filament de myosine, les deux stries Z se rapprochent, ce qui correspond à un raccourcissement du sarcomère.

Unité 4

Question 1

Après avoir pris connaissance des symptômes de la dystrophie musculaire de Duchenne (DMD), décrivez les manifestations de la DMD à l'échelle cellulaire (documents 1 et 2).

La dystrophie musculaire de Duchenne (DMD) est caractérisée par une dégénérescence musculaire (document 1). À l'échelle cellulaire, on comprend que le maintien de l'intégrité de la cellule musculaire est affecté de façon systématique, ce qui finit par désorganiser le muscle en augmentant la part de tissu conjonctif au détriment des cellules musculaires (document 2 ; Juban, 2018).

Question 2

À partir des documents 3 et 4, identifiez la principale molécule en jeu dans cette pathologie et expliquez sa survenue exclusive chez les garçons.

L'absence de dystrophine dans la région sous-membranaire des cellules musculaires chez les patients atteint de DMD par comparaison avec des individus contrôles laisse à penser que cette protéine joue un rôle-clé dans cette maladie (document 3 ; Leturcq, F., & Tuffery-Giraud, S, 2015). Le gène DMD qui code la protéine dystrophine est localisé sur le chromosome X ce qui explique le fait qu'elle ne touche que les garçons. De plus en raison de sa grande taille, des mutations ont davantage de risque de se produire lors de la méiose à l'origine des gamètes (document 4).

Question 3

À partir des documents 5 et 6, précisez les interactions entre cette molécule, les myofibrilles et la matrice extracellulaire afin d'expliquer les symptômes musculaires caractéristiques de cette maladie.

La matrice extracellulaire est un assemblage de molécules qui lie les cellules entre elles et les organise en tissus. Elle assure notamment la résistance et l'élasticité de la peau. Deux composants essentiels de la matrice extracellulaire sont mis en évidence au niveau des cellules musculaires d'un individu sain : le collagène VI et le perlecan (document 5 ; Bovolenta, 2010). La dystrophine forme un réseau protéique avec les filaments d'actine du cytosquelette, reliant ainsi les myofibrilles aux fibres de collagène qui forment la matrice extracellulaire : cet ensemble de protéines conserve flexible et intacte la membrane de la fibre durant les cycles de contractions. Son absence ou du moins une dystrophine tronquée est donc responsable des lésions cellulaires plus fréquentes que la normale au niveau du tissu musculaire.

Question 4

Concluez en évoquant l'intérêt de ces connaissances fondamentales dans la recherche de pistes thérapeutique pour les individus atteints de DMD ou d'autres dystrophies musculaires.

Les connaissances fondamentales, aussi bien génétiques que concernant les interactions de la dystrophine avec d'autres molécules des cellules musculaires, mais aussi à l'échelle des interactions cellulaires dans le processus de régénération de cellules musculaires lésées, sont utiles pour espérer inventer des pistes thérapeutiques. On peut par exemple chercher à stopper le processus typique de remplacement progressif des fibres musculaires par du tissu fibreux observé chez les patients atteints de DMD en agissant sur des molécules régulatrices. Une autre voie s'appuie sur la connaissance de la mutation causale chez le patient afin de pouvoir entreprendre une thérapie génique, qui consiste à remplacer le gène DMD défectueux par un gène DMD thérapeutique, transporté à l'aide d'un vecteur dans les cellules musculaires concernées.

Unité 5

Question 1

Expliquez en quoi les résultats expérimentaux (activité pratique p. 438, doc. 1 et 2) montrent l'existence de deux types de métabolisme en fonction de la teneur en dioxygène du milieu.

> En présence de dioxygène (document 1), la bactérie *Zymomonas mobilis*, la concentration en glucose diminue de 100 à 0 mM en 9 h et la concentration en éthanol reste limitée à moins de 60 mM alors qu'en absence de dioxygène, la concentration de glucose diminue de 100 à 10 mM en 13h puis jusqu'à 0 en 26h, et la concentration en éthanol augmente de 0 à un peu plus de 200mM en 9h puis reste quasiment constante à ce niveau. En plus d'utiliser le glucose par la respiration cellulaire en présence de dioxygène, cette bactérie peut donc utiliser une autre voie métabolique en l'absence de dioxygène : la fermentation alcoolique.

> Dans un muscle humain (document 2), une production de lactate d'environ 3 à 22 mmol.L⁻¹ est mesurée pendant un sprint de 400 m (en 45 s). On peut également mesurer une production de lactate d'env. 2 à 8 mmol.L⁻¹pendant un sprint de 100 m (environ 10 s). En plus de la respiration, les cellules musculaires peuvent engager une autre voie métabolique produisant du lactate : c'est la fermentation lactique.

> En présence de dioxygène, les levures oxydent le glucose grâce à la respiration cellulaire. En anaérobiose, on observe qu'après une injection de glucose dans le milieu de culture à t = 60 s, une augmentation de la concentration en CO₂ de 40 à 120 mM entre t = 150 et t = 600 secondes ainsi qu'une augmentation de la concentration en éthanol de 0,002 à 0,011 % entre t = 100 et t = 600

secondes. Le glucose est donc dégradé incomplètement par une autre voie métabolique productrice de CO₂ et d'éthanol : la fermentation alcoolique.

Question 2

Utilisez vos connaissances d'enseignement scientifique pour montrer en quoi le récit de la découverte de la glycolyse présenté doc. 3 et 4 est un exemple de démarche scientifique.

> Plusieurs indices permettent de penser que ce récit de la détermination du devenir du glucose dans le cytoplasme entre 1897 et 1935 relève d'une démarche scientifique (voir p. 10-12 du manuel d'Enseignement scientifique Belin de terminale) :

- non scolasticité, c'est-à-dire ne pas recourir à un argument d'autorité : par exemple, rien n'indique que Meyerhof (ou les autres chercheurs cités), bien que Prix Nobel en 1922, utilise ce prestige pour imposer ses hypothèses ; au contraire, avec d'autres, il *tente d'assembler le puzzle* ;
- ces recherches s'appuient sur des faits : on parle de différentes *molécules* mises en évidences à partir de prélèvements sur des organismes (acide lactique en 1907, ATP en 1928, extraction à partir de levures en 1897 ou de cellules musculaires dans les années 1930), on parle d'*analyse* (début des années 1930), on suggère des *mesures* (par exemple, en 1907) ;
- justification rationnelle et reproductibilité des démarches : à chaque fois on utilise le verbe « *montrer* » indiquant l'existence de démarches scientifiques, ici expérimentales (par exemple en 1907 Fletcher et Hopkins *montrent* que la teneur en acide lactique augmente dans le muscle au repos en absence de dioxygène, tandis qu'il disparaît quand du dioxygène est réintroduit) ;
- l'objectivité des démarches est obtenue collectivement : ce récit montre que plusieurs équipes de chercheurs ont participées aux recherches ;
- la science ne produit pas des vérités immuables mais des modèles soumis à la réfutation ; plusieurs modèles pouvant parfois coexister au sein de la communauté scientifique : en 1918, Meyerhof et Hill *proposent* que la cellule musculaire tire son énergie d'un cycle de l'acide lactique ; le « cycle de l'acide lactique » est *remis en cause* dans les années 1930 par Meyerhof (voir aussi un complément proposé pour appuyer ce point) ; en 1932, l'équipe d'Emden *propose un modèle* décrivant la glycolyse.

> Suivant les compléments mis à disposition des élèves, voir en amont (notamment référence à des publications dans des revues scientifiques,), on pourra aussi ajouter l'évaluation par les pairs, notamment par le jeu de la publication dans une revue scientifique à comité de lecture.

Question 3

Déterminez le bilan en ATP de la glycolyse et montrez que cette seule voie métabolique ne peut pas expliquer les résultats expérimentaux précédents (doc. 5 et 6)

Le document 5 montre que la glycolyse aboutit à une oxydation partielle du glucose, molécule à 6 atomes de carbone, en deux molécules de pyruvate, molécule à 3 atomes de carbone. Elle conduit à la synthèse de 4 molécules d'ATP. On peut relever qu'il faut 2 ATP pour transformer glucose en fructose 1,6-bisphosphate soit un bénéfice net de la glycolyse de 2ATP.

Le document 2 a montré une production de lactate dans les cellules musculaires, or la glycolyse ne produit pas de lactate mais du pyruvate. Une autre voie métabolique que la glycolyse est donc en jeu dans la fermentation lactique.

Unité 6

Question 1

Décrivez les mitochondries dans différentes cellules et conditions (documents 1, 2 et 3).

Une mitochondrie est pourvue d'une double membrane, délimitant un espace intermembranaire avec des invaginations nommées crêtes mitochondriales observées au sein de la matrice (document 1). Le document 2 montre l'absence de mitochondries en anaérobiose alors qu'elles sont nombreuses chez des levures cultivées en anaérobiose, ce qui permet de penser qu'elles jouent un rôle central dans la respiration cellulaire. Ceci montre que les mitochondries ne doivent pas être considérées comme des entités uniques, mais plutôt comme un réseau dynamique et dont le nombre et l'architecture change dans des conditions physiologiques normales. On peut postuler qu'il en est de même dans d'autres types cellulaires et chez d'autres organismes, comme les cellules musculaires humaines. La cellule musculaire (document 3) montre de très nombreuses mitochondries. On peut observer qu'elles sont localisées dans des régions cellulaires distinctes : entre les myofibrilles (en contact étroit avec elles au niveau de la zone de part et d'autre de la strie Z), près du noyau et dans la zone sous le sarcolemme.

Question 2

Précisez le devenir immédiat du pyruvate issu de la glycolyse (activité pratique, document 4).

Une suspension de mitochondries est obtenue à partir d'un myocarde de mammifère (activité pratique). On y injecte soit la molécule de glucose soit la molécule issue de la glycolyse, le pyruvate. Seul le pyruvate conduit à une consommation du dioxygène : cette molécule est donc oxydée par les mitochondries lors de la respiration. Le document 4 apporte quelques éléments historiques et explique de façon résumée comment Krebs a compris d'une part l'idée d'un cycle de réactions enzymatiques par recyclage du citrate et, d'autre part, la nature de la molécule entrant dans le cycle : l'acétyl-coenzyme A, une molécule à 2 carbones. On peut donc proposer que le pyruvate donne de l'acétyl-coenzyme A qui entre dans un cycle de réactions faisant intervenir du citrate nommé cycle de Krebs.

Question 3

Récapitulez les étapes de l'oxydation du pyruvate produisant des composés réduits en précisant leur localisation. Indiquez le devenir de ces composés réduits en lien avec la production d'ATP (documents 5 à 7).

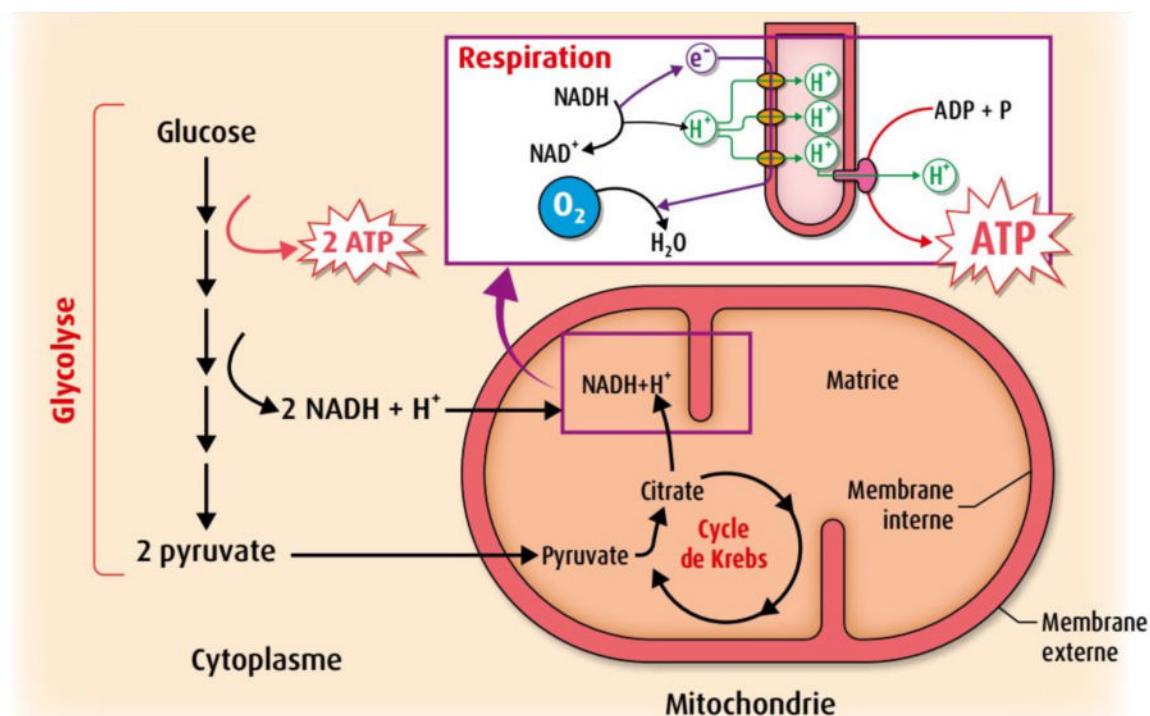
Le document 5 explique le devenir du pyruvate issu de la glycolyse en donnant le principe de fonctionnement du cycle de Krebs au sein de la matrice mitochondriale. Une première étape consiste en la conversion du pyruvate en acétyl-coenzyme A. Des molécules de CO₂ sont libérées et des composés réduits NADH et FADH₂ sont produits au cours de ce cycle.

Les documents 6 et 7 expliquent la production d'ATP en lien avec la réoxydation de ces composés réduits au niveau de la chaîne respiratoire mitochondriale. Le document 6 est un détail de la mitochondrie présentée dans le document 1. On observe, sur une crête mitochondriale, des sphères pédonculées. Ce sont des enzymes : les ATP synthases, intervenant dans la synthèse de l'ATP.

> Le document 7 explique que cette synthèse d'ATP par l'ATP synthase est réalisée par couplage avec un transport de protons entre l'espace intermembranaire et la matrice mitochondriale séparés par cette membrane interne. Ces protons ont été transportés dans cet espace intermembranaire à partir de la matrice par des complexes protéiques encastrés dans la membrane mitochondriale interne. Ces complexes forment la chaîne respiratoire mitochondriale et constituent une série d'accepteurs d'électrons provenant des coenzymes réduits NADH et FADH₂. Ces composés réduits y sont réoxydés par la réduction de dioxygène en eau, l'accepteur final d'électrons étant donc le dioxygène. Chaque transfert d'électrons est associé à un transfert de protons.

Question 4

Réalisez un schéma fonctionnel qui montrera comment la cellule musculaire produit de l'ATP à partir de molécule de glucose en présence de dioxygène, en mettant en relation la glycolyse, le cycle de Krebs, la chaîne respiratoire et l'ATP synthase et en localisant ces voies dans une cellule musculaire.



La production d'ATP dans la cellule musculaire en présence de dioxygène à partir du glucose

Question 5

Calculez le nombre de molécules d'ATP produites et la quantité d'énergie obtenue par molécule de glucose en aérobiose dans une cellule musculaire (unité 5, documents 4 à 7).

On peut calculer le nombre de molécules d'ATP suite à la glycolyse et à la respiration cellulaire, pour une molécule de glucose, en partant des valeurs suivantes au niveau de l'ATP synthase : classiquement on admet les valeurs de 3 ATP produits pour une molécule de NADH et 2 ATP pour une molécule de FADH₂.

Réactions	Nombre d'ATP produit directement au niveau du substrat	Nombre d'ATP produit par chaîne respiratoire et ATP synthase
Glycolyse : glucose → 2 pyruvate	4ATP -2ATP = 2 ATP	2 NADH,H ⁺ soit 2x3 = 8 ATP
Cycle de Krebs pour 2 pyruvate (décarboxylation des 2 pyruvate et cycle en lui-même)	2 ATP	8 NADH,H ⁺ +2FADH ₂ soit (8x3 + 2x2) =28 ATP
Total	4 ATP	34 ATP
Total pour une molécule de glucose	38 ATP	

On obtient donc au total 36 ATP par molécule de glucose suite aux trois ensembles de réactions, soit pour 1 mole de glucose, 36 moles d'ATP = $36 \times 50 \text{ kJ} = 1800 \text{ kJ}$.

Unité 7

Question 1

À partir du document 1, précisez le devenir immédiat du pyruvate issu de la glycolyse en conditions anaérobies dans une cellule musculaire. Calculez le nombre de molécules d'ATP produites et la quantité d'énergie obtenue par molécule de glucose en anaérobiose dans une cellule musculaire

En conditions anaérobies, le pyruvate est transformé en lactate au cours de la fermentation lactique, permettant la réoxydation des coenzymes réduits NADH, H⁺. Par comparaison avec le cycle de Krebs, on constate que le lactate est une molécule à 3 carbones comme le pyruvate : il n'y a pas de décarboxylation supplémentaire, et donc ni de composés réduits supplémentaires produit, ni d'ATP supplémentaire. Le bilan de la glycolyse suivie de la fermentation lactique en reste donc à $4 - 2 = 2$ ATP par molécule de glucose soit pour 1 mole de glucose, 2 moles d'ATP = $2 \times 50 \text{ kJ} = 50 \text{ kJ}$.

Question 2

Comparez les deux types d'efforts présentés dans le document 2. À partir des données du document 3, justifiez la relation entre performance et capacité métabolique énoncée dans le document 4.

> Deux types d'effort sont présentés dans le document 2. On a un marcheur athlétique qui dépense 5625 kJ pour 1h15 soit 4500 s et une sprinteuse athlétique qui dépense 130 kJ en 10 s.

> Le document 4 énonce que la performance pour des efforts nécessitant de soutenir des puissances très élevées durant de courtes périodes (comme la course à pied sur 400 m par exemple) dépend de la capacité anaérobiose glycolytique, c'est-à-dire la capacité des cellules musculaires à réaliser la fermentation lactique à l'issue de la glycolyse pour fournir de l'ATP de façon massive et rapide.

> Les données présentées dans le document 3 permettent d'interroger la contribution des deux voies métaboliques anaérobies et aérobies lors de différents types d'efforts. On peut extraire et calculer les parts suivantes des métabolismes anaérobies par rapport au métabolisme aérobie :

Graphique 1

Distance de la course à pied (en m)	Part de métabolisme anaérobie
200	33 mL équivalent O ₂ .kg ⁻¹ .min ⁻¹ pour un total de 45,5 soit 73 %
400	35 mL équivalent O ₂ .kg ⁻¹ .min ⁻¹ pour un total de 83 soit 42 %
1500	41,7 mL équivalent O ₂ .kg ⁻¹ .min ⁻¹ pour un total de 291,7 soit 14 %

Graphique 2

Durée de l'effort (en s)	Part de métabolisme anaérobie
10	94 %
120	37 %
500	10 %

On montre que l'importance de l'approvisionnement en énergie d'origine anaérobie diminue relativement à l'approvisionnement en énergie aérobie à mesure que la distance parcourue ou que la durée de l'effort augmente, ce qui confirme la relation énoncée. On peut postuler que cette performance est en partie au moins liée aux enzymes en jeu qui sont disponibles pour ces voies métaboliques dans les cellules musculaires concernées et qu'un entraînement efficace devrait reposer sur une amélioration de cette disponibilité.

Question 3

À partir des documents 5 à 7, indiquez comment se traduit cette contribution au niveau de l'organisation du muscle à l'échelle cellulaire.

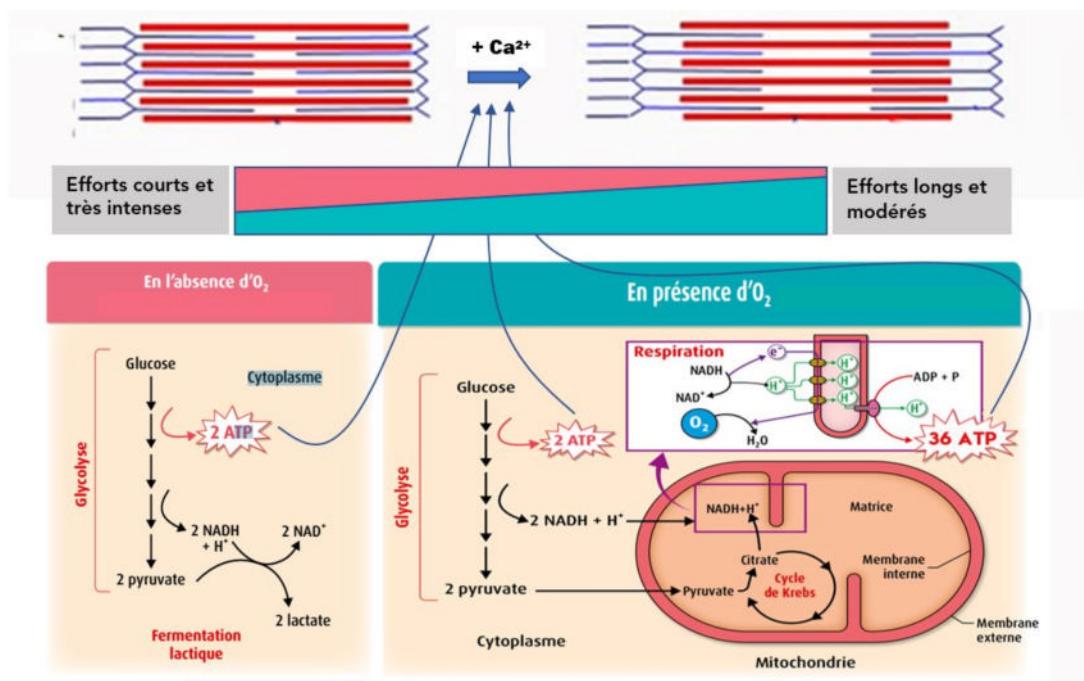
> Les documents 5 et 7 montrent deux types de cellules musculaire qui coexistent dans un même muscle : d'une part les cellules de type I, ou fibres rouges, qui se distinguent par une teneur en enzymes de la fermentation lactique faible et une teneur en enzymes du cycle de Krebs et de la chaîne respiratoire élevée, donc pouvant être associée au métabolisme aérobie, et d'autre part, les cellules de type II, ou fibres blanches, au diamètre plus grand, qui se distinguent par une teneur en enzymes de la fermentation lactique élevée et une teneur en enzymes du cycle de Krebs et de la chaîne respiratoire faible, donc pouvant être associée au métabolisme anaérobie. On relève également un réseau capillaire plus développé dans les cellules musculaires de type I que dans celles de type II.

> Le document 5 montre que la musculature d'athlètes performants dans des sports de résistance (exercice de courte durée approchant la charge maximale) comme ici le sprint contient une plus grande proportion de cellules musculaires de type II donc associée au métabolisme anaérobie.

> Le document 6 montre qu'un entraînement spécifique en endurance (exercices de longue durée n'atteignant pas la charge maximale) conduit à une augmentation de la proportion des cellules de type I associée au métabolisme aérobie (environ 70 % de cellules musculaires de type I chez les coureuses de fond) alors qu'un entraînement spécifique en puissance (exercices intenses de courte durée) conduit à une augmentation de la proportion des cellules de type II associée au métabolisme anaérobie (environ 73 % de cellules musculaires de type II chez les sprinteuses).

Question 4

Complétez le schéma fonctionnel précédent par les voies du métabolisme anaérobie présenté dans cette unité, en localisant ces voies dans une cellule musculaire et en mettant en relation le type d'effort et complémentarité des métabolismes aérobie et anaérobie.



Contribution de la fermentation lactique et de la respiration dans la production d'ATP dans la cellule musculaire à partir du glucose en fonction du type d'effort

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

On cherche à expliquer l'effet dopant de stéroïdes anabolisants androgéniques (molécules de synthèse proche d'une hormone sexuelle, la testostérone) sur la masse musculaire ainsi que les risques que leur usage représente. Pour ceci, on s'appuie sur des résultats de mesures issues de deux études menées chez des hommes sous l'action de ces molécules.

• **Doc. 1.** Lors d'un essai chez des hommes jeunes répartis en cinq groupes soumis à des injections de différentes quantité de testostérone, on obtient, pour des valeurs supérieures à la production naturelle (qui est de 50 mg de testostérone par semaine), une augmentation de volume du quadriceps d'autant plus grande que la quantité de testostérone de synthèse injectée pendant 20 semaines est grande (de $20 \pm 15 \text{ cm}^3$ en plus pour 100 mg de testostérone injectée par semaine à $70 \pm 30 \text{ cm}^3$ pour 600 mg injectée par semaine). Il en est de même pour la masse des muscles squelettiques (de $2,7 \pm 1 \text{ kg}$ en plus pour 100 mg de testostérone injectée par semaine à $3,7 \pm 1 \text{ kg}$ pour 600 mg injectée par semaine. Pour une dose inférieure (25 mg par semaine) ou équivalente à la production naturelle de testostérone, on n'obtient pas de variation notable de la mase ou du volume musculaire mesuré, du moins en tenant compte de l'intervalle d'incertitude. Il existe donc un effet dose-réponse entre les doses de testostérone reçues et les gains de masse et de volume musculaires.

• **Doc. 2.** Une étude de cas-témoin chez une centaine d'hommes pratiquant la musculation récréative en prenant ou non des stéroïdes anabolisants montre que le volume moyen des testicules est d'autant plus petit que la durée de prise est grande (de 22 mL après 12 semaines de consommation de stéroïdes à 11 mL après 1024 semaines chez des nouveaux consommateurs de stéroïdes, et de 16 à 9 mL pour les mêmes durées chez d'anciens consommateurs, en comparaison d'un volume moyen d'environ 22 mL qui reste stable pour les témoins sans prise de stéroïdes). On peut donc penser que ces prises de stéroïdes peuvent entraîner une atrophie testiculaire.

• **Mobilisation des connaissances.** On sait que les tubes séminifères des testicules produisent de nombreux spermatozoïdes en continu et que certaines cellules interstitielles des testicules produisent de la testostérone, l'hormone sexuelle mâle qui stimule la spermatogénèse et permet le développement et le maintien des caractères sexuels masculins. De plus, la testostérone exerce également un rétrocontrôle négatif sur la production de GnRH. On peut donc penser que la prise de ces molécules exogènes en conduisant à la diminution du volume testiculaire va affecter la production de spermatozoïdes ainsi que les caractères sexuels secondaires masculins.

• **Étude critique.** La seconde étude (document 2) est une étude cas-témoin, c'est-à-dire une étude dans laquelle on compare un ou plusieurs groupes de cas (ici, deux groupes) avec un groupe témoin : son niveau de preuve étant faible, la relation en reste au niveau d'une corrélation, la causalité ne pouvant être que suggérée, d'autres études étant nécessaires afin d'obtenir un faisceau de preuves concordantes. On ne peut cependant pour des raisons éthiques mener un essai clinique chez des humains en vue de tester l'effet négatif constaté.

La première étude (document 1) est un essai clinique randomisé (les volontaires ont été assignés au hasard à l'un des groupes) en double-aveugle (ni le sujet, ni l'équipe de recherche ne connaît la dose utilisée) afin de limiter les biais expérimentaux liés à des résultats attendus ; cependant l'effectif reste assez limité : son niveau de preuve est donc plus élevé que la seconde étude et relève de la présomption scientifique. On peut donc énoncer une causalité qui pourra encore être testé par d'autres essais randomisés en double-aveugle et au final pouvoir réaliser une méta-analyse afin d'obtenir une causalité plus robuste encore.

Exercice 3

On cherche une nouvelle voie thérapeutique permettant de limiter l'atrophie musculaire suite à certaines conditions physiopathologiques.

- **Doc. 1.** En comparaison avec les souris témoins, les souris mutantes n'exprimant pas Rev-erb α présentent une masse musculaire réduite associée à des tissus musculaires plus petits (environ 32 contre 36 mg). On peut donc penser que le récepteur nucléaire Rev-erb α joue un rôle dans le contrôle de la masse musculaire.
- **Doc. 2.** La comparaison de résultats d'immunomarquage de FoxO1 (une protéine impliquée dans l'atrophie musculaire) de cellules musculaires de souris en culture traitées ou non avec de la dexaméthasone (une autre protéine qui active différents gènes impliqués dans l'atrophie musculaire) et co-traitées ou non avec SR9009, montre que l'intensité nucléaire de FoxO1 est significativement augmentée lors du traitement à la dexaméthasone par rapport au témoin, tandis que le co-traitement SR9009 ne conduit pas à une différence significative avec le témoin. Comme on a montré par ailleurs que SR9009 est une molécule (pharmacologique) qui active la protéine Rev-erb- α , on peut proposer l'idée que Rev-erb- α est capable de moduler la localisation cellulaire de FoxO1 en l'empêchant de rentrer dans le noyau et donc d'activer l'atrophie du muscle.
- La stimulation de l'activité de Rev-Erb- α dans les muscles lésés peut donc accélérer la réparation / différenciation musculaire régénérative. Rev-Erb peut donc être une cible thérapeutique puissante pour une myriade de troubles musculaires.

Exercice 4

- **Doc. 1.** On a mesuré la concentration de certaines protéines associées à la biogenèse mitochondriale, comme la PGC-1 α , dans des échantillons musculaires prélevés par biopsie (*vastus lateralis*) chez dix jeunes adultes qui ont suivis un entraînement par intervalles comprenant des sprints répétés. La concentration de la PGC-1 α est plus élevée après qu'avant les quatre semaines d'entraînement (augmentation de 33 %).
- **Doc. 2.** L'activité mitochondriale a été significativement diminuée chez les souris dépourvues de PGC-1 α (KO), comme en témoigne l'intensité réduite de la coloration COX dans les coupes de muscle, ainsi qu'une activité COX plus faible mesurée par une méthode biochimique (de 8,2 à 5 $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ de tissu musculaire).
- L'entraînement par sprints répétés constitue manifestement un stimulus adéquat pour créer des adaptations mitochondrielles. On peut donc penser que l'entraînement par intervalles courts a sa place dans l'entraînement en sports d'endurance.

Exercice 5

- On s'intéresse à l'origine des courbatures, un état de fatigue musculaire associé à des douleurs faisant suite à certains exercices physiques, avec l'intention de remettre en cause une croyance répandue dans le grand public et de détailler un savoir scientifique mettant en relation faits et connaissances préalables.
- **L'origine des courbatures, des croyances au savoir scientifique**
Une croyance repose sur une relation de confiance voire d'autorité, et est indifférente voire fermée à

toute réfutation. La proposition par des non-spécialistes d'associer courbatures et accumulation de lactate relève donc à priori d'une croyance. Au contraire, un savoir scientifique est élaboré rationnellement, est issu d'une validation collective et indépendante (il est évalué par les pairs lors de la publication d'un article scientifique – on parle de façon plus courante d'études scientifiques –puis de son examen par l'ensemble de la communauté scientifique experte dans le domaine en question), et est donc soumis en permanence à une éventuelle réfutation. Ici, de nombreuses études scientifiques sont évoquées et l'association des courbatures à des microlésions au niveau d'un certain nombre de sarcomères relève donc d'un savoir scientifique.

- **Un mécanisme de la contraction musculaire qui permet de préciser aux différentes échelles les conséquences de microlésions du muscle**

Il s'agit ensuite d'expliquer le mécanisme de la contraction musculaire aux différentes échelles, afin de préciser la relation entre microlésions au niveau de sarcomères et courbatures qui font suite à certains exercices.

À l'échelle moléculaire, les sarcomères sont composés de filaments d'actine et de myosine. Un changement de formes de protéines du sarcomère (actine, myosine) en présence d'ions calcium et avec utilisation d'ATP entraîne un glissement de protéines du sarcomère les unes par rapport aux autres et donc un raccourcissement du sarcomère. La microlésion (visible au MET dans un échantillon de muscle issu de biopsie) correspond à une désorganisation du sarcomère avec rupture d'une partie de ces filaments et donc le raccourcissement du sarcomère n'est plus possible.

La cellule musculaire est une cellule spécialisée caractérisée par un cytosquelette particulier organisé en myofibrilles, qui sont composées de la répétition de sarcomères : la contraction de sarcomères entraîne la contraction de cellules musculaires. Des microlésions au niveau d'un certain nombre de sarcomères vont donc affecter la contraction des cellules musculaires concernées.

À l'échelle de l'organe, le muscle squelettique est un ensemble de cellules musculaires : la contraction de plusieurs cellules musculaires entraîne un raccourcissement du muscle. Les cellules musculaires concernées par les microlésions vont donc entraîner une baisse de la capacité à se contracter du muscle (fatigue) associée à des douleurs.

À l'échelle de l'organisme, les muscles squelettiques s'insèrent sur des os : la contraction du muscle entraîne une traction des tendons sur les os, ce qui permet un mouvement d'une partie du corps. Ces microlésions, du moins si elles sont en nombre important, vont donc limiter ce mouvement.

- On peut ainsi comprendre que les microlésions au sein de certains sarcomères du cytosquelette des cellules musculaires, suite à certains exercices musculaires, peuvent entraîner fatigue et douleurs, et donc expliquer des courbatures, alors que l'accumulation de lactate – qui disparaît dans un délai bien plus court que la durée des courbatures – n'intervient pas dans ce trouble.

Exercice 6

- La contraction d'une cellule musculaire nécessite des ions calcium et l'utilisation d'ATP comme source d'énergie. Cet ATP, dont la cellule ne possède quasiment pas de réserve (tout au plus pour quelques contractions), est produit en permanence à partir de matière organique, notamment le glucose. On s'intéresse à la voie métabolique, incluant la chaîne respiratoire, à l'origine de la production d'ATP en présence de dioxygène, afin de préciser une conséquence du vieillissement.
- La glycolyse, une première étape de la production d'énergie, au sein du hyaloplasme de la cellule musculaire.

Le décryptage par les scientifiques des transformations chimiques de la glycolyse s'est appuyé notamment sur des analyses *in vitro* d'extraits de cellules musculaires ou de levures. La glycolyse constitue la première étape de cette oxydation. Elle se déroule dans le cytoplasme et aboutit à l'oxydation partielle du glucose en 2 molécules de pyruvate, à la synthèse de deux molécules d'ATP et à la production de deux molécules d'un composés réduits NADH, H⁺. Le stock intracellulaire de NAD⁺ étant limité, il doit donc être régénéré en permanence, faute de quoi la glycolyse est bloquée.

- Le cycle de Krebs et la chaîne respiratoire, deux étapes de la production d'énergie au sein des mitochondries de la cellule musculaire

En présence de dioxygène, la respiration, une voie métabolique aérobie qui se déroule dans la mitochondrie, permet cette régénération, couplée à une importante synthèse d'ATP. Le pyruvate entre dans la matrice de la mitochondrie où son oxydation se poursuit dans une nouvelle série de transformations chimiques, le cycle de Krebs, produisant du CO₂ et des composés réduits comme le NADH, H⁺. La chaîne respiratoire mitochondriale permet la réoxydation de ces composés réduits en NAD⁺ au niveau ces crêtes mitochondrielles, par la réduction de dioxygène en eau.

- Les conséquences du vieillissement des cellules musculaires

La chaîne respiratoire fait intervenir plusieurs complexes protéiques insérés dans la membrane mitochondriale interne. Une baisse de l'expression (d'environ 25 %) de différentes protéines impliquées dans la chaîne respiratoire au cours du vieillissement va donc limiter cette réoxydation du NAD⁺ et donc freiner le cycle de Krebs ou la glycolyse. L'ATP synthase est également affectée ce qui va limiter la synthèse d'ATP.

- On en conclut qu'une baisse de l'expression de différentes protéines impliquées dans la chaîne respiratoire au cours du vieillissement va affecter directement et indirectement la production d'ATP par voie aérobie et ainsi possiblement limiter les capacités musculaires en endurance.

Exercice 7

- Un muscle contient des cellules musculaires caractérisées par un cytosquelette particulier de nature protéique assemblé en myofilaments, formés principalement de filaments épais de molécules de myosine et de filaments fins de molécules d'actine. Ces filaments, tous parallèles, sont regroupés en myofibrilles, constituées d'une succession d'unités fonctionnelles pour la contraction, les sarcomères, reliés les uns aux autres au niveau de complexes protéiques formant les stries Z. On cherche à expliquer comment les muscles sont affectés par le vieillissement en comparant l'abondance de certaines protéines musculaires chez des individus jeunes (environ 25 ans) avec celle chez des individus plus âgés (environ 70 ans).

1. Le vieillissement affecte la proportion des types de cellules musculaires

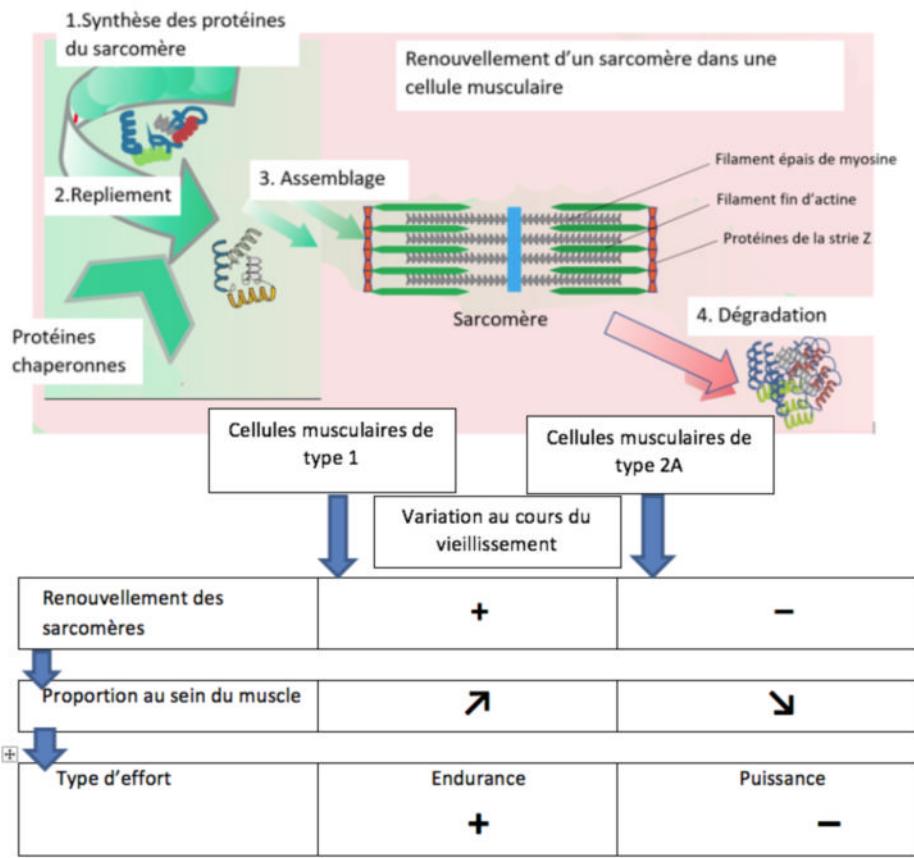
On sait que les muscles sont composés de différents types de cellules musculaires : des cellules de type 1, sollicitées lors d'efforts de longue durée et modérés, et des cellules de type 2A et 2X, sollicitées lors d'exercices nécessitant de la puissance. Ces types cellulaires se distinguent notamment par des différences de quantité de mitochondries et par leur vitesse de contraction. Des coupes transversales d'échantillons représentatifs obtenus par biopsie musculaires colorées avec différents anticorps spécifiques montrent une modification de la proportion de ces types cellulaires avec le vieillissement : la proportion de cellules musculaires de type 1 augmente d'environ 20 % alors que chaque autre type cellulaire (2A et 2X) baisse de 10 %.

2. Le vieillissement affecte l'abondance de certaines protéines musculaires impliquées dans le renouvellement des sarcomères suivant le type de cellules musculaires

On sait également que certaines protéines appelées protéines chaperonnes aident au repliement de protéines constituant le sarcomère lors son renouvellement, renouvellement nécessaire au bon fonctionnement des cellules musculaires. La comparaison de la variation de l'abondance au cours du vieillissement de certaines de ces protéines chaperonnes montre une augmentation dans les cellules de type 1 (notamment 4 fois plus de protéines CD37 qui aide au repliement de la myosine et 2,3 fois plus de préfoldine, une protéine qui intervient sur le repliement de l'actine) et, au contraire, une faible variation (comprise dans l'intervalle d'incertitude) voire une diminution dans les cellules de type 2A (notamment 75 % de moins de CRYAB, une protéine qui intervient sur le repliement de la desmine, une protéine de la strie Z; la strie Z étant un complexe protéique qui relie les sarcomères entre-eux et qui est primordial au maintien de l'intégrité des cellules musculaires au fil des contractions répétées). Le renouvellement des sarcomères est donc mieux assuré dans les cellules de type 1 que dans les cellules de type 2A.

- En conclusion, on peut dire que le vieillissement humain affecte inégalement les différents types de cellules musculaires. Les cellules musculaires de type 1 augmentent leur proportion pendant le vieillissement et régulent à la hausse des protéines chaperonnes d'actine et de myosine, tandis qu'un changement opposé se produit dans les cellules musculaires de type 2A. Cela permet de penser que la capacité d'endurance pourrait ainsi être augmentée alors que celle d'exercice nécessitant de la puissance serait diminuée, sous réserve notamment du maintien au même niveau des capacités des voies métaboliques, à étudier par ailleurs.

• Schéma du vieillissement spécifique des deux principaux types de cellules musculaires



Exercice 8

On demande ici à l'élève de réaliser deux mesures par ExAO successives (levures Rho⁺ et Rho⁻) avec les sondes oxymétriques et CO₂, de comparer les résultats obtenus et attendus à partir des connaissances et des documents fournis.

La mise en forme recommandée est constituée de deux graphiques correctement légendés.

Éléments d'évaluation

Proposer une stratégie pour résoudre une situation problème	
On attend du candidat une stratégie réaliste et cohérente avec la recherche à mener et les ressources, précisant ce qu'il fait, comment il le fait et ce qu'il attend. L'examineur évalue au fil de l'étape A. <u>Aide mineure</u> : le candidat est sur la bonne voie mais l'évaluateur lui demande une argumentation sur la stratégie ou utilise quelques questions ouvertes pour souligner une imprécision dans la stratégie. <u>Aide majeure</u> : l'évaluateur réoriente la stratégie proposée et/ou ajoute explicitement un élément qui manque (exemple : un témoin) pour qu'elle conduise à des résultats exploitables.	Niveau A = seul ou avec <u>une aide mineure</u> , il obtient une stratégie opérationnelle . Niveau B = avec <u>plus d'une aide mineure</u> , il obtient une stratégie opérationnelle . Niveau C = avec <u>une aide majeure</u> , il obtient une stratégie opérationnelle . Niveau D = malgré <u>toutes les aides</u> apportées il est incapable de mettre au point une stratégie opérationnelle.

<p>On acceptera et on valorisera toute idée de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - vouloir vérifier que les levures mutantes Rho⁻ ne sont pas capables de réaliser le métabolisme aérobie au contraire des levures témoins; - expérimentation ExAO avec une sonde oxymétrique et une sonde CO₂ ; - pas de mise en évidence de respiration chez les levures mutantes testées au contraire des témoins 	
Mettre en œuvre un protocole pour résoudre une situation problème	
<p>On attend du candidat qu'il mette en œuvre le protocole : maitrise du matériel, respect des consignes et gestion correcte du poste de travail.</p>	<p>Niveau A = seul ou avec une aide mineure, il obtient des résultats exploitables.</p>
<p>Seules aides majeures :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'examinateur réalise le geste à la place du candidat (mise en place du protocole d'ExAO). - L'examinateur intervient pour imposer au candidat les conditions de travail et les règles de sécurité. <p>Le rangement du poste de travail est comptabilisé comme une aide mineure.</p> <p>Toutes les autres aides doivent être considérées comme mineures.</p>	<p>Niveau B = avec <u>plus d'une aide mineure</u>, il obtient des résultats exploitables.</p> <p>Niveau C = avec <u>une aide majeure</u>, il obtient des résultats exploitables.</p> <p>Niveau D = malgré <u>toutes les aides</u> apportées il n'obtient pas de résultats exploitables. <i>Un document de secours</i> est indispensable.</p>
Présenter les résultats pour les communiquer.	
<p>On attend du candidat qu'il présente une production :</p> <ul style="list-style-type: none"> - techniquement correcte (soignée, lisible, appropriée, ...); - bien renseignée (informations complètes et exactes) ; - bien organisée et donc pertinente (informations traduites dans le sens du problème à traiter). <p>La communication prépare à l'identification éventuelle d'une absence de respiration chez les levures testées contrairement aux levures témoins.</p>	<p>Niveau A = trois critères</p> <p>Niveau B = deux des trois critères</p> <p>Niveau C = un seul des trois critères</p> <p>Niveau D = rien à valoriser</p>
Exploiter les résultats obtenus pour répondre au problème	
<p>On attend du candidat qu'il :</p> <ul style="list-style-type: none"> - exploite l'ensemble des résultats (= je vois) ; - intègre des notions (issues des ressources et de la mise en situation) (= je sais) ; - construise une réponse au problème posé explicative et cohérente intégrant les résultats (= je conclus). <p>On voit que les levures mutantes ne sont pas capables de réaliser le métabolisme aérobie au contraire des levures témoins. On peut donc confirmer le modèle proposé de la respiration quant à l'importance des mitochondries chez la levure. L'augmentation des mitochondries en nombre et en taille suite à un entraînement en endurance augmente donc les capacités aérobies chez l'humain.</p>	<p>Niveau A = trois critères</p> <p>Niveau B = deux des trois critères</p> <p>Niveau C = un seul des trois critères</p> <p>Niveau D = rien à valoriser</p>

Chapitre 18. Le contrôle des flux de glucose

> Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'approvisionnement des cellules musculaires en glucose, qui nécessite le maintien de la concentration de glucose sanguin. L'apparente stabilité de la glycémie est un état d'équilibre dynamique. C'est le résultat d'entrées et de sorties de glucose dans le sang, associées à différents processus biologiques. Les flux de glucose varient selon les activités de l'organisme (repas, effort physique, sommeil) et il existe un système de régulation hormonale qui, en contrôlant partiellement les flux de glucose, permet le maintien d'une valeur de glycémie.

> Ce chapitre permet aux élèves de mieux appréhender le fonctionnement de leur organisme et de saisir comment la santé se définit, aujourd'hui, dans une approche globale intégrant l'individu dans son environnement et prenant en compte les enjeux de santé publique.

> Ce chapitre remobilise et approfondit des notions déjà étudiées par les élèves au collège, puis revues en 2^e et en 1^e. C'est ainsi le cas des notions de cellules spécialisées, de circulation de la matière au sein des organismes vivants entre des organes sources, des organes de réserves et des organes consommateurs (cycle biochimique), d'hormones et de contrôles hormonaux, d'équilibre dynamique, de membrane plasmique, de métabolisme, d'enzymes, de mutations ou encore des acteurs et du fonctionnement du système immunitaire. Ce chapitre est l'occasion d'enrichir le concept d'homéostasie avec l'exemple de la glycémie. Les diabètes sont abordés sous l'angle de la dérégulation des flux de glucose qui sont à l'origine d'une hyperglycémie chronique.

Thème 5 Corps humain et santé	
Connaissances	Capacités, attitudes
Les cellules musculaires ont besoin de nutriments, principalement de glucose et de dioxygène, puisés dans le sang. > Unité 1	Comparer la consommation de glucose par l'organisme au repos et celles en activité musculaire, en période postprandiale et à jeun. > Unité 1
Les réserves de glucose se trouvent sous forme de glycogène dans les cellules musculaires et dans les cellules hépatiques. > Unités 1 et 2	Réaliser un protocole expérimental en se fondant sur une démarche historique (par exemple expérience dite du foie lavé). > Unité 2
Elles servent à entretenir des flux de glucose, variables selon l'activité, entre les organes sources (intestin et foie) et les organes consommateurs (dont les muscles). > Unité 2	Observer des coupes histologiques de pancréas sain et de pancréas diabétique. > Unités 4 et 6
La glycémie est la concentration de glucose dans le sang, maintenue dans un intervalle relativement étroit autour d'une valeur d'équilibre proche de 1g/L Elle dépend des apports alimentaires et est régulée par deux hormones sécrétées par le pancréas. > Unités 3 et 4	Identifier l'effet de différents aliments sur les variations de la glycémie et la sécrétion d'insuline. > Unité 3
L'insuline entraîne l'entrée de glucose dans les cellules musculaires (et hépatiques) et le glucagon provoque la sortie du glucose des cellules hépatiques, grâce à des protéines membranaires transportant le glucose. > Unité 5	

Un dysfonctionnement de la régulation de la glycémie entraîne des complications qui peuvent être à l'origine de diabètes.

> Unité 6

Caractéristiques des tâches complexes proposées

Tâche complexe	Support de communication scientifique	Connaissances	Capacités priorisées	Attitudes priorisées
Unité 1	Schéma	Les cellules musculaires ont besoin de nutriments, principalement de glucose et de dioxygène, puisés dans le sang. Il existe des réserves de glucose se trouvent sous forme de glycogène dans les cellules musculaires.	<ul style="list-style-type: none"> • Interpréter des résultats et en tirer des conclusions. • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié à l'écrit. 	Faire preuve d'esprit critique.
Unité 2	Texte	Des réserves de glucose se trouvent sous forme de glycogène dans les cellules hépatiques. Elles servent à entretenir des flux de glucose, variables selon l'activité, entre les organes sources (intestin et foie) et les organes consommateurs (dont les muscles).	<ul style="list-style-type: none"> • Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information. • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié à l'écrit. 	Faire preuve d'esprit critique.
Unité 3	Texte et schéma	La glycémie est la concentration de glucose dans le sang, maintenue dans un intervalle relativement étroit autour d'une valeur d'équilibre proche de 1g/L Elle dépend des apports alimentaires.	<ul style="list-style-type: none"> • Discerner, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux. • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié à l'écrit. 	Comprendre les responsabilités individuelle et collective en matière de santé.
Unité 4	Oral avec diaporama	La glycémie est régulée par deux hormones sécrétées par le pancréas.	<ul style="list-style-type: none"> • Interpréter des résultats et en tirer des conclusions. • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié à l'oral et l'écrit. 	Attitudes langagières et psychosociales en lien avec l'oral

Tâche complexe	Support de communication scientifique	Connaissances	Capacités priorisées	Attitudes priorisées
Unité 5	Tableau et texte	L'insuline entraîne l'entrée de glucose dans les cellules musculaires (et hépatiques) et le glucagon provoque la sortie du glucose des cellules hépatiques, grâce à des protéines membranaires transportant le glucose.	<ul style="list-style-type: none"> Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information. Communiquer dans un langage scientifiquement approprié à l'écrit. 	Faire preuve d'esprit critique.
Unité 6	Tableau et schéma	Un dysfonctionnement de la régulation de la glycémie entraîne des complications qui peuvent être à l'origine de diabète	<ul style="list-style-type: none"> Comprendre qu'un effet peut avoir plusieurs causes. Communiquer dans un langage scientifiquement approprié à l'écrit. 	Comprendre les responsabilités individuelle et collective en matière de santé.

Occasions techniques pour pratiquer des démarches scientifiques

Compétences travaillées	Concevoir, créer, réaliser	Pratiquer des langages
Capacités associées	Concevoir et mettre en œuvre un protocole.	Utiliser des outils numériques
Unité 1	<ul style="list-style-type: none"> Observer des cellules musculaires avec glycogène. 	<ul style="list-style-type: none"> Traiter des données avec Libmol pour visualiser des modèles moléculaires du glycogène et du glucose
Unité 2	<ul style="list-style-type: none"> Réaliser un protocole expérimental en se fondant sur une démarche historique (par exemple expérience dite du foie lavé). Observer des cellules hépatiques avec glycogène. 	
Unité 3		<ul style="list-style-type: none"> Traiter des données pour estimer l'Indice glucidique à l'aide d'un tableur numérique.
Unité 4	<ul style="list-style-type: none"> Observer des coupes histologiques de pancréas sain. 	<ul style="list-style-type: none"> Utiliser un dispositif ExAO pour tester l'effet des hormones pancréatiques sur la concentration de glucose.
Unité 5		<ul style="list-style-type: none"> Traiter des données avec Libmol pour visualiser des modèles moléculaires de l'insuline en liaison avec son récepteur.
Unité 6	<ul style="list-style-type: none"> Observer des coupes histologiques de pancréas sain et de pancréas diabétique. 	

Choix pédagogiques

- > Le chapitre a été pensé comme un ensemble de 6 unités dont la réalisation chronologique permet une découverte et une construction progressive des notions. Les tâches complexes et les parcours pas-à-pas proposent d'aborder une diversité de compétences complétée par des propositions d'activités expérimentales et des parcours transversaux.
- > L'**unité 1** permet à l'élève de s'interroger sur les origines du glucose utilisé par les cellules musculaires. Il y découvre que les cellules s'approvisionnent en glucose à partir du sang, avec un flux lié à un processus de diffusion facilitée, et qu'elles possèdent des réserves mobilisables sous forme de glycogène.
- > L'**unité 2** se penche sur les origines exogène et endogène du glucose plasmatique. Elle permet d'aborder la dynamique des flux de glucose dans l'organisme dans différentes situations physiologiques (organisme au repos, en activité musculaire, en période postprandiale et à jeun). L'élève comprend comment l'approvisionnement du sang en glucose est maintenu.
- > L'**unité 3** permet de comprendre comment on mesure la glycémie, d'identifier les événements majeurs qui font varier la glycémie tout en appréhendant la complexité des causes de variation intra- et inter-individuelles. On y explique ce qu'est l'indice glycémique. C'est dans cette unité que l'élève s'interroge sur l'apparente stabilité de la glycémie malgré des variations temporaires et qu'il argumente l'idée que la glycémie est une grandeur régulée.
- > Les **unités 4 et 5** portent sur le système de régulation hormonale. Dans l'**unité 4**, l'élève découvre le rôle du pancréas endocrine. L'exploitation de résultats expérimentaux permet de comprendre à différentes échelles comment le pancréas joue à la fois le rôle de capteur et de centre intégrateur dans le système de régulation de la glycémie. L'**unité 5** permet de compléter la première représentation du système de régulation de la glycémie construite dans l'unité 4 en mettant l'accent sur les effecteurs dont le fonctionnement est modifié par l'insuline et le glucagon. On y aborde les modalités d'actions des hormones pancréatiques et on établit les liens entre elles, les flux de glucose et les effets biologiques sur la glycémie.
- > L'**unité 6** traite des dysfonctionnements de la régulation glycémique qui conduisent aux diabètes. On met en évidence que différentes anomalies moléculaires, d'origine diverse, peuvent avoir des conséquences sur la régulation des flux de glucose dans l'organisme et conduire à une hyperglycémie chronique.

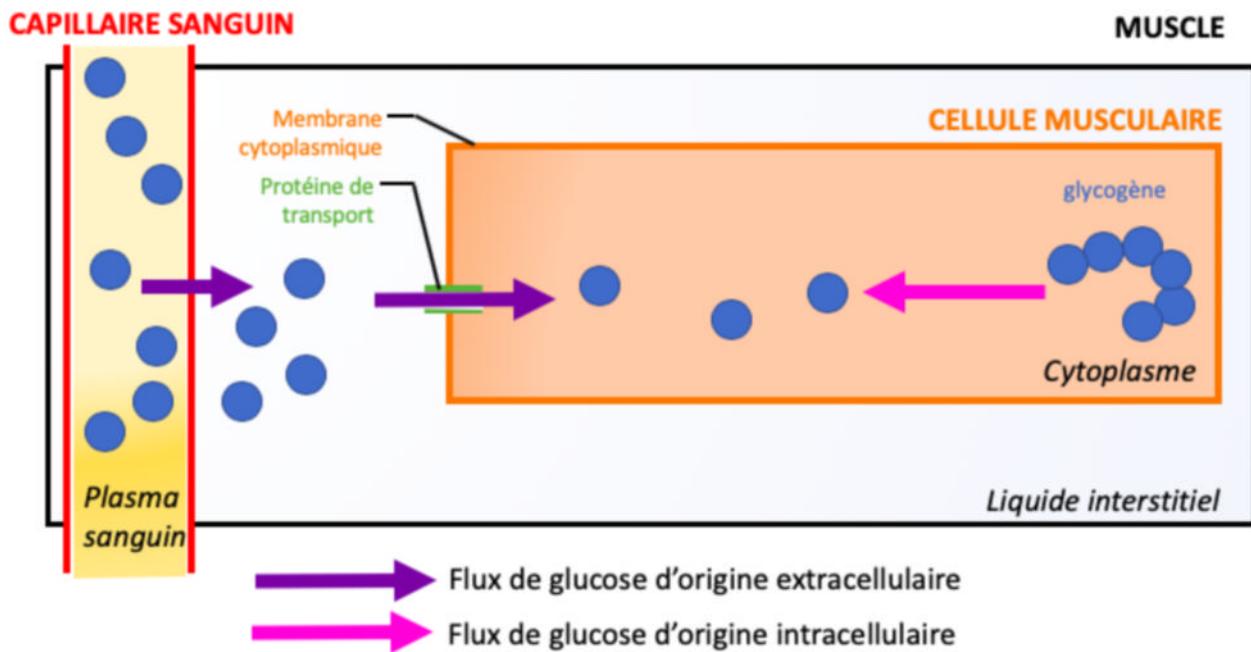
Corrigé des parcours des unités et propositions de parcours pas-à-pas

Unité 1

> Détails attendus pour répondre au problème

- Les muscles absorbent du glucose présent dans le sang (doc. 1 et 2).
- Le glucose passe successivement du plasma sanguin au liquide interstitiel au cytoplasme des cellules musculaires (doc. 6).
- Le transport du glucose se fait par diffusion facilitée à l'aide d'une protéine de transport (doc. 6, 7 et 8).
- Le glucose est issu de la dégradation du glycogène intracellulaire (doc. 3 et 4).

Sources d'approvisionnement en glucose des cellules musculaires lors d'un effort physique



> Critères de réussite pour l'évaluation du schéma

	Qualité technique	Commentaires associés	Sens donné
Indicateurs de réussite	<ul style="list-style-type: none"> • Tracé net et précis • Taille adaptée, c'est-à-dire suffisante pour que les éléments significatifs soient mis en évidence. • Représentation simplifiée de la réalité (codification avec des formes et des couleurs, chaque code a une signification). • Mise en page et organisation spatiales pertinentes (centrer le schéma, éviter les superpositions de texte et de traits ainsi que les changements d'orientation ou taille du texte). 	<ul style="list-style-type: none"> • Titre adapté qui présente le mécanisme décrit. • Légendes scientifiques exactes (chaque élément représenté doit être associé à une légende). 	<ul style="list-style-type: none"> • Organisation réfléchie de la production afin de faciliter la lecture et l'interprétation (les éléments sont ordonnés ; hiérarchisés ; les légendes ne sont pas redondantes ; titre, légendes et schéma sont sur une même page)

> Proposition corrigée de parcours pas-à-pas

Question 1

Doc. 1 et 2 : Justifiez que les cellules musculaires s'approvisionnent en glucose d'origine extracellulaire lors d'un effort physique.

Les cellules musculaires s'approvisionnent en glucose d'origine extracellulaire lors d'un effort physique puisque le sang veineux d'un muscle en activité est plus pauvre en glucose que le sang artériel, 50 mg/100 mL de sang contre 90 mg/100 mL (doc. 1). De plus, la concentration de molécule de glucose injectée par voie intraveineuse, et portant un marqueur radioactif, augmente dans les muscles à l'effort (doc. 2).

Question 2

Doc. 3 et 4 : Montrez que les cellules musculaires exploitent des réserves intracellulaires de glucose à l'effort.

On observe sur des coupes de tissu musculaire la présence de glycogène dans le cytoplasme de cellules avant un effort et l'absence de glycogène à l'intérieur les cellules après un effort physique. L'effort physique cause la disparition du glycogène (doc. 3). De plus, le glycogène est une forme de stockage du glucose. C'est un polymère dont la dégradation libère des molécules de glucose (doc. 4). Ainsi, lors d'un effort physique, les cellules dégradent le glycogène cytoplasmique (réserve de glucose) libérant du glucose alors utilisable par la cellule pour ces activités.

Question 3

Doc. 5 : Comparez l'importance relative dans l'apport énergétique des sources de glucose des cellules musculaires lors d'un effort physique.

Sur un effort d'intensité moyenne de 4 h, le glucose représente environ 50 % de l'apport énergétique des cellules musculaires. Il provient des réserves de glycogène intracellulaire et de la captation du glucose plasmatique. Le glycogène est quasiment la seule source de glucose au départ. Sa contribution à l'apport énergétique diminue linéairement jusqu'à être nulle au bout de 4 h d'effort. De manière

complémentaire, la contribution du glucose plasmatique à l'apport énergétique, quasi-nulle au départ, augmente lorsque les stocks de glycogène s'amenuisent et est maximale au bout de 4 h.

Question 4

Doc. 6 : Comparez les modes de transport du dioxygène et du glucose à travers la membrane plasmique des cellules musculaires.

Le dioxygène et le glucose diffuse à travers la membrane plasmique des cellules musculaire dans le sens de leur gradient de concentration. Les molécules passent du compartiment le plus concentré (liquide interstitiel) au compartiment le moins concentré (cytoplasme). Le dioxygène est transporté par diffusion simple, il traverse la bicoche lipidique. Le glucose est transporté à l'aide de protéines de transport membranaire, c'est un processus nommé diffusion facilitée.

Question 5

Doc. 7 et 8 : Expliquez le rôle des transporteurs Glut-4 dans l'approvisionnement des cellules musculaires à l'effort.

Les transporteurs Glut-4, situés au niveau des membranes plasmiques de cellules musculaires, sont des protéines qui permettent le passage des molécules de glucose entre le milieu extracellulaire et le cytoplasme. Le nombre de transporteurs Glut-4 au niveau des membranes plasmiques des cellules musculaires est différent avant et après l'effort. Il est plus important après l'effort, ce qui laisse envisager un rôle dans l'approvisionnement des cellules musculaires à l'effort (doc. 7). La présence de transporteurs Glut-4 est responsable d'une augmentation de l'absorption de glucose à l'effort par les cellules musculaires. En effet, la différence significative d'absorption de glucose par le muscle entre la situation au repos et la situation à l'effort observée chez les souris témoins n'existe pas chez des souris incapables de produire les transporteurs Glut-4 (doc. 8). On en conclut que l'augmentation du nombre de transporteurs Glut-4 au niveau des membranes cytoplasmiques à l'effort augmente le flux de glucose vers les cellules musculaires.

Unité 2

> Éléments de réponse

Éléments de contenu attendus

- Après un repas, le glucose sanguin est majoritairement de nature exogène (doc. 2). Le sang de la veine porte intestinale est enrichie en glucose par rapport à celui de l'artère intestinale. Le glucose ingéré est passé de l'intestin au sang (doc. 3).
- Après un repas, le glucose sanguin est notamment stocké dans le foie (doc. 3 et 7) sous la forme de glycogène (doc. 5) grâce à la glycogénogénèse (doc. 6).
- Entre deux repas, le glucose sanguin est majoritairement de nature endogène (doc. 2). Le foie est capable de libérer du glucose dans le sang (doc. 1 et doc. 3) issu de la dégradation du glycogène grâce à la glycogénolyse et à la transformation du glucose-6-phosphate en glucose (doc. 6). Les muscles ne sont pas capables de libérer du glucose car les cellules musculaires, contrairement aux cellules hépatiques, ils ne possèdent pas de glucose phosphatase permettant la transformation du glucose-6-phosphate en glucose.

Exemple de texte

Après un repas (en période postprandiale), les muscles s'approvisionnent majoritairement en glucose d'origine exogène présent dans nos aliments (doc. 2). L'absorption intestinale est associée à un flux de glucose de l'intestin vers le sang (doc. 3). L'intestin est ainsi considéré comme un organe source de glucose. Une partie du glucose absorbé est stockée sous forme de glycogène (doc. 5) dans les muscles mais aussi dans le foie (doc. 3 et 7) grâce à la glycogénogénèse (doc. 6). Des flux de glucose entre le sang et ses organes s'établissent. Durant la période entre deux repas (qui suit l'état postprandial), le

glucose plasmatique est majoritairement d'origine endogène (doc. 2). Le foie devient un organe source de glucose. Le glycogène y est dégradé en glucose qui est libéré dans le sang (doc. 1 et 3). Les flux de glucose entre le foie et le sang puis entre le sang et les muscles permettent l'approvisionnement continu des muscles.

> Support pour l'autoévaluation

Démarche	Pertinence : qui répond à la question posée Cohérence : pas de grosse erreur (enchaînement logique des idées et mise en relation correcte des informations)	INDICATEURS La production indique les organes sources de glucose et les flux associés dans deux situations : après un repas et entre deux repas.
Contenu	Éléments scientifiques attendus tirés des documents du livre et/ou des connaissances Suffisance : assez d'éléments (quand les attendus sont nombreux ou si la tâche propose des choix) Complétude : tous les éléments (quand les attendus sont peu nombreux)	1) Identification des sources de glucose plasmatique : – après un repas : l'intestin – entre deux repas : le foie. 2) Identification des flux de glucose : – après un repas : • absorption intestinale : de l'intestin au sang • absorption de glucose par les muscles : du sang aux muscles • absorption de glucose par le foie : du sang au foie – entre deux repas : • la libération de glucose par le foie : du foie au sang • absorption de glucose par les muscles : du sang aux muscles.
Communication	Forme de la représentation Précision : utilisation unité de valeur, valeurs données, argument précis... Clarté : sens, lisibilité du texte Conformité : la représentation répond aux règles d'usages	Syntaxe, grammaire, orthographe Mise en page pertinente, facilité de lecture, présentation attrayante.

> Proposition corrigée de parcours pas-à-pas

Question 1

Doc 1 et 4 : En vous inspirant de la démarche de Claude Bernard, avec le matériel à votre disposition, proposez un protocole pour mettre en évidence l'aptitude du foie à libérer du glucose et tester l'aptitude des muscles à en libérer également.

On commence par découper un morceau de foie frais en petits morceaux que l'on rince à l'aide d'une passoire pour éliminer le sang. On place les petits morceaux de foie frais lavés dans un bêcher et on les recouvre d'eau distillée. Immédiatement, on réalise un test de détection de glucose à l'aide d'une bandelette Glucotest pour vérifier l'absence de glucose. Si le test est positif, on recommence le rinçage des petits morceaux de foie. Une fois que l'on a confirmé l'absence de glucose dans le bêcher, on laisse les petits morceaux de foie recouverts d'eau distillée 24 heures avant de réaliser un nouveau test de détection de glucose. Pour tester l'aptitude du muscle à libérer du glucose, on réalise le même

protocole en remplaçant le foie frais par du muscle frais. Au lycée, un délai d'attente de 20 à 30 minutes suffit.

Question 2

Doc 2 : Décrivez les origines du glucose sanguin.

Le glucose sanguin peut avoir une origine exogène (alimentation) et une origine endogène (produit par l'organisme). La contribution des sources à l'approvisionnement du sang varie dans le temps. Au moment de la prise alimentaire, l'entrée du glucose exogène dans le sang est nulle. Durant l'heure qui suit la prise alimentaire, le flux de glucose entrant dans le sang d'origine exogène augmente jusqu'à atteindre un maximum alors que le flux de glucose entrant d'origine endogène diminue jusqu'à un minimum. Au-delà d'une heure après la prise alimentaire, l'entrée dans le sang de glucose exogène diminue et celle de glucose endogène augmente. Cependant, l'entrée de glucose exogène est supérieure à celle de glucose endogène jusqu'à environ 4 heures après la prise alimentaire. Entre 4 et 5 heures après la prise alimentaire, l'entrée dans le sang de glucose endogène est supérieure à celle de glucose exogène.

Question 3

Doc 3 : Justifiez que l'intestin soit un organe source de glucose uniquement après un repas.

L'intestin est une source de glucose après un repas puisque que la concentration plasmatique de glucose du sang de la veine sortant de l'organe est supérieure à celle de l'artère entrant dans l'organe ($2,85 \text{ g.L}^{-1}$ contre 1 g.L^{-1}). Ce n'est le cas qu'après un repas puisque à jeun, la concentration plasmatique de glucose du sang de la veine sortant de l'organe est inférieure à celle de l'artère entrant dans l'organe ($0,10 \text{ g.L}^{-1}$ contre 1 g.L^{-1}).

Question 4

Docs 3 et 5 : Montrez que le foie est capable de stocker et de libérer du glucose.

On constate que 30 minutes après un repas, la concentration plasmatique de glucose du sang sortant du foie est inférieure à celle du sang entrant dans le foie ($1,25 \text{ g.L}^{-1}$ contre $2,85 \text{ g.L}^{-1}$) (doc. 3). De plus, on constate qu'il y a davantage de glycogène dans les cellules hépatiques 2 heures après un repas qu'en état de jeûne (doc. 4). On en déduit que le foie peut prélever du glucose et en stocker au moins une partie sous forme de glycogène.

Le foie peut libérer du glucose dans le sang puisque, à jeun, la concentration plasmatique de glucose du sang de la veine sortant de l'organe est supérieure à celle mesurées dans l'artère entrant dans l'organe ($0,95 \text{ g.L}^{-1}$ contre $0,10 \text{ g.L}^{-1}$).

Question 5

Doc 6 : Expliquez comment le glycogène est synthétisé et dégradé.

Dans les cellules hépatiques et musculaires, des enzymes cytoplasmiques interviennent pour synthétiser et dégrader le glycogène. La formation du glycogène est la glycogénogénèse, elle s'opère grâce à la glycogène synthétase qui polymérise des molécules de glucose-6-phosphate. La glycogénolyse est la dégradation du glycogène en glucose- β -phosphate. Elle est réalisée par la glycogène phosphorylase.

Question 6

Docs 3, 6 et 7 : Expliquez comment le foie entretient l'approvisionnement du sang en glucose et précisez la raison pour laquelle les muscles n'y contribuent pas.

Après un repas, près d'un tiers du glucose ingéré par voie orale est stocké dans le foie et un dixième dans les muscles (doc. 7). Le foie et les muscles prélèvent et stockent du glucose sous forme de glycogène dans leur cytoplasme (doc. 3 et 6). Dans les heures qui suivent la prise du repas jusqu'au jeûne, le glycogène est dégradé en glucose-6-phosphate puis en glucose grâce à l'action de la glucose phosphatase dans les cellules hépatiques avant d'être libéré dans le sang (doc. 3 et 6). Les muscles ne contribuent pas à l'approvisionnement du sang en glucose car ils ne possèdent la glucose phosphatase, ce qui empêche l'exportation du glucose des cellules musculaires au sang (doc. 6).

Unité 3

> Éléments de réponse

Exemple de texte. La glycémie est la concentration plasmatique de glucose. Sa valeur fluctue en fonction du bilan entre les entrées et les sorties de glucose du sang liées aux activités de l'organisme (repas, activité physique). Des sorties de glucose du sang supérieures aux entrées font diminuer la glycémie ; à l'inverse, des entrées de glucose dans le sang supérieures aux sorties font augmenter la glycémie.

Les repas sont des événements associés à un apport important de glucose entrant dans le sang, ils augmentent ainsi temporairement la glycémie. Leur effet varie selon la nature des aliments ingérés et de multiples facteurs comme l'activité physique, la consommation d'alcool, la cuisson, l'âge ou encore le microbiote. On classe les aliments glucidiques selon leur effet sur la glycémie par le calcul de leur indice glycémique (IG). Il s'agit de l'aire sous la courbe de la glycémie durant 2 heures après ingestion de 50 g de glucides de l'aliment testé, exprimée en pourcentage par rapport l'aire d'un aliment témoin (le pain blanc ou le glucose) dont l'IG a une valeur de 100.

Les activités physiques ont tendance à diminuer temporairement la glycémie. Ceci s'explique par l'accroissement du flux de glucose sortant du sang vers les muscles, associé à l'absorption du glucose par les muscles. Les personnes ayant une activité physique régulière ont une glycémie en moyenne plus basse et avec des variations moindres que les personnes avec une activité physique réduite.

On constate que les variations de la glycémie en lien avec les activités de l'organisme s'opèrent dans d'étroites limites, que la glycémie n'est jamais nulle et qu'elle est relativement stable en l'absence d'activité. Ceci suggère la glycémie est une grandeur dont la valeur est régulée. Hyperglycémie et hypoglycémie sont des états physiologiques ayant des conséquences néfastes pour la santé à court terme lorsqu'elles sont de forte intensité et à long terme lorsqu'elles se prolongent.

> Support pour l'autoévaluation

		INDICATEURS
Démarche	<p>Pertinence : qui répond à la question posée</p> <p>Cohérence : pas de grosse erreur (enchaînement logique des idées et mise en relation correcte des informations)</p>	<p>La production indique des variations de la glycémie mises en relation avec des activités de l'organisme. Elle associe des activités et des flux de glucose à travers l'organisme en lien avec la glycémie. Elle aborde la notion d'indice glycémique. Elle présente l'effet de l'activité régulière sur la glycémie. Elle argumente pour l'idée que la glycémie est une grandeur régulée et que les situations glycémiques anormales ont des conséquences sur la santé.</p> <p>La démarche est construite, logique et rigoureuse</p>
Contenu	<p>Éléments scientifiques attendus tirés des documents du livre et/ou des connaissances</p> <p>Suffisance : assez d'éléments (quand les attendus sont nombreux ou si la tâche propose des choix)</p> <p>Complétude : tous les éléments (quand les attendus sont peu nombreux)</p>	<p>1) Liens entre variation de la glycémie et activités de l'organisme :</p> <ul style="list-style-type: none"> – repas : augmentation de la glycémie ; – activité physique : diminution de la glycémie. <p>2) Lien entre activités de l'organisme et flux de glucose :</p> <ul style="list-style-type: none"> – repas : Absorption intestinale (flux de glucose de l'intestin vers le sang) ; – activité physique : Absorption de glucose par les muscles (flux de glucose de l'intestin vers le sang). <p>3) Définition de l'indice glycémique et citation de quelques facteurs l'influencant.</p> <p>4) Présentation de l'effet de l'activité physique régulière</p> <p>5) Présentation d'au moins une preuve en faveur du fait que la glycémie est régulée.</p> <p>6) Identification d'au moins un effet sur la santé de l'hypoglycémie et de l'hyperglycémie</p>
Communication	<p>Forme de la représentation</p> <p>Précision : utilisation unité de valeur, valeurs données, argument précis...</p> <p>Clarté : sens, lisibilité du texte</p> <p>Conformité : la représentation répond aux règles d'usages</p>	<p>Syntaxe, grammaire, orthographe</p> <p>Mise en page pertinente, facilité de lecture, présentation attrayante.</p>

> Proposition corrigée de parcours pas-à-pas

Question 1

Doc. 2 et 4 : Expliquez ce qu'est la glycémie et présentez le fonctionnement général des biocapteurs.

La glycémie est la concentration de glucose dans le sang. Elle s'exprime en g/L ou en mg/dL (1 g/L = 100 mg/dL). Un biocapteur est un outil technologique qui permet de mesurer la glycémie à partir d'une goutte de sang ou du liquide interstitiel. Le dosage de la glycémie à partir du sang impose le dépôt d'une goutte de sang sur le biocapteur. Dans le cas d'un dosage à partir du liquide interstitiel, le biocapteur est posé à la surface de la peau et son capteur est implanté dans le tissu interstitiel sous-jacent.

Le principe général est le même pour la plupart des biocapteurs. Au niveau de la bandelette test ou du capteur, le glucose sanguin ou interstitiel est le substrat d'une réaction enzymatique qui libère des électrons en quantité proportionnelle à la concentration de glucose. Le signal électrique généré est converti en valeur numérique et affiché sur un lecteur de glycémie.

Question 2

Doc. 3 et 6 : Décrivez l'effet de l'ingestion de différents aliments sur la glycémie.

Les aliments glucidiques testés dans le doc. 3 font tous augmenter temporairement la glycémie avec une valeur maximale atteinte environ 30 minutes après l'ingestion. Néanmoins, pour glycémie initiale comparable, d'environ 0,9 g/L, la valeur maximale de la glycémie et le temps de retour à la glycémie initiale diffèrent selon l'aliment.

50 g de glucose ou les céréales de petit déjeuner provoquent une augmentation de la glycémie jusqu'à environ 1,5 g/L. 50 g de pain de seigle noir ou de pâtes au blé complet provoquent une augmentation de la glycémie jusqu'à environ 1,24 g/L. Le soda sucré provoque une augmentation de la glycémie jusqu'à environ 1 g/L. Le retour à la glycémie initiale est de 1h30 après l'ingestion de 50g de glucose ou de pain de seigle alors qu'il est d'environ 1h après l'ingestion de 50 g de soda sucré (doc. 3).

D'après le doc. 6, la combinaison de plusieurs aliments de nature différente comme lors du repas 5 (lipides, protéines et glucides) a des effets variables selon les femmes de l'étude. En effet, 30 minutes après l'ingestion, la glycémie prend des valeurs entre environ 1,08 g/L et 1,62 g/L (doc. 6).

Question 3

Doc. 1 et 3 : Expliquez ce qu'est l'indice glycémique puis préciser comment il varie.

L'indice glycémique (IG) permet de classer les aliments en fonction de leur aptitude à faire augmenter rapidement la glycémie après ingestion et absorption. L'indice glycémique correspond à l'aire sous la courbe de la glycémie pendant 2 heures après l'ingestion d'une portion de 50 g de glucides de l'aliment testé. Il s'exprime en pourcentage, en comparaison avec l'aliment de référence (pain blanc ou glucose) ayant un indice glycémique égal à 100. Plus les aliments ont un indice glycémique élevé, plus ils augmentent la glycémie durant 2 h après leur ingestion (doc 1). Les pâtes au blé complet présentent un IG bas (29 ; < 55), les céréales de petits déjeuner un IG modéré (68 ; < 70), les pommes de terre et les bonbons des IG élevés (95 et 133 ; > 70) (doc. 3). L'IG pour un même aliment présente une grande variation intra- et inter-individuelle, il varie en fonction de différents facteurs qui se combinent comme l'activité physique, la consommation d'alcool, la composition du repas, le mode de cuisson, l'âge, le microbiote, etc. (doc. 1).

Question 4

Doc. 4 : Décrivez les variations importantes de la glycémie au cours d'une journée en lien avec les événements figurés.

Expliquez ces variations à l'aide de vos connaissances à propos des flux de glucose dans l'organisme. Au cours de la journée, la glycémie augmente temporairement au moment des repas passant par exemple, au petit-déjeuner, de 70 mg/dL (= 0,7g/L) à 130 mg/dL (doc. 4). L'augmentation de la glycémie s'explique par un flux entrant de glucose dans le sang au niveau de l'intestin plus important que les flux sortants de glucose. La diminution de la glycémie après les repas s'explique par une baisse

de l'absorption intestinale de glucose alors même que le foie et les muscles stockent le glucose. Les flux sortants de glucose du sang sont supérieurs aux flux entrants. Lors d'une activité physique, la glycémie diminue, passant par exemple entre 19h et 21h de 100 mg/dL à 70 mg/dL. La baisse de la glycémie au cours d'une activité sportive s'explique par la consommation du glucose par les muscles, les flux sortants de glucose du sang sont supérieurs aux flux entrants.

Question 5

Doc. 4 à 7 : Justifiez que l'idée que la glycémie soit une grandeur régulée et précisez les risques pour la santé en cas d'anomalie de régulation de la glycémie.

Que ce soit chez un seul homme ou chez huit femmes au cours d'une journée, ou bien chez plusieurs hommes pendant 5 jours, on constate :

- que la glycémie varie dans un intervalle restreint des valeurs entre environ 0,7g/L et 1,6 g/L ;
- qu'elle est stable et non nulle en dehors de toute activité (sommeil) ;
- qu'elle prend des valeurs entre 0,9 g/L et 1,10 g/L durant la majeure partie de la journée.

Ainsi la glycémie est possiblement une grandeur régulée puisqu'il semble exister un certain équilibre dynamique de la glycémie.

L'hypoglycémie (< 0,7 g/L) modérée peut conduire à des malaise si elle est modérée, à la perte de connaissance et au coma si elle est importante. L'hyperglycémie (> 1,1 g/L) déclenche la sensation de soif et des urines abondantes. À long terme, l'hyperglycémie peut entraîner des lésions aux reins, aux yeux, aux nerfs, favoriser les maladies cardio-vasculaires et un décès prématuré.

Question 6

Doc. 6 : Décrivez l'effet de l'activité physique régulière sur la glycémie.

Les hommes de 24 ans pratiquant un activité physique régulière (> 10 000 pas/j) ont une glycémie qui varie dans un intervalle de valeurs plus restreint et plus proche de 90 mg/L (= 0,9 g/L) que les hommes ayant une activité physique réduite (< 5000 pas/j). L'activité physique régulière limite les variations de la glycémie durant la journée, notamment les augmentations liées au repas (après 13h).

Unité 4

> Éléments de réponse

Texte pouvant servir de support à une présentation orale :

- **Diapo 1 (doc. 1 et 2) :**

Le pancréas est un organe ayant un rôle majeur dans la régulation de la glycémie. La greffe vasculaire d'un pancréas chez un chien ayant subi une ablation de cet organe, permet une baisse de la glycémie au cours du temps (de 4 g/L à 1 g/L entre 11h et 15h). La suppression du pancréas greffé provoque un retour à une situation d'hyperglycémie. On a montré dans les années 1920 que l'injection d'îlots de Langerhans provoquait un baisse de la glycémie et que l'injection de certains extraits des îlots de Langerhans avait une action hyperglycémante.

- **Diapo 2 (doc. 3 et 4) :**

Au sein des îlots de Langerhans, les cellules bêta produisent l'insuline qui a une action hypoglycémante (contrôle négatif) et les cellules alpha produisent le glucagon qui a une action hyperglycémante (contrôle positif).

- **Diapo 3 (doc. 5 et 6) :**

La prise alimentaire augmente la glycémie et l'insulinémie, mais diminue la glucagonémie. Durant la période postprandiale, la glycémie et l'insulinémie diminuent, la glucagonémie cesse de diminuer.

Pour une portion énergétique équivalente, on constate que les aliments n'ont pas tous les mêmes effets sur la sécrétion d'insuline. Durant l'exercice physique contrôlé, on constate durant au moins une heure que la glucagonémie augmente et que l'insulinémie diminue.

- *Diapo 4 (doc. 7) :*

Les sécrétions d'insuline et de glucagon sont gluco-dépendante : une augmentation de la concentration extracellulaire de glucose stimule graduellement la sécrétion d'insuline et inhibe graduellement celle de glucagon ; la situation s'inverse lorsque la concentration extracellulaire de glucose diminue.

- *Diapo 5 : Schéma général de synthèse (exemple : question 7 du pas-à-pas)*

L'augmentation de la glycémie stimule les cellules bêta du pancréas qui sécrètent de l'insuline dont l'action diminue la glycémie. À l'inverse, une glycémie basse lève stimule les cellules alpha du pancréas qui sécrètent du glucagon dont l'action fait augmenter la glycémie.

> Support pour l'évaluation

Oral

	Qualité orale de l'épreuve	Qualité de la prise de parole en continu	Qualité des connaissances	Qualité de l'interaction	Qualité et construction de l'argumentation
Très insuffisant	Difficilement audible sur l'ensemble de la prestation. L'élève ne parvient pas à capter l'attention.	Énoncés courts, ponctués de pauses et de faux démarcages ou énoncés longs à la syntaxe mal maîtrisée.	Connaissances imprécises, incapacité à répondre aux questions, même avec une aide et des relances.	Réponses courtes ou rares. La communication repose principalement sur l'auditoire.	Pas de compréhension du sujet, discours non argumenté et décousu.
Insuffisant	La voix devient plus audible et intelligible au fil de la présentation mais demeure monocorde. Vocabulaire limité ou approximatif.	Discours assez clair mais vocabulaire limité et énoncés schématiques.	Connaissances réelles, mais difficulté à les mobiliser en situation à l'occasion des questions de l'auditoire.	L'entretien permet une amorce d'échange. L'interaction reste limitée.	Début de démonstration mais raisonnement lacunaire. Discours insuffisamment structuré.
Satisfaisant	Quelques variations dans l'utilisation de la voix ; prise de parole affirmée. Il utilise un lexique adapté. L'élève parvient à susciter l'intérêt.	Discours articulé et pertinent, énoncés bien construits.	Connaissances précises, une capacité à les mobiliser en réponses aux questions de l'auditoire avec éventuellement quelques relances	Répond, contribue, réagit. Se reprend, reformule en s'aidant des propositions de l'auditoire.	Démonstration construite et appuyée sur des arguments précis et pertinents.

Très satisfaisant	<p>La voix soutient efficacement le discours.</p> <p>Qualités prosodiques marquées (débit, fluidité, variations et nuances pertinentes, etc.).</p> <p>L'élève est pleinement engagé dans sa parole. Il utilise un vocabulaire riche et précis.</p>	<p>Discours fluide, efficace, tirant pleinement profit du temps et développant ses propositions.</p>	<p>Connaissances maîtrisées, les réponses aux questions de l'auditoire témoignent d'une capacité à mobiliser ces connaissances à bon escient et à les exposer clairement.</p>	<p>S'engage dans sa parole, réagit de façon pertinente. Prend l'initiative dans l'échange. Exploite judicieusement les éléments fournis par la situation d'interaction.</p>	<p>Maîtrise des enjeux du sujet, capacité à conduire et exprimer une argumentation personnelle, bien construite et raisonnée.</p>
-------------------	--	--	---	---	---

Qualité du diaporama

	4 Le diaporama illustre correctement le propos et toutes les images sont titrées et légendées
3	Le diaporama illustre correctement le propos, les images sont insuffisamment titrées et/ou légendées
2	Le diaporama présente quelques images mais illustre insuffisamment le propos
1	Le diaporama reprend sous forme de texte ce qui est dit à l'oral ou n'est pas en adéquation avec la présentation orale

> Proposition corrigée de parcours pas-à-pas

Question 1

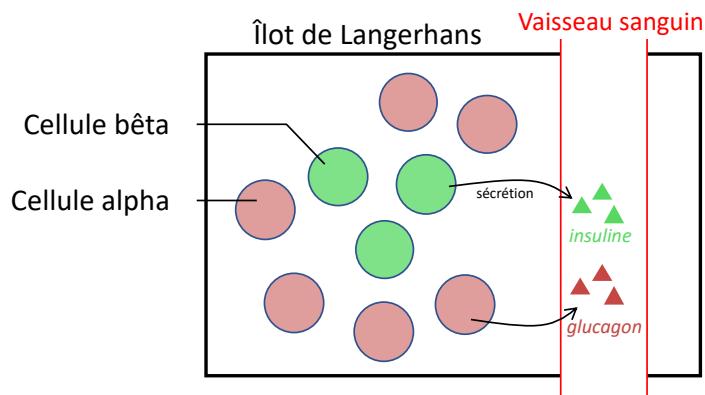
Doc. 1 et 2 : Montrez que le pancréas est impliqué dans la régulation de la glycémie, précisez le tissu cellulaire exerçant des contrôles positif et négatif (augmentant et diminuant la glycémie).

En 1870, l'ablation complète du pancréas d'un chien est associée l'apparition d'une glycémie trop élevée. En 1894, la greffe vasculaire d'un pancréas chez un chien ayant subi une ablation de cet organe permet une baisse de la glycémie au cours du temps (de 4 g/L à 1 g/L entre 11h et 15h). La suppression du pancréas greffé provoque un retour à une situation d'hyperglycémie. On en déduit alors que le pancréas contribue à réguler la glycémie par voie vasculaire (doc. 1 et 2).

En 1869, Langerhans décrit des amas de cellules au sein du pancréas : les îlots de Langerhans. Dans les années 1920, on montre que l'injection d'îlots de Langerhans provoque une baisse de la glycémie et que l'injection de certains extraits des îlots de Langerhans a une action hyperglycémiante. Les îlots de Langerhans semblent donc exercer des contrôles positif et négatif sur la glycémie par leurs actions hypoglycémiante et hyperglycémiante (doc. 1).

Question 2

Doc. 3 : Réalisez un schéma présentant l'organisation fonctionnelle des tissus du pancréas endocrine.



Question 3

Doc. 4 : Déterminez quelles sont les hormones pancréatiques hypoglycémiant et hyperglycémiant.

On constate une diminution de la glycémie suite à l'injection d'insuline, on en déduit qu'elle a un effet hypoglycémiant. À l'inverse, le glucagon est une hormone hyperglycémiant puisque la glycémie augmente suite à son injection.

Question 4

Doc. 5 : Décrivez les effets de la prise alimentaire, de la période postprandiale et de l'activité physique sur la glycémie, l'insulinémie et la glucagonémie.

La prise alimentaire augmente la glycémie et l'insulinémie, mais diminue la glucagonémie. Durant la période postprandiale, la glycémie et l'insulinémie diminuent, la glucagonémie cesse de diminuer. Durant l'exercice physique contrôlé, on constate que, durant au moins une heure, la glucagonémie augmente et l'insulinémie diminue.

Question 5

Doc. 6 et 8 : Identifiez l'effet de différents aliments sur les variations de la sécrétion d'insuline.

Pour une portion énergétique équivalente, on constate que les aliments n'ont pas tous les mêmes effets sur la sécrétion d'insuline. Certains aliments comme les pâtes complètes, le pain de seigle ou les céréales du petit déjeuner provoquent une sécrétion d'insuline 1,5 à 2,5 fois inférieure à celle induite par le pain blanc (environ 60 % pour les céréales à 40 % pour les pâtes complètes ; 100 % étant le pain blanc). D'autres, comme les pommes de terre et les bonbons, provoquent une sécrétion d'insuline 1,2 à 1,6 fois plus importante que le pain blanc (environ 120 % pour les pommes de terre et 160 % pour les bonbons) (doc. 6). La combinaison d'aliments glucidiques, lipidiques et protéiques au cours d'un repas augmente l'insulinémie, mais avec une certaine variabilité selon les personnes. En effet, l'insulinémie mesurée chez 8 personnes une heure avant la prise du déjeuner est comprise dans un intervalle de 0,3 mmol/L (entre environ 0,4 et 0,6 mmol/L). 30 minutes après le déjeuner, l'insulinémie est comprise dans un intervalle 2 fois plus important de 0,7 mmol/L (entre 1,4 et 2 mmol/L) (doc. 8).

Question 6

Doc. 7. Montrez que les îlots de Langerhans sont à la fois des capteurs naturels de la concentration extracellulaire de glucose et des centres intégrateurs qui adaptent l'intensité de leurs actions hypoglycémiante et hyperglycémiante aux variations de glycémie.

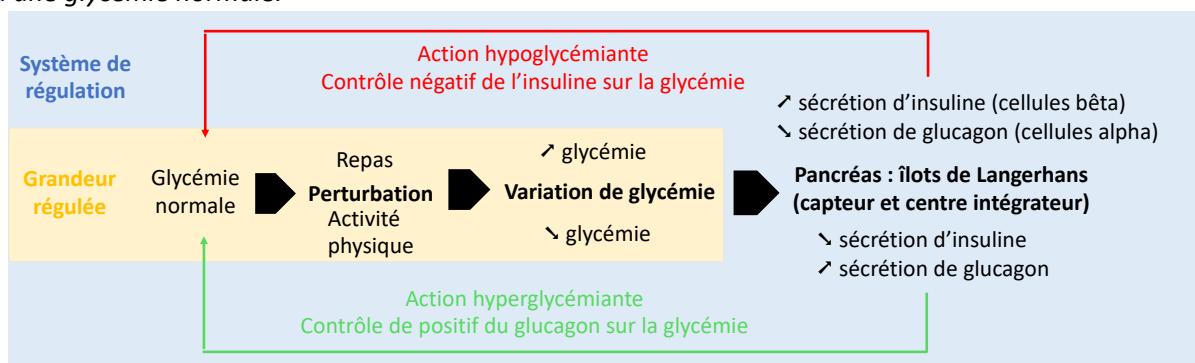
On constate que les sécrétions d'insuline et de glucagon par des îlots de Langerhans isolés varient significativement et linéairement selon la concentration de glucose du milieu de culture. Ainsi une concentration croissante de glucose dans le milieu au contact d'îlots de Langerhans isolés est corrélée avec une sécrétion croissante d'insuline, et une sécrétion décroissante de glucagon. On en déduit que les îlots de Langerhans sont sensibles à la concentration extracellulaire de glucose et que leurs activités de sécrétion s'en trouvent modifiées de manière non aléatoire. Il semble donc que les îlots de Langerhans peuvent détecter quantitativement la concentration de glucose extracellulaire, ce qui en fait des capteurs naturels de glucose.

Par ailleurs, plus la concentration de glucose est basse, plus la quantité d'hormone hyperglycémiante (glucagon) sécrétée est importante. À l'inverse, plus la concentration de glucose est élevée, plus la quantité d'hormone hypoglycémiante sécrétée est élevée (insuline). On peut donc supposer qu'*in vivo*, les îlots de Langerhans réagissent de manière comparable en adaptant les sécrétions d'insuline et de glucagon aux variations de glycémie, modulant de cette manière l'intensité de leurs action hypoglycémiante et hyperglycémiante aux variations de glycémie.

Question 7

Réalisez un schéma fonctionnel pour présenter le rôle du pancréas endocrine dans la régulation hormonale de la glycémie perturbée par un repas ou une activité physique.

Vous le présenterez comme une séquence d'événements partant d'une situation initiale correspondant à une glycémie normale.



Unité 5

> Éléments de réponse

Principaux effets des hormones pancréatiques sur les cellules musculaires et hépatiques, mis en relation avec leurs effets biologiques

Hormones pancréatiques	Effets des hormones sur les cellules musculaires	Effets des hormones sur les cellules hépatiques	Effets biologiques des hormones
Glucagon	X	<ul style="list-style-type: none"> ↓ la quantité de glycogène hépatique chez le chien (doc. 1) ↓ la glycogénèse et ↑ la glycogénolyse (doc. 3) 	Favorise un flux de glucose du foie vers le sang. → Augmentation de la glycémie
Insuline	<ul style="list-style-type: none"> ↑ des transporteurs de glucose Glut-4 au niveau des membrane plasmique (doc. 5) ↑ l'absorption de glucose par les muscles (doc. 4) 	<ul style="list-style-type: none"> ↑ la quantité de glycogène hépatique chez le chien (doc. 2) ↑ la glycogénèse et ↓ la glycogénolyse (doc. 3) 	Favorise des flux de glucose du sang vers les muscles et le foie. → Diminution de la glycémie

L'insuline modifie l'activité des cellules par l'intermédiaire d'un récepteur membranaire auquel elle se lie. La liaison hormone-récepteur, lorsque l'insuline se lie aux sous-unités extracellulaires du récepteur, permet une modification de la conformation spatiale de l'assemblage. Ce changement de conformation permet aux sous-unités intracellulaires du récepteur de modifier l'activité cellulaire (doc. 6). Des mutations de l'insuline ou de son récepteur peuvent diminuer l'affinité entre l'hormone et son récepteur, ayant pour conséquence ce que l'on peut qualifier comme une moins « bonne reconnaissance », c'est-à-dire que l'insuline se lie moins facilement au récepteur. La baisse de l'affinité entre l'insuline et son récepteur est impliquée dans certaines formes de diabète, ce qui peut s'expliquer par une action de l'insuline diminuée (doc. 7). Ainsi les hormones pancréatiques comme l'insuline nécessitent une reconnaissance entre hormone et récepteur pour modifier l'activité des cellules.

> Critères de réussite pour l'évaluation du schéma

	Qualité technique	Commentaires associés	Sens donné
Indicateurs de réussite	<ul style="list-style-type: none"> Tracé net et précis du cadre et des cellules du tableau Structure rectangulaire avec un nombre suffisant de colonnes et de lignes. Taille des cellules compatible avec l'information contenue. Choix d'une structure à simple ou double entrée. 	<ul style="list-style-type: none"> Titre adapté qui présente le mécanisme décrit. Pertinence des intitulés des têtes de ligne et de colonnes. 	<ul style="list-style-type: none"> Organisation réfléchie de la production afin de faciliter la lecture et l'interprétation (les éléments sont ordonnés ; hiérarchisés ; les légendes ne sont pas redondantes ; titre et tableau sont sur une même page)

> Proposition corrigée de parcours pas-à-pas

Question 6

Docs 1 et 3 : Expliquez les actions du glucagon sur le foie sur le foie puis établissez le lien avec l'effet biologique du glucagon sur la glycémie.

Le glucagon diminue la quantité de glycogène hépatique chez le chien puisqu'elle passe de 400 µmol/g avant l'injection de cette hormone à 100 µmol/g environ 3 heures après son injection (doc. 1). La comparaison des résultats d'expériences, menées sur des hépatocytes isolés non traités et traités avec du glucagon, permet de conclure que le glucagon augmente transitoirement l'activité de la glycogène phosphorylase (+ 35 UA) et diminue transitoirement celle de la glycogène synthase (- 40 UA) (doc. 2). La glycogène phosphorylase est une enzyme qui dégrade le glycogène et la glycogène synthase est une hormone qui synthétise le glycogène. Ainsi, le glucagon stimule la dégradation du glycogène en augmentant l'activité de la glycogène phosphorylase et, en même temps, inhibe la synthèse du glycogène en diminuant l'activité de la glycogène synthase.

Étendues *in vivo*, les conclusions des observations *in vitro* peuvent expliquer la diminution la quantité de glycogène hépatique chez le chien auquel est on injecte du glucagon. La diminution de la quantité de glycogène dans les cellules hépatiques permet d'augmenter la quantité de glucose libre capable de diffuser dans le sang. Ces actions sur le foie enrichissent le sang en glucose, ce qui peut expliquer l'effet hyperglycémiant du glucagon.

Question 6

Docs 2 à 4 : Expliquez les actions de l'insuline sur le foie et les muscles puis établissez le lien avec l'effet biologique de l'insuline sur la glycémie.

L'insuline augmente la quantité de glycogène hépatique chez le chien sans pancréas puisqu'elle passe de 0 % de la masse de foie frais avant l'injection de cette hormone à 2 % de la masse de foie frais environ 7 heures après son injection (doc. 2). La comparaison des résultats d'expériences menées sur des hépatocytes isolés non traités ou traités avec des doses croissantes d'insuline permet de conclure que l'insuline peut augmenter l'activité de la glycogène synthase et diminuer celle de la glycogène phosphorylase. Les effets sont dépendants de la quantité d'insuline. Par exemple, l'activité de la glycogène synthase est égale à 70 UA pour 0 et 1 UA d'insuline ; entre 1 et 4 UA d'insuline, l'augmentation semble proportionnelle à la quantité d'insuline (environ + 7 UA par UA d'insuline) (doc. 3).

La glycogène phosphorylase est une enzyme qui dégrade le glycogène et la glycogène synthase est une hormone qui synthétise le glycogène. Ainsi, l'insuline stimule la synthèse du glycogène en augmentant l'activité de la glycogène synthase et inhibe la dégradation du glycogène en diminuant l'activité de la glycogène phosphorylase. La généralisation des effets *in vitro* de l'insuline permettent d'expliquer l'augmentation de la quantité de glycogène hépatique chez le chien auquel est on l'injecte.

On constate que l'insuline augmente le flux de glucose entrant dans un muscle puisqu'il passe de 0 % sans insuline à 15 % avec 75 UA d'insuline et à 100 % avec 40 000 UA. Le glucose entrant provient du sang.

Ainsi, l'insuline augmente de la quantité de glycogène dans les cellules hépatiques, ce qui favorise la diffusion du glucose libre du sang vers les hépatocytes, et augmente le flux de glucose du sang vers les muscles. Ces actions sur le foie et les muscles, appauvrissant le sang en glucose, peuvent expliquer l'effet hypoglycémiant de l'insuline.

Question 6

Docs 4 et 5 : Expliquez l'effet de l'insuline sur l'absorption de glucose dans un muscle.

On constate que l'insuline augmente le flux de glucose entrant dans un muscle puisqu'il passe de 0 % sans insuline à 15 % avec 75 UA d'insuline et à 100 % avec 40 000 UA (doc. 4). On peut déduire de la comparaison des résultats expérimentaux mesurant la quantité de transporteurs de glucose Glut-4 au

niveau de la membrane plasmique de cellules musculaires traitées ou non avec de l'insuline, que l'insuline augmente la quantité de transporteurs présents au niveau de la membrane plasmique. En effet, la fluorescence verte spécifique au transporteur Glut-4 est plus marquée avec insuline que sans insuline (doc. 5).

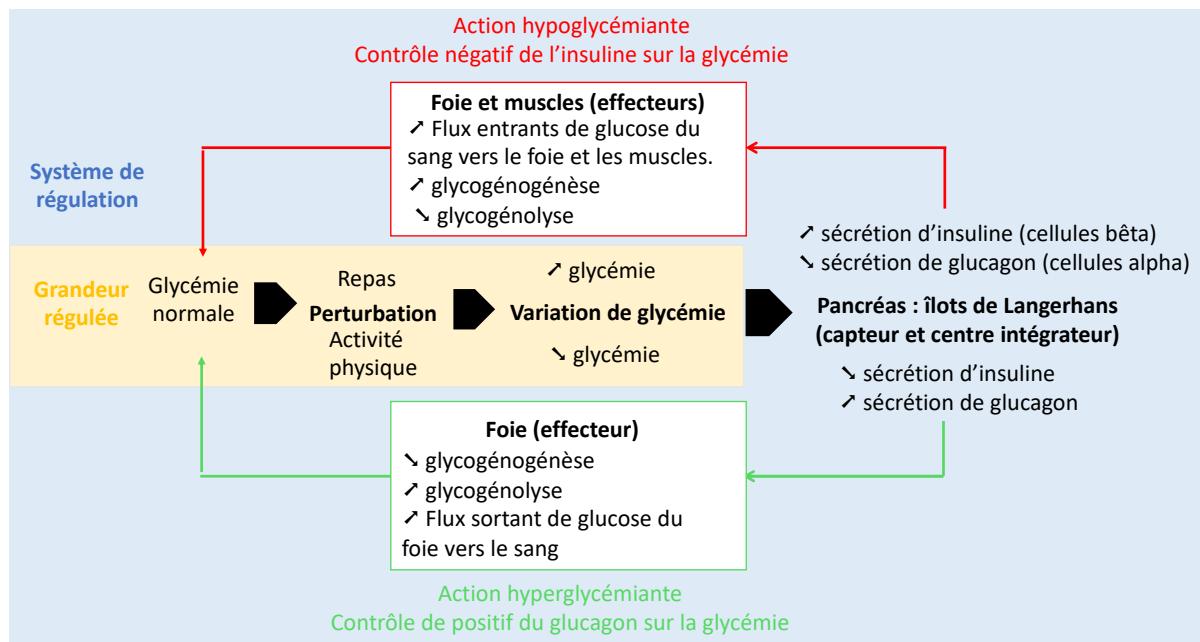
Question 6

Doc 6 et 7 : Montrez que l'action des hormones pancréatiques nécessite une reconnaissance entre hormones et récepteurs.

L'insuline modifie l'activité des cellules par l'intermédiaire d'un récepteur membranaire auquel elle se lie. La liaison hormone-récepteur, lorsque l'insuline se lie aux sous-unités extracellulaires du récepteur, permet une modification de la conformation spatiale de l'assemblage. Ce changement de conformation permet aux sous-unités intracellulaires du récepteur de modifier l'activité cellulaire (doc. 6). Des mutations de l'insuline ou de son récepteur peuvent diminuer l'affinité entre l'hormone et son récepteur, ayant pour conséquence ce que l'on peut qualifier comme une moins « bonne reconnaissance », c'est-à-dire que l'insuline se lie moins facilement au récepteur. La baisse de l'affinité entre l'insuline et son récepteur est impliquée dans certaines formes de diabète, ce qui peut s'expliquer par une action de l'insuline diminuée (doc. 7). Ainsi les hormones pancréatiques comme l'insuline nécessitent une reconnaissance entre hormone et récepteur pour modifier l'activité des cellules.

Question 6

Complétez le schéma fonctionnel présentant le rôle du pancréas endocrine dans la régulation hormonale de la glycémie perturbée par un repas ou une activité physique (unité 4) en précisant la place et le rôle des effecteurs (foie et muscles).



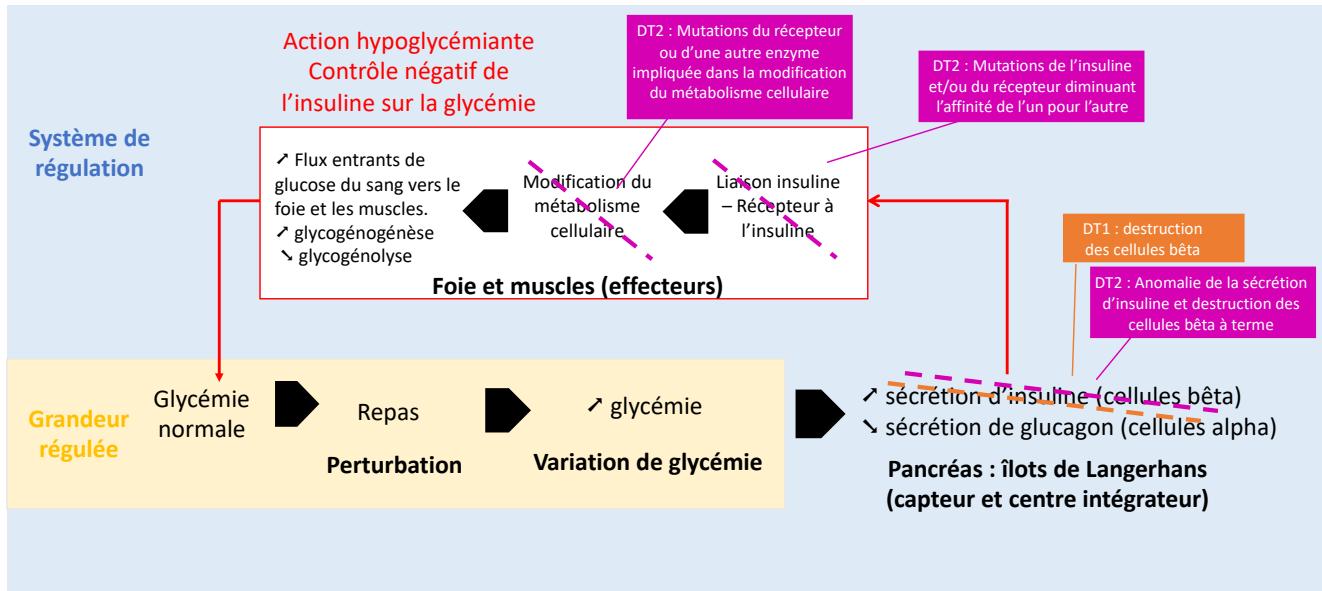
Unité 6

> Éléments de réponse

Caractéristiques et les causes des diabètes de types 1 et 2

Type de diabète	Caractéristiques			Causes
	Définition	Conséquences	Prévalence	
Type 1		<ul style="list-style-type: none"> • Conséquences de l'hyperglycémie à court terme : fatigue, sensation de faim et de soif, urines abondantes (doc. 7 page 457) 	<p>Déclenché avant 20 ans dans 50 % des cas (doc. 1)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Maladie auto-immune (doc. 1), les lymphocytes envahissent les îlots de Langerhans (doc. 3) et y détruisent les cellules bêta. Ce qui a comme conséquence une insulénémie quasi-nulle même lors de l'ingestion de glucose (doc. 2). • En l'absence d'insuline, pas d'action hypoglycémiante capable d'induire une augmentation des flux sortant de glucose vers les muscles et le foie. La glycémie reste élevée.
Type 2	<ul style="list-style-type: none"> • Glycémie à jeun égale ou supérieure à 1,26 g/L (introduction et doc. 1) 	<ul style="list-style-type: none"> • Conséquences de l'hyperglycémie à long terme : plaies graves, AVC, mauvaise circulation sanguine, infarctus, insuffisance rénale, altération de la rétine (doc. 1) 	<ul style="list-style-type: none"> • Diagnostiqué à 65 ans en moyenne • 80 % des personnes obèses sont atteintes • Prévalence plus élevée dans les communes défavorisées (doc. 1) 	<ul style="list-style-type: none"> • Maladie à composante génétique (70 %) et environnementale (30 %). Des mutations et des facteurs environnementaux conduisent à la diminution de l'activité et de la sécrétion de l'insuline avec l'âge (doc. 4 et 6). • La moindre activité de l'insuline, qui peut avoir des origines diverses dont des mutations touchant son récepteur, a pour conséquence un amoindrissement de son action hypoglycémiante. Ceci se traduit par une moindre sortie du glucose du sang vers les muscles et le foie et par une moindre inhibition des processus de libération de glucose par le foie (doc. 4 et 5). La glycémie reste élevée.

Étapes de la régulation hormonale de la glycémie perturbées dans les diabètes de type 1 et 2



> Critères de réussite pour l'évaluation du tableau

	Qualité technique	Commentaires associés	Sens donné
Indicateurs de réussite	<ul style="list-style-type: none"> • Tracé net et précis du cadre et des cellules du tableau • Structure rectangulaire avec un nombre suffisant de colonnes et de lignes. • Taille des cellules compatible avec l'information contenue. • Choix d'une structure à simple ou double entrée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Titre adapté qui présente le mécanisme décrit. • Pertinence des intitulés des têtes de ligne et de colonnes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Organisation réfléchie de la production afin de faciliter la lecture et l'interprétation (les éléments sont ordonnés ; hiérarchisés ; les légendes ne sont pas redondantes ; titre et tableau sont sur une même page)

> Proposition corrigée de parcours pas-à-pas

Question 1

Introduction et doc. 1 : Comparez les diabètes de types 1 et 2 diabète, puis justifiez que ce soient des maladies avec un fort enjeu de santé publique.

Les diabètes de type 1 (DT1) et de type 2 (DT2) sont tous les deux caractérisés par une glycémie à jeun égale ou supérieure à 1,26 g/L lors de deux dosages successifs. Ils peuvent avoir des conséquences sur la santé des personnes. Les plus fréquentes sont des plaies graves et des problèmes cardio-vasculaires pouvant entraîner des AVC, des amputations, de l'infarctus, une insuffisance rénale et des altérations de la rétine. Le DT1 est déclenché avant 20 ans dans 50 % des cas alors que le DT2 est diagnostiqué en moyenne à 65 ans. Le DT1 est une maladie auto-immune alors que le DT2 est associé principalement à l'obésité et à des conditions de vie défavorisées.

Question 2

Doc. 1 à 3 : À l'aide des documents et de vos connaissances, montrez que le diabète de type 1 est la conséquence d'un dysfonctionnement de la régulation de la glycémie et proposez une cause qui en soit à l'origine.

La glycémie de la personne atteinte de DT1 atteint 3 g/L (glycémie initiale x3) 1h30 après l'ingestion de glucose et elle se maintient autour de cette valeur au moins pendant 1h30 supplémentaire. À l'inverse, chez la personne témoin, la glycémie augmente légèrement au-dessus de 1 g/L après l'ingestion et elle se maintient autour de 1 g/L durant toute l'expérience (doc. 2). Le DT1 semble donc être la conséquence d'un dysfonctionnement de la régulation de la glycémie. On constate que dans le cas du DT1 que l'insulinémie est quasi-nulle et qu'elle n'augmente pas après l'ingestion de glucose contrairement à ce que l'on observe chez une personne témoin (doc. 2). Or on sait que l'insuline est une hormone hypoglycémiante qui intervient dans la régulation de la glycémie. En son absence, les flux de glucose sortant du sang vers le foie et les muscles ne sont pas augmentés, ce qui peut expliquer l'augmentation importante de la glycémie après l'ingestion de glucose.

On observe chez un individu atteint de DT1 que les îlots de Langerhans sont envahis par des lymphocytes, ce qui n'est pas le cas chez une personne non malade. Les lymphocytes semblent donc avoir un lien avec le DT1 (doc. 3). Il est écrit que le DT1 est une maladie auto-immune (doc. 1). On peut donc supposer que les lymphocytes détruisent les cellules des îlots de Langerhans sécrétant l'insuline pour expliquer l'absence de cette hormone et l'apparition du diabète.

Question 3

Doc. 4 : Montrez que le diabète de type 2 est la conséquence d'un dysfonctionnement de la régulation de la glycémie et formulez des hypothèses pour expliquer son origine.

Après ingestion de glucose chez les personnes atteintes de DT2, on observe une augmentation de la glycémie supérieure à celle des personnes non malades (entre + 1,5 et + 2,5 g/L au maximum contre + 0,5 g/L). Le DT2 est une maladie évolutive qui s'aggrave avec le temps. Plus le stade de la maladie est avancé, plus la hausse de la glycémie est importante. Le DT2 semble donc la conséquence d'un dysfonctionnement de la régulation de la glycémie ayant pour conséquence l'augmentation anormale de la glycémie.

La brièveté du délai de réponse à une hausse de la glycémie est un marqueur de la sensibilité des individus à l'insuline (doc. 4). L'augmentation de la durée de ce délai chez les malades permet donc de supposer que l'une des causes du DT2 est une baisse de la sensibilité des individus à l'insuline. En effet, par rapport aux personnes témoins, on constate que l'augmentation de l'insulinémie suite à l'ingestion de glucose est d'autant plus retardée et de moindre importance que les personnes sont à un stade avancé du DT2. Par exemple, la valeur maximale d'insulinémie des personnes DT2-60min est comparable à celle des personnes non malades (env. 60 mUI/L) mais elle est atteinte chez les

personnes diabétiques près d'une heure après les personnes non malades. Chez un diabétique DT2-150 minutes, la valeur maximale de l'insulinémie est deux fois moins importante que chez les personnes non malades (env. 30 mUI/L contre 60 mUI/L) et elle est atteinte 2,5 heures après les personnes non malades (doc. 4). Ce document montre donc qu'au cours de l'évolution du DT2, il y a également une diminution de la production d'insuline. On peut donc supposer que la baisse de la production d'insuline chez les individus soit également une cause du DT2 à un stade avancé.

Question 4

Docs 1, 4 et 6 : Confrontez vos hypothèses aux informations données par le professeur de diabétologie et expliquez l'âge moyen du diagnostic du DT2 et la prévalence du DT2 dans la population obèse et dans la population défavorisée.

Le professeur de diabétologie précise que des anomalies de sécrétion induites par des mutations, associées aux facteurs environnementaux, augmentent le risque de développer le diabète. Ces anomalies conduisent à une diminution de la sécrétion d'insuline et de son efficacité (doc. 6). Ainsi, la baisse de la production d'insuline est bien une cause du DT2. Une baisse de l'efficacité de l'insuline est synonyme d'une baisse de la sensibilité des individus à l'insuline (doc. 4 et 6). Ainsi, la baisse de la sensibilité à l'insuline est bien une cause du DT2. Elle peut avoir des origines différentes ; on a par exemple évoqué dans l'unité précédente que des mutations touchant l'insuline ou son récepteur pouvait diminuer l'affinité de l'un pour l'autre. Les chercheurs ont identifié 240 gènes impliqués dans la sécrétion de l'insuline et intervenant dans les formes communes du diabète.

La diminution de la sécrétion d'insuline et de son efficacité est un phénomène lié à l'âge. Au fur et à mesure que le DT2 se développe, une toxicité se met en place contre les cellules sécrétrices d'insuline qui finissent par mourir. C'est la raison pour laquelle, le diagnostic du DT2 se fait à un âge en moyenne de 65 ans. Si la mise en place de la maladie s'explique à 70 % par des facteurs génétiques, les 30 % restant sont liés à des facteurs environnementaux comme le manque d'activité physique et une mauvaise hygiène alimentaire. Ces facteurs environnementaux sont davantage présents chez les personnes obèses et les populations défavorisées. C'est, au moins en partie, pour ces raisons que 80 % des personnes obèses présentent un DT2 et que la prévalence est plus élevée dans les communautés défavorisées.

Question 5

Doc 5 : Expliquez comment une mutation du récepteur à l'insuline peut être l'origine d'un diabète de type 2 chez des souris.

Trente minutes après ingestion de glucose, les souris avec un récepteur à l'insuline muté présentent une glycémie plus élevée que les souris témoins (8 dg/dL contre 4 dg/dL) alors que leur glycémie était semblable au départ (env. 3 g/L). Les souris avec un récepteur à l'insuline muté produisent plus d'insuline que les souris témoins, le diabète de ces souris n'est donc pas lié à un manque de production de l'hormone.

On constate que l'activité de la glucose-6-phosphatase est plus élevée chez les souris avec un récepteur à l'insuline muté que chez les souris témoins (1 UA contre 0,5 UA). D'une part, l'activité de cette enzyme est normalement inhibée par l'action de l'insuline. L'activité de l'enzyme chez les souris avec un récepteur à l'insuline muté est donc anormalement élevée, ce qui révèle que la mutation du récepteur a empêché ou limité l'action de l'insuline. D'autre part, l'enzyme permet la transformation du glucose-6-phosphate en glucose qui peut alors diffuser hors de la cellule vers le sang. L'absence ou la moindre d'inhibition de cette enzyme est défavorable au stockage du glucose dans les cellules et diminue ainsi l'action hypoglycémiant de l'insuline.

Ainsi, une mutation du récepteur à l'insuline peut empêcher ou limiter les effets de l'hormone sur le métabolisme cellulaire et par voie de conséquence diminuer son action hypoglycémiant, favorisant l'apparition d'un diabète.

Question 6

En conclusion : Expliquez comment les diabètes de type 1 et 2 perturbent les flux de glucose dans l'organisme et entraînent une hyperglycémie chronique.

Dans le cas de diabète de type 1 et 2, l'absence d'insuline ou l'altération de son action ne permettent pas l'augmentation des flux de glucose du sang vers les organes cibles (foie et muscle) et la diminution des flux de glucose du foie vers le sang. Ceci contribue à déséquilibrer entre les entrées et les sorties de glucose dans le sang en faveur des entrées, ce qui conduit à une hyperglycémie chronique.

Quelques attendus de l'Objectif oral « L'innovation au service des patients »

Proposition de démarche	Éléments d'argumentation tirés des documents	Questions relatives aux connaissances personnelles mobilisables	Éléments de raisonnement possibles
Expliquez quelle partie fonctionnelle du pancréas naturel remplace la technologie du pancréas artificiel.	<ul style="list-style-type: none">Doc. référence 1 : Le pancréas artificiel est fait d'une pompe à insuline (injecte d'une dose d'insuline dans l'organisme), d'un capteur de glucose interstitiel (mesure la glycémie en continu et envoie l'information à l'appareil de commande par Bluetooth) et d'un appareil de commande (calcule la dose d'insuline à injecter en fonction de la glycémie mesurée et d'autres paramètres de l'individu comme l'activité physique).Doc. 3 Unité 4 : Dans le pancréas naturel, les cellules bêta sécrètent de l'insuline.Doc. 7 Unité 4 : Les îlots de Langerhans sécrètent d'autant plus d'insuline plus que la concentration extracellulaire de glucose est élevée.On sait que les cellules bêta modifient l'intensité de la sécrétion d'insuline en fonction de la concentration interstitielle de glucose. (voir exercice 3 page 472 pour plus de détails). Elles jouent à la fois le rôle de capteur d'algorithme.Doc. 4 Unité 3 : La concentration en glucose interstitiel varie selon les activités de la journée (repas, activités physiques).	<ul style="list-style-type: none">Qu'est-ce que le pancréas ?Dans quels appareils d'organes joue-t-il un rôle ? (2 attendus)Qu'est-ce que la glycémie ?Qu'est-ce qu'un îlot de Langerhans ?Qui a découvert les îlots de Langerhans ?Qu'est-ce qu'une hormone ?Pourquoi mesurer la glycémie ?Quelle la valeur de référence de la glycémie ?Pourquoi dit-on que la glycémie est un paramètre physiologique régulé ?Qu'est-ce que le diabète ?Quelle est la cause du diabète de type 1 ?Quelle est la prévalence du DT1 dans la population française ?Comment traite-t-on le DT1 dans pompe à insuline ?Quelle est l'équivalence entre mg.dL^{-1} et g.L^{-1} ?Quels sont les enjeux sociétaux et sanitaires liés aux traitements du DT1 ?	<ul style="list-style-type: none">Comparaison des constituants du pancréas artificiel et naturel dans le but de trouver des points communs fonctionnels.Justification des éléments d'argumentation par un raisonnement expérimental rigoureux en s'appuyant sur des données expérimentales.Justification des éléments d'argumentation en s'appuyant sur des observations rigoureuses.Explication de différentes techniques d'observation et d'expérimentation.Critique de la significativité des généralisations des conclusions d'expériences (<i>in vitro/in vivo</i>, cellule/organisme, rat/humain, échantillon/population) et d'observations (échantillon/population).

Proposition de démarche	Éléments d'argumentation tirés des documents	Questions relatives aux connaissances personnelles mobilisables	Éléments de raisonnement possibles
<p>Expliquez la fonction de l'insuline dans la régulation de la glycémie ainsi que l'intérêt d'intégrer un algorithme un dosage automatique de la quantité d'insuline à l'injecter et un arrêt prédictif d'injection.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Doc. référence 2 : Le pancréas artificiel permet d'avoir une glycémie journalière médiane sur 12 semaines plus basse qu'avec un dosage manuel (env. 160 mg.dL⁻¹ contre env. 170 mg.dL⁻¹). • Vidéo 1 : <ul style="list-style-type: none"> – Le pancréas artificiel permet à plus de patients d'avoir une glycémie journalière variant dans une gamme de valeur cible (70-180 mg.dL⁻¹) qu'avec un dosage manuel. → Un dosage automatique permet de conserver une glycémie dans un intervalle de valeurs normales plus long. – Le pancréas artificiel permet à plus de patients de ne pas avoir d'épisodes hypoglycémiques qu'avec un dosage manuel. → L'arrêt prédictif de l'injection d'hormone limite le risque de l'hypoglycémie lié à l'injection d'insuline. • Doc. 4 Unité 4 : L'insuline est une hormone qui fait baisser la glycémie au cours du temps. • Doc. 7 Unité 3 : <ul style="list-style-type: none"> – L'hyperglycémie à des effets graves à long terme : lésions aux yeux, aux reins, maladies cardio-vasculaires, atteintes des nerfs, gangrène, risque de décès prématuré. – L'hypoglycémie à des effets à court terme qui peuvent être plus ou moins graves. L'hypoglycémie importante peut provoquer une perte de connaissance et un coma. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qu'est-ce que l'insuline ? • Qu'est-ce qu'une hormone hypoglycémiantre ? • Qu'est-ce qu'une hyperglycémie ? • Quels sont les risques à court et long termes de l'hyperglycémie ? • Qu'est-ce qu'une hypoglycémie ? • Quels sont les risques à court et long termes de l'hypoglycémie ? 	<ul style="list-style-type: none"> • Explication de l'effet de l'insuline sur la glycémie. • Comparaison des variations de la glycémie chez un patient équipé d'un pancréas artificiel avec l'algorithme actuel et l'algorithme nouveau. • Explication des effets de l'hyperglycémie chronique. • Explication des effets à court terme de l'hypoglycémie importante.

Proposition de démarche	Éléments d'argumentation tirés des documents	Questions relatives aux connaissances personnelles mobilisables	Éléments de raisonnement possibles
<p>Expliquez l'importance pour le patient d'indiquer manuellement le début et la nature de son repas, déduisez-en l'importance de faire de même pour ses activités sportives.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Doc. 5 Unité 4 : <ul style="list-style-type: none"> – La glycémie augmente rapidement pendant un repas riche en glucose (moins de 30 minutes). – La sécrétion d'insuline augmente après un repas riche en glucides. – La sécrétion d'insuline diminue pendant au moins une heure lors d'une activité physique. • Doc. 6 Unité 4 : La sécrétion d'insuline varie selon les aliments ingérés. • Doc. 8 Unité 4 : La sécrétion d'insuline varie selon la composition des repas, les associations d'aliments. • Vidéo : En indiquant le début et la nature de son repas, l'algorithme calcule la quantité d'insuline et l'heure d'injection la plus adaptée. Le système ne peut pas anticiper seul les prises alimentaires sauf si on a un rythme très régulier et un régime invariable. L'intelligence artificielle permet à la patiente de limiter l'usage de l'insuline et d'éviter des variations trop importantes de sa glycémie. • Doc. référence 1 : L'insuline du pancréas artificiel n'est active qu'après 30 minutes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qu'est-ce que l'indice glycémique d'un aliment ? • Comment les repas modifie-t-ils la glycémie ? <ul style="list-style-type: none"> • Quels flux de glucose sont associés aux repas ? • Comment l'activité physique modifie-t-elle la glycémie ? • Comment l'insuline agit-elle ? • Quels sont les enjeux sociaux et sanitaires liés au pancréas artificiel dans le traitement du DT ? 	<ul style="list-style-type: none"> • Explication de l'influence des repas sur la glycémie. • Comparaison des types d'aliments et de repas sur l'insulinémie. • Comparaison de la vitesse à laquelle augmente la glycémie et la vitesse d'action de l'insuline du pancréas artificiel. • Explication des contraintes de l'algorithme pour calculer la dose et l'heure d'injection de l'insuline pour le pancréas artificiel. • Explication de l'influence de l'activité physique sur la glycémie.

Éléments de correction des exercices

Exercice 2

1. On constate que les glycémies mesurées chez différents rats à un même temps après injection d'insuline ne sont pas équivalentes. Par exemple, les valeurs se trouvent dans l'intervalle $[1,890 \text{ g.L}^{-1}; 2,780 \text{ g.L}^{-1}]$ juste après l'injection.

Coup de pouce : Comparez les glycémies mesurées au même moment de plusieurs individus.

2.

Glycémie (g.L ⁻¹)	Temps du prélèvement (min)			
Rats	0	15	45	60
n°1	2,630	1,510	0,974	0,852
n°2	1,890	1,380	1,070	0,945
n°3	2,100	1,400	0,870	0,590
n°4	2,310	1,730	0,810	0,630
n°5	2,720	2,250	1,430	1,230
n°6	2,640	1,760	0,890	0,620
n°7	2,780	1,360	0,900	0,730
Moyenne (g.L⁻¹)	2,439	1,627	0,992	0,800
Variance (g².L⁻²)	0,101	0,088	0,038	0,046
Ecart-type (g.L⁻¹)	0,317	0,296	0,195	0,213
a	0,101	0,088	0,038	0,046
Limite inférieure de l'intervalle de confiance à 95%	2,338	1,540	0,954	0,754
Limite supérieure de l'intervalle de confiance à 95%	2,539	1,715	1,030	0,845
Valeur de petit-p	Série t0	Série t15	Série t45	Série t60
Série t0		0,000886	0,000043	0,000026
Série t15			0,000366	0,000181
Série t45				0,000193

On constate que les valeurs moyennes de glycémie au temps 0, 15, 45 et 60 minutes sont différentes, décroissantes et comprises entre 2,439 g.L⁻¹ à 0 min et 0,800 g.L⁻¹ à 60 min.

On constate l'existence d'une variabilité des valeurs de glycémie mesurée quel que soit le prélèvement après injection d'insuline. Cette variabilité est globalement similaire pour tous les prélèvements puisque les valeurs des écarts-types sont entre 0,210 g.L⁻¹ à 45 min et 0,343 g.L⁻¹ à 0 min.

3.

	Temps après injection d'insuline			
	0 min	15 min	45 min	60 min
Moyenne ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	2,439	1,627	0,992	0,800
Variance ($\text{g}^2 \cdot \text{L}^{-2}$)	0,118	0,102	0,044	0,053
Intervalle de confiance à 95%	[2,321 ; 2,556]	[1,525 ; 1,729]	[0,948 ; 1,036]	[0,746 ; 0,853]

On constate que les intervalles de confiance sont relativement restreints autours des valeurs moyennes, ceci s'explique par des variances relativement faibles.

4.

De multiples support de calcul sont envisageable (Open office, calculatrice, etc.)

Coup de pouce sur Excel

- Explication et interprétation du test du petit-p : www.youtube.com/watch?v=zESh2yrL5kY
- Utilisez la Fonction **T.TEST** (sur Excel) pour déterminer la valeur du petit-p :
 - Matrice 1 : sélectionnez la série de résultats n° 1 ;
 - Matrice 2 : sélectionnez la série de résultats n° 2 **comparée avec la série 1** ;
 - Choisir d'effectuer un test sur l'ensemble de l'intervalle de confiance avec une Les 2 séries de mesures portant sur le même échantillon, les données sont appariées et ne sont pas indépendantes. Le type de test à réaliser est le 1 : tapez 1.

Toutes les valeurs du petit-p sont inférieures à 0,05 ou 5%. Les différences de glycémie moyenne entre les prélèvements ne sont pas dues à la variabilité interindividuelle, elles sont significatives.

5. Chez des rats Wistar à jeun auxquels on a injecté de l'insuline, la glycémie moyenne diminue au cours du temps après injection puisqu'elle passe de $2,439 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ à $0,800 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ entre 0 min et 60 min. Il est possible que l'insuline cause une diminution de la glycémie.

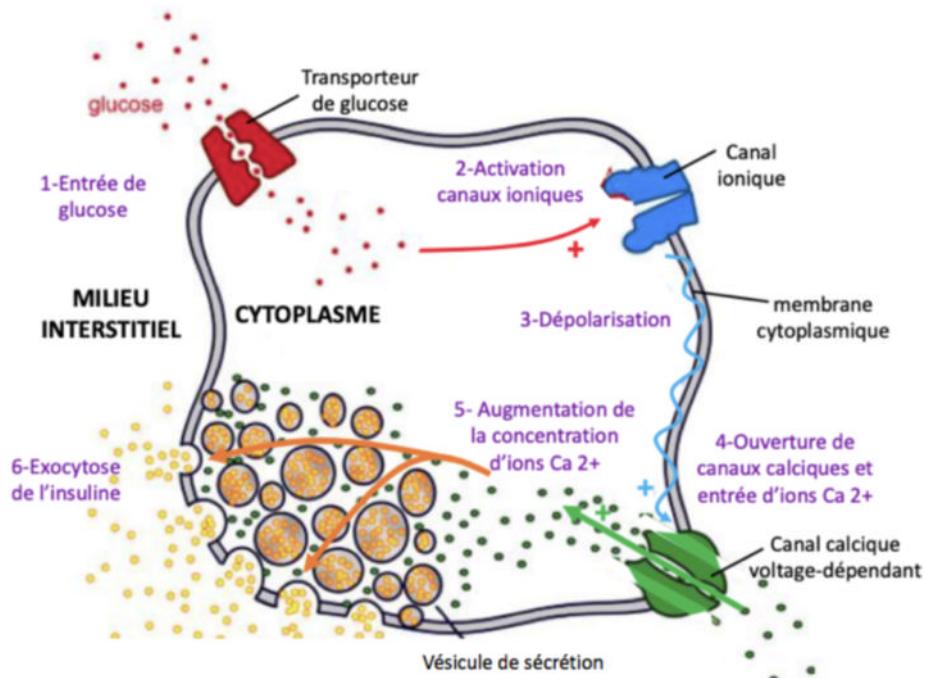
Exercice 3

Doc.	Éléments attendus sur le schéma
1	Mécanisme d'exocytose (1. Vésicule intracytoplasmique avec insuline ; 2. augmentation de la concentration cytosolique en ions calcium, 3. vésicule fusionnée avec la membrane cytoplasmique libérant l'insuline dans le milieu extracellulaire).
2	Le glucose extracellulaire stimule l'exocytose de l'insuline.
3 et 4	<ul style="list-style-type: none">Le glucose extracellulaire entre dans la cellule par diffusion facilitée.Le glucose intracellulaire active des canaux ioniques membranaires qui induisent une dépolarisation de la membrane plasmique.La dépolarisation de la membrane ouvre des canaux calciques membranaires qui laissent entrer des ions calcium dans la cellule.

Exemple de schéma.

Critères d'évaluation :

- Qualité technique : netteté du tracé, codification (forme et couleur), mise en page, taille adaptée.
- Commentaires associés (titre précisant le mécanisme présenté, légendes correctes et complète)
- Sens donné (les choix d'organisation facilitent la lisibilité et la compréhension du message).



Exercice 4

> En présence de muscle rincé, sans insuline ni glucagon (condition expérimentale témoin négatif), ou avec insuline (condition expérimentale d'essai), ou avec glucagon (condition expérimentale d'essai), ou avec insuline et glucagon (condition expérimentale d'essai), **on observe que** la concentration en glucose du milieu est nulle et stagne au cours du temps puisqu'elle est égale à 0 g/L de 0 min à 15 min. Le résultat de chacune des conditions expérimentales d'essai est semblable au résultat de la condition expérimentale témoin négatif, **on en déduit qu'**aucun paramètre testé (insuline, glucagon, insuline et glucagon) n'a d'effet sur la concentration en glucose du milieu en présence de muscle au cours du temps. **À la lumière de mes connaissances**, cela s'explique par le fait que le muscle n'est pas capable de libérer du glucose dans son milieu.

> En présence de foie rincé, sans insuline ni glucagon (condition expérimentale témoin négatif), **on observe que** la concentration en glucose du milieu augmente au cours du temps puisqu'elle passe de 0 g/L à 0 min à 1,2 g/L à 5 min à 0,8 g/L à 15 min. Cela montre que le foie libère du glucose en l'absence de toute hormone, ce qui est cohérent **avec nos connaissances**.

> En présence de foie rincé et d'insuline (condition expérimentale d'essai), **on observe que** la concentration en glucose du milieu augmente au cours du temps puisqu'elle passe de 0 g/L à 0 min à

1,1 g/L à 15 min. Si l'on considère que les résultats expérimentaux sont globalement similaires à ceux de la condition expérimentale témoin négatif, **on en déduit que** l'insuline n'a pas d'effet sur la concentration en glucose du milieu en présence de foie au cours du temps. **À la lumière de mes connaissances**, on peut s'étonner de ce résultat car on sait que l'insuline est une hormone hypoglycémiant qui inhibe la libération de glucose par le foie *in vivo*.

> En présence de foie rincé et de glucagon (condition expérimentale d'essai), **on observe que** la concentration en glucose du milieu augmente au cours du temps puisqu'elle passe de 0 g/L à 0 min à 2,2/L à 15 min. Les résultats expérimentaux sont différents à ceux de la condition expérimentale témoin négatif puisque la concentration en glucose du milieu avec le glucagon est deux fois supérieure à celle sans hormone à 15 minutes. **On en déduit que** le glucagon a un effet sur la concentration en glucose du milieu en présence de foie au cours du temps. Il stimule la libération de glucose par le foie. **À la lumière de mes connaissances**, cela s'explique par le fait que le glucagon est une hormone hyperglycémiant *in vivo*.

> En présence de foie rincé, d'insuline et de glucagon (condition expérimentale d'essai), **on observe que** la concentration en glucose du milieu augmente au cours du temps puisqu'elle passe de 0 g/L à 0 min à 0,6/L à 15 min. Les résultats expérimentaux sont différents à ceux de la condition expérimentale témoin négatif puisque la concentration en glucose du milieu avec le glucagon est deux fois inférieure à celle sans hormone à 15 minutes. **On en déduit que** la combinaison insuline et glucagon a un effet sur la concentration en glucose du milieu en présence de foie au cours du temps. Elle inhibe la libération de glucose par le foie. **À la lumière de mes connaissances**, l'insuline est une hormone hypoglycémiant et le glucagon une hormone hyperglycémiant *in vivo*, le résultat s'expliquerait par la prédominance de l'action de l'insuline sur celle du glucagon.

> Plusieurs résultats sont surprenants :

- Dans la condition expérimentale témoin négatif, on peut s'étonner que la concentration en glucose du milieu diminue d'un 1/3 entre 5 et 15 min car cela n'est pas cohérent avec nos connaissances. Les tubes étant bouchés, le glucose ne peut pas s'évaporer. Les molécules de glucose ne subissent pas de transformation dans le milieu. Le foie même rincé étant plus concentré en glucose que le milieu, la diminution de la concentration en glucose du milieu ne peut pas s'expliquer par une diffusion des molécules de glucose du milieu vers les morceaux de foie. L'hypothèse explicative la plus simple à concevoir est une erreur de mesure. Il faudrait recommencer plusieurs fois la condition expérimentale pour voir s'il existe une différence significative.
- On peut s'étonner de l'absence d'effet de l'insuline sur le foie à la lumière de nos connaissances. On aurait pu s'attendre à ce que le foie libère moins de glucose avec de l'insuline qu'en l'absence d'insuline. On peut envisager pour expliquer ce résultat que l'hormone soit inactive *in vitro*, ou qu'elle dysfonctionne pour diverses raisons. Pour tester la significativité de ces observations, il faudrait recommencer plusieurs fois la condition expérimentale.
- Si on s'en tient aux résultats bruts, on pourrait penser que l'insuline seule n'a pas d'effet sur le foie mais l'action combinée de l'insuline et du glucagon inhibe la libération de glucose par le foie. Ce qui n'est pas en accord avec nos connaissances puisqu'on sait que l'insuline agit normalement seule. Ceci attire d'autant plus notre attention sur la significativité du résultat obtenu dans la condition expérimentale avec le foie et l'insuline seule. Il faudrait recommencer plusieurs fois cette condition expérimentale pour se faire une idée plus probante.

Critères d'évaluation :

- Raisonnement déductifs corrects.
- Mise en évidence d'observations inexplicables par les connaissances et de résultats contradictoires avec les connaissances.

Exercice 5

<p>Organisation de l'exposé</p> <p><i>Toutes les organisations logiques permettant de répondre à la question sont recevables.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ L'élève explique les mécanismes hormonaux impliqués dans la régulation de la glycémie. ■ Il explique que le diabète de type 1 est une maladie auto-immune. ■ Il explique le diabète de type 1 résulte de l'absence de production d'insuline par l'organisme. ■ Il ne traite pas des causes et conséquences du diabète de type 2 ■ Il ne traite pas des traitements du diabète de type 2 ■ Il existe des paragraphes (cohérence d'idée dans un paragraphe). ■ Présentation progressive et explicite des idées pour répondre au problème 			
Organisation cohérente	Organisation un peu maladroite	Organisation insuffisamment cohérente	Pas d'organisation	
Idées clés Pas de hors-sujet Organisation logique	Idées clés <i>et</i> : Hors-sujet ou organisation logique insuffisante Idées clés partielles <i>et</i> : Pas hors-sujet et organisation logique	Idées clés partielles <i>et</i> : Pas ou hors-sujet et/ou organisation logique insuffisante Idées clés <i>et</i> : Hors-sujet et organisation logique insuffisante	Pas d'idée clé complète et correcte Hors-sujet	
<p>Exactitude et complétude des éléments nécessaires pour traiter le sujet</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ La glycémie est la concentration de glucose dans le sang, maintenue dans un intervalle relativement étroit autour d'une valeur d'équilibre proche de 1g.L^{-1}. ■ Elle dépend des apports alimentaires et est régulée par deux hormones sécrétées par le pancréas : insuline et glucagon. ■ L'insuline entraîne l'entrée de glucose dans les cellules musculaires (et hépatiques), c'est une hormone hypoglycémiante. ■ Le glucagon provoque la sortie du glucose des cellules hépatiques, c'est une hormone hyperglycémiante. ■ Le transport de glucose se fait grâce à des protéines membranaires. ■ Les réserves de glucose se trouvent sous forme de glycogène dans les cellules musculaires et dans les cellules hépatiques. Elles servent à entretenir des flux de glucose, variables selon l'activité, entre les organes sources (intestin et foie) et les organes consommateurs (dont les muscles). ■ Un dysfonctionnement de la régulation de la glycémie entraîne des complications qui peuvent être à l'origine de diabètes. ■ Les diabètes sont des maladies provoquées par une hyperglycémie chronique. ■ Le diabète de type 1 est insulinodépendant : il est dû à l'absence de production d'insuline par l'organisme. ■ La destruction des cellules des îlots de Langerhans productrices d'insuline par le système immunitaire (dont les lymphocytes T) est à l'origine du diabète de type 1. 			

Exemples et expériences pour étayer le propos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chez des souris ayant un diabète assimilé au DT1, la proportion d'îlots de Langerhans sains passent d'environ 95 % chez les souris « enfants » à environ 12 % pour les souris « adultes ». En parallèle, le nombre d'îlots totalement envahis par les lymphocytes T est d'environ 50 % chez les souris « enfants » et de 80 % chez les souris « adultes » ; ▪ La comparaison des coupes histologiques de pancréas d'un individu sain et d'un diabétique de type 1 permet de mettre en évidence la disparition des cellules des îlots de Langerhans productrices d'insuline. ▪ La comparaison des dosages d'insulinémie après une ingestion de glucose d'un individu sain et d'un diabétique de type 1 permet de mettre en évidence l'absence d'insuline.
--	--

Exercice 6

Comprendre la consigne

- Justifier = apporter des preuves en faveur de...
- Expliquer = décrire pour faire comprendre.

Grille de correction

Compréhension globale du problème	1- Le GABA constitue un espoir de traitement pour les diabétiques de type 1 puisque c'est un traitement hypoglycémiant qui augmente la capacité des individus à produire naturellement de l'insuline, hormone dont l'absence caractérise le DT1. 2- Le GABA permet de régénérer des cellules bêta productrices d'insuline dans les îlots de Langerhans. Il agit en inhibant l'expression génétique de certain gène dans les cellules alpha, ce qui provoque leur différenciation en cellules bêta.		
Éléments d'argumentations	Éléments tirés des documents <ul style="list-style-type: none">○ Doc. 1 : Le traitement avec GABA <i>diminue</i> de la glycémie chez les souris sans cellules bêta.○ Doc. 2 : Le traitement avec une solution saline pendant 5 jours de souris <i>ne modifie pas significativement</i> le % de cellules bêta au début de l'expérience. C'est une condition expérimentale témoin négatif.○ Doc. 2 : La destruction des cellules bêta puis le traitement avec une solution saline pendant 5 jours de souris <i>diminue</i> le % de cellules bêta au début de l'expérience.○ Doc. 2 : La destruction des cellules bêta puis le traitement avec une solution saline pendant 85 jours de souris <i>maintient</i> le % de cellules bêta au début de l'expérience○ Doc. 3 : Le traitement avec GABA d'îlots de Langerhans humains pendant un mois <i>diminue (environ par 4)</i> la proportion de cellules alpha dans ces îlots.○ Doc. 3 : Le traitement avec GABA d'îlots de Langerhans humains pendant un mois <i>augmente (environ par 1,5)</i> la proportion de cellules bêta dans ces îlots.○ Doc. 3 : Le GABA inhibe l'expression du gène ARX.○ Doc. 3 : L'expression du gène ARX joue un rôle clé dans la différenciation des cellules pancréatique alpha.○ Doc. 4 : Le traitement quotidien avec GABA de souris <i>augmente (environ par 1,25)</i> la concentration sanguine d'insuline.○ Doc. 4 : Le traitement quotidien avec GABA de souris <i>diminue (environ par 3,5)</i> la concentration sanguine de glucagon.○ Autres informations utiles : ...	Présent /Absent	Justifié /Non justifié

	Éléments tirés des connaissances	Présent/Absent (explicite ou implicite)
	<ul style="list-style-type: none"> ○ La glycémie est la concentration de glucose dans le sang. ○ Le diabète est caractérisé par une hyperglycémie chronique, variable physiologique normalement maintenue dans un intervalle relativement étroit autour d'une valeur d'équilibre proche de 1 g.L^{-1}. ○ L'insuline est une hormone hypoglycémiante. ○ Le diabète de type 1 est insulino-dépendant. ○ Le diabète de type 1 est provoqué par la destruction des cellules bêta des îlots de Langerhans. 	

Critères d'évaluation

Démarche de résolution personnelle			
3	2	1	0
Construction d'une démarche bien adaptée au sujet		Construction insuffisamment cohérente de la démarche même s'il existe une bonne rédaction	Absence de démarche ou démarche incohérente
Rédaction <i>correcte</i>	Rédaction <i>maladroite</i>		

Analyse des documents et mobilisation des connaissances³, dans le cadre du problème scientifique posé				
4	3	2	1	0
Connaissances mobilisées et informations prélevées pertinentes et complètes (justifications et tri)	Informations issues des documents pertinentes et complètes mais connaissances à mobiliser insuffisantes pour interpréter (manque de justification et/ou tri incomplet)	Informations issues des documents incomplètes et connaissances à mobiliser insuffisantes pour interpréter	Seuls quelques éléments <i>pertinents</i> issus des documents et/ou des connaissances	Absence de traitement des éléments prélevés

Exploitation (mise en relation/confrontation) des informations prélevées et des connaissances³ au service de la résolution du problème			
3	2	1	0
<i>Complétude et pertinence</i> des arguments nécessaires à la réponse au problème posé			Argumentation absente et/ou réponse explicative absente ou incohérente
Réponse explicative et cohérente au problème scientifique	Absence ou réponse incomplète ou non cohérente au problème scientifique posé	Argumentation incomplète mais réponse explicative cohérente avec le problème posé	

³ Les connaissances ne sont pas obligatoirement des connaissances exprimées littéralement, mais ce peut être des connaissances qui ont été forcément utilisées pour comprendre et analyser un document.

Exercice 7

Proposer une stratégie pour résoudre une situation problème	
<p>On attend du candidat une stratégie réaliste et cohérente avec la recherche à mener et les ressources, précisant ce qu'il fait, comment il le fait et ce qu'il attend.</p> <p>L'examineur évalue au fil de l'étape A.</p> <p>Aide mineure : le candidat est sur la bonne voie mais l'évaluateur lui demande une argumentation sur la stratégie ou utilise quelques questions ouvertes pour souligner une imprécision dans la stratégie.</p> <p>Aide majeure : l'évaluateur réoriente la stratégie proposée et/ou ajoute explicitement un élément qui manque (exemple : un témoin) pour qu'elle conduise à des résultats exploitables.</p> <p>On acceptera et on valorisera toute idée de :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Tester l'effet de l'insuline sur la libération de glucose par un morceau de foie. – Rechercher la présence de glucose dans un bêcher en présence de foie lavé après 15 min ; faire un témoin négatif consistant à remplacer l'insuline par de l'eau distillée. – Si les concentrations de glucose dans le milieu après 15 min sont similaires avec et sans insuline de la patiente, alors on déduira que l'insuline de la patiente n'est pas efficace. Si les concentrations de glucose dans le milieu après 15 min sont différentes avec et sans insuline de la patiente, alors on déduira que l'insuline de la patiente est efficace. 	<p>Niveau A = seul ou avec une aide mineure, il obtient une stratégie opérationnelle.</p> <p>Niveau B = avec plus d'une aide mineure, il obtient une stratégie opérationnelle.</p> <p>Niveau C = avec une aide majeure, il obtient une stratégie opérationnelle.</p> <p>Niveau D = malgré toutes les aides apportées il est incapable de mettre au point une stratégie opérationnelle.</p>
Mettre en œuvre un protocole pour résoudre une situation problème	
<p>On attend du candidat qu'il mette en œuvre le protocole : maîtrise du matériel, respect des consignes et gestion correcte du poste de travail.</p> <p>Aides majeures :</p> <ul style="list-style-type: none"> – L'examineur réalise le geste à la place du candidat. – L'examineur intervient pour imposer au candidat les conditions de travail et les règles de sécurité. – Absence de témoin ou de test à T = 0. <p>Suivant la rapidité avec laquelle le candidat nettoie le foie, il est possible d'avoir test au glucose qui n'est pas strictement négatif. Le lavage peut prendre 15 minutes, couper le foie en plus petits morceaux pour accélérer le lavage. Si les tests montrent une concentration de glucose résiduelle faible à t = 0 min, ce n'est pas grave du moment que les concentrations sont similaires dans les deux conditions expérimentales. Le signaler au candidat, sans que cela soit considéré comme une aide majeure.</p> <p>Le rangement du poste de travail est comptabilisé comme une aide mineure. Toutes les autres aides doivent être considérées comme mineures.</p>	<p>Niveau A = seul ou avec une aide mineure, il obtient des résultats exploitables.</p> <p>Niveau B = avec plus d'une aide mineure, il obtient des résultats exploitables.</p> <p>Niveau C = avec une aide majeure, il obtient des résultats exploitables.</p> <p>Niveau D = malgré toutes les aides apportées <i>il n'obtient pas de résultats exploitables.</i> <i>Un document de secours est indispensable.</i></p>
Présenter les résultats pour les communiquer.	
<p>On attend du candidat qu'il présente une production :</p> <ul style="list-style-type: none"> – techniquement correcte (soignée, lisible, appropriée, ...) – bien renseignée (informations complètes et exactes) – bien organisée et donc pertinente (informations traduites dans le sens du problème à traiter). <p>La communication prépare à la comparaison entre les tests de concentration de glucose du milieu extérieur pour la condition avec insuline et avec eau distillée.</p>	<p>Niveau A = trois critères</p> <p>Niveau B = deux des trois critères</p> <p>Niveau C = un seul des trois critères</p> <p>Niveau D = rien à valoriser</p>
Exploiter les résultats obtenus pour répondre au problème	
<p>On attend du candidat qu'il :</p> <ul style="list-style-type: none"> – exploite l'ensemble des résultats (= je vois) ; – intègre des notions (issues des ressources et de la mise en situation) (= je sais) ; – construise une réponse au problème posé explicative et cohérente intégrant les résultats (= je conclus). 	<p>Niveau A = trois critères</p> <p>Niveau B = deux des trois critères</p> <p>Niveau C = un seul des trois critères</p> <p>Niveau D = rien à valoriser</p>

Dans le cas où l'insuline est remplacée par de l'eau. On observe que les concentrations de glucose après 15 minutes dans les milieux en présence de foie lavé avec et sans insuline de la patiente sont similaires. L'insuline est une hormone qui, lorsqu'elle est efficace, stimule le stockage du glucose par les cellules de foie. On en déduit que l'insuline de la patiente n'est pas efficace.

Dans le cas de l'utilisation de l'insuline. On observe que les concentrations de glucose après 15 minutes dans les milieux en présence de foie lavé avec et sans insuline de la patiente sont différentes. En présence d'insuline, la concentration de glucose dans le milieu est moindre que sans insuline. L'insuline est une hormone qui, lorsqu'elle est efficace, stimule le stockage du glucose par les cellules de foie. On en déduit que l'insuline de la patiente est efficace.

Chapitre 19. Adaptabilité de l'organisme

Le chapitre 19 aborde la notion d'adaptabilité de l'organisme, avec comme exemple les situations stressantes. C'est un des thèmes nouveaux de ce programme qui permet d'envisager le fonctionnement de l'organisme humaine de manière intégrée, depuis l'échelle de l'organisme et comportementale jusqu'à l'échelle cellulaire et moléculaire. Les élèves découvrent les réponses de l'organisme à une situation stressante et comment ces réponses sont mises en œuvre.

Le chapitre suit une démarche chronologique en donnant un bref aperçu des situations stressantes et de leurs manifestations physiologiques (**unité 1**), puis en présentant les deux phases de réponses de l'organisme : phase d'alarme (**unité 2**) et phase de résistance (**unité 3**). Il fait la synthèse de leurs conséquences dans l'**unité 4**. Enfin, l'**unité 5** explique comment l'organisme sort de l'état de stress : c'est la résilience.

Thème 5 Corps humain et santé Comportements et stress : vers une vision intégrée de l'organisme	
Connaissances	Capacités, attitudes
Face aux perturbations de son environnement, l'être humain dispose de réponses adaptatives impliquant le système nerveux et lui permettant de produire des comportements appropriés. Le stress aigu désigne ces réponses face aux agents stresseurs. > Unité 1 La réponse de l'organisme est d'abord très rapide : le système limbique est stimulé, en particulier les zones impliquées dans les émotions telles que l'amygdale. Cela a pour conséquence la libération d'adrénaline par la glande médullo-surrénale. L'adrénaline provoque une augmentation du rythme cardiaque, de la fréquence respiratoire et la libération de glucose dans le sang. > Unités 2 et 4 Une autre conséquence des agents stresseurs au niveau cérébral est la sécrétion de CRH par l'hypothalamus : le CRH met à contribution l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien, entraînant dans un second temps la libération du cortisol. Le cortisol favorise la mobilisation du glucose et inhibe certaines fonctions (dont le système immunitaire). Le cortisol exerce en retour un rétrocontrôle négatif sur la libération de CRH par l'hypothalamus et favorise le rétablissement de conditions de fonctionnement durable (résilience). > Unités 3, 4 et 5 Ces différentes voies physiologiques sont coordonnées au sein d'un système, qualifié de complexe, et permettent l'adaptabilité de l'organisme. > Unités 2, 3 et 5	Recenser, extraire et exploiter des informations pour visualiser la libération différenciée dans le temps de l'adrénaline et du cortisol et leurs effets. > Unités 1, 2, 3, 4 Interpréter des données d'imagerie médicale et/ou d'électrophysiologie sur l'activité neuronale de certaines zones cérébrales en réponse à des agents stresseurs. > Unités 2, 3, 5 Observer des coupes histologiques de glande surrénale. > Unités 2, 3 Extraire et organiser des informations pour schématiser la boucle de régulation neurohormonale. > Unités 3 et 5 Positionner sur un schéma bilan les interactions entre les trois systèmes nerveux, endocrinien, immunitaire. > Unité 4 Utiliser un modèle pour expliquer la notion de boucle de régulation neurohormonale et la notion de résilience. > Unité 5

Compétences travaillées et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
Pratiquer des langages <ul style="list-style-type: none"> • Utiliser un logiciel de traitement de données • Communiquer à l'écrit sous forme d'un texte • Communiquer à l'écrit par un schéma • Utiliser un logiciel de simulation • Communiquer dans un langage scientifiquement approprié 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1, 4 • Unités 1, 2, 3 • Unités 2, 3, 5 • Unité 5 • Unités 1 à 5
Pratiquer des démarches scientifiques <ul style="list-style-type: none"> • Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution • Interpréter des résultats expérimentaux et en tirer des conclusions • Observer, expérimenter, calculer • Synthétiser des informations provenant de plusieurs documents pour reconstruire un modèle ou un système biologique • Connaître et comprendre les méthodes employées par les scientifiques (électrophysiologie et imagerie cérébrale) 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 5 • Unités 1 à 5 • Unités 1 à 5 • Unités 2 à 5 • Unités 2, 5
Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre <ul style="list-style-type: none"> • Identifier, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources • Identifier et choisir des outils et des techniques pour garder traces de ses recherches 	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 5 • Unités 2 à 5
Adopter un comportement éthique et responsable <ul style="list-style-type: none"> • Savoir identifier les situations stressantes pour soi les autres 	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 1

Choix pédagogiques

Unité 1

> La notion de stress fait partie du langage courant, cependant on distingue deux types de stress : le stress aigu et le stress chronique (ce dernier fera l'objet du chapitre 20). Cette première unité permet de définir précisément ce que l'on appelle stress aigu, les stimuli le provoquant et ses manifestations physiologiques.

> Le **document 1** présente sous forme de petits cartoons une palette de la diversité des situations stressantes : stress lors d'un examen, stress lors d'une présentation orale devant un supérieur hiérarchique, stress d'un animal pris en chasse par un prédateur, stress psychologique après un film d'horreur ou des pensées négatives, stress physique lié à une température excessivement basse ou une température trop élevée. Il ne présente pas une vue exhaustive de toutes les situations stressantes mais permet de dégager deux idées majeures :

- (1) la diversité des conditions pouvant provoquer le stress via des stimuli biotiques ou abiotiques, internes ou externes à l'organisme ;
- (2) le stress peut être dû à des stimuli physiques, ou psychologiques ou émotionnels.

> Le **document 2** permet de présenter plus en détail une situation stressante avec l'exemple original de la reconstitution d'un voyage sur Mars organisée en 2010-2011 pour tester le stress des astronautes. La maquette est une imitation du vaisseau spatial et permet à l'élève de visualiser l'environnement dans lequel se trouvaient les astronautes. Au cours de cette mission fictive, divers événements vont se succéder et l'état émotionnel général des astronautes sera relevé. Il s'agit d'un score global tenant compte d'un ensemble de paramètres (anxiété, tension, fatigue, inertie, agressivité, déprime, etc.) non détaillés ici. Le graphique se lit verticalement et non horizontalement comme d'habitude, l'élève devra donc adapter son analyse. On observe une très bonne corrélation entre les événements se déroulant pendant la mission, la dégradation de l'état émotionnel des astronautes et le taux d'adrénaline plasmatique. Ce document est un premier pas vers la quantification de l'état de stress et permet d'introduire l'adrénaline.

Les données brutes sont également fournies sous format numérique dans un tableur, l'élève pourra reconstruire le graphique présenté.

> Le **document 3** rentre plus en profondeur dans les manifestations physiologiques du stress à l'aide du test de Stroop. Il s'agit d'un test très classique, utilisé en neuropsychologie, qui induit un état de stress mental chez la personne le réalisant. Le test de Stroop complet (téléchargeable) comprend 3 phases :

- (1) une planche sur laquelle il faut lire le nom des couleurs (et non la couleur du texte) ;
- (2) une planche sur laquelle il faut nommer la couleur des rectangles et non le nom de la couleur ;
- (3) une planche sur laquelle il faut nommer la couleur du mot et non le nom de la couleur inscrite ; et tout cela le plus rapidement possible.

Ce test est réalisable en classe avec les élèves. Tous les paramètres ne sont pas mesurables simplement, mais l'augmentation de la fréquence cardiaque et de la fréquence ventilatoire sont perceptibles et un enregistrement ExAO pourra être envisagé. Dans le document, on remarque qu'en situation de stress, la fréquence cardiaque, la fréquence ventilatoire, la concentration sanguine en adrénaline et en cortisol augmentent. Ce document permet d'introduire le second système neuro-hormonal en jeu, l'axe corticotrope.

> Le **document 4** introduit l'aspect cinétique de la réponse en suivant au cours du temps les paramètres cités précédemment. On remarque un délai de quelques secondes entre le début de l'expérience

stressante et l'augmentation de la fréquence cardiaque et du débit sanguin dans l'avant-bras. La relation entre débit sanguin et fréquence cardiaque est donné par la formule suivante :

$$\text{Débit sanguin} = \text{Fréquence cardiaque} \times \text{Volume d'éjection systolique (Ves)}.$$

Le retour à la normale des paramètres physiologiques n'est pas immédiat, il y a une diminution rapide suivie d'une diminution plus lente, le retour à la valeur initiale n'est pas visualisable sur le graphique, l'échelle de temps étant trop courte.

L'évolution du paramètre « débit sanguin cutané » pourra étonner les élèves. Il permet de montrer que la réponse est plus complexe qu'attendu, avec un contrôle différentiel du débit sanguin en fonction des organes. Enfin, ce document 4 s'appuie sur un stimulus stressant différent des documents précédents, un stress induit par le calcul mental.

> Le **document 5** complète le document 4 en présentant l'effet d'un stimulus physique (autre exemple de stimuli) sur la fréquence ventilatoire. En lien avec le document 3, il permet de dégager un concept clef : des stimuli variés (psychiques ou physiques) provoquent la même réponse physiologique : une augmentation de la fréquence ventilatoire. La nature des réponses est donc stéréotypée.

> Pour mieux mettre en avant cette nature stéréotypée des réponses, concept clef mais difficile à appréhender et à démontrer, le texte du **document 6** revient sur les travaux de Hans Selye et Walter Cannon. Hans Selye est un médecin québécois du xx^e siècle qui a été le pionnier des études sur le stress. Walter Cannon est un célèbre physiologiste américain du début du xx^e siècle qui a introduit la notion d'homéostasie et le concept « fight or flight » qui sera évoqué dans l'unité 4. Il faut en dégager la nature stéréotypée des réponses observées quelque soit le stimulus stressant, l'existence d'une variabilité inter-individuelle (tous les individus ne sont pas égaux face au stress), une très grande palette d'effets physiques, psychologiques, comportementaux dont les principaux (au programme) et étudiés par la suite ont été vus dans les documents précédents.

Unité 2

> La réponse de l'organisme peut se diviser en deux phases. Le choix pédagogique fait ici est de présenter chacune des phases dans l'ordre chronologique dans deux unités successives. L'unité 2 se concentre sur la phase d'alarme caractérisée par la sécrétion d'adrénaline.

> Le **document 1** présente l'évolution cinétique de trois paramètres : la fréquence cardiaque comme manifestation physiologique observable, et la concentration plasmatique des deux hormones vues dans l'unité 1. L'élève devra analyser cette cinétique pour en déduire l'existence des deux phases citées précédemment : (1) la phase d'alarme, la plus précoce liée à la sécrétion d'adrénaline et (2) la phase de résistance, plus tardive liée à la sécrétion de cortisol.

> Plus finement, l'augmentation de la concentration plasmatique en adrénaline et de la fréquence cardiaque précède l'évènement stressant du saut en parachute, il s'agit d'une anticipation de la situation stressante qui induit un stress psychique et donc des manifestations biologiques. Ce phénomène n'ayant pas été présenté dans l'unité, il pourra être souligné. On notera une parfaite corrélation entre les deux courbes (avec un pic coïncidant) qui préfigure le lien qui sera fait entre adrénaline et fréquence cardiaque dans l'unité 4. La concentration en cortisol augmente bien plus tardivement (quasiment sans anticipation), mais persiste à une valeur élevée bien plus longtemps après la fin du stimulus, en lien avec la phase de résistance. La mise en place de cette cinétique est essentielle pour comprendre tous les mécanismes présentés après, il conviendra d'insister sur ce point. Le cortisol ne sera pas revu dans cette unité, il sera traité dans l'unité 3.

> Le **document 2** est une synthèse de résultats expérimentaux datant de milieu du xx^e siècle mentionnant un lien entre glandes surrénales, adrénaline et fréquence cardiaque. Il permet d'établir un lien très rapide entre ces trois éléments avant de rentrer plus finement dans le détail des

mécanismes (doc. 4, 5 et 6). L'élève devra en déduire ce lien et également la relation de causalité : adrénaline et contrôle de la pression artérielle. La sécrétion de l'adrénaline par les glandes surrénales est ici suggérée.

> Le **document 3** est permis d'aborder une compétence du programme : l'analyse de données d'imagerie médicale. Un schéma de cerveau et le positionnement des plans de coupe à droite permettront à l'élève peu familier avec l'anatomie cérébrale de se repérer. Il est également possible de réaliser une activité numérique pour manipuler les différents plans de coupe et repérer les structures essentielles (système limbique) sur le site de P. Consentino proposé dans les activités numériques. La méthodologie utilisée fait appel à l'IRM fonctionnelle. Il convient de présenter brièvement cette technique si cela n'a pas été fait dans les chapitres précédents (voir doc. 1 page 400 du chapitre 16). Les images présentées ici permettent à l'élève de visualiser les structures cérébrales activées en conditions stressantes. La condition utilisée ici fait référence au test de Stroop déjà vu dans l'unité 1. L'expérience a été réalisée simultanément sur deux jumeaux, l'un sensible au stress et l'autre non (témoin). La comparaison des deux séries d'images permet une interprétation rigoureuse et fiable (ce qui est assez rare en biologie humaine) pour être souligné. Enfin, le document présente le système limbique (légende et schéma) permettant d'introduire cette structure centrale dans la réponse au stress au niveau du système nerveux central.

> Le **système limbique** un ensemble de structures cérébrales connectées les unes avec les autres et qui permettent d'expliquer de nombreuses fonctions cérébrales. Il n'y a pas d'unité anatomique, il s'agit d'un ensemble de structures déconnectées spatialement mais connectées fonctionnellement. Il est composé d'une structure corticale localisée dans le cortex préfrontal (le cortex cingulaire et le gyrus parahippocampique), de l'hippocampe et de l'amygdale avec leurs différents noyaux respectifs et de l'hypothalamus qui est également une structure cérébrale à la confluence de très nombreuses voies contrôlant notamment toutes les fonctions végétatives. Chaque structure est spécialisée dans une fonction plus précise mentionnée sur le schéma.

> Le **document 4** explicite schématiquement le lien anatomique entre le système limbique du système nerveux central et la medullo-surrénale. L'élève n'a pas de données à analyser dans ce document, mais il devra le lire avec précisions pour faire le lien entre l'ensemble des documents présentés dans cette unité. Brièvement, il faut voir (1) le lien entre l'hypothalamus et le système limbique (représenté ici par l'amygdale), (2) la connexion établie entre l'hypothalamus (dont le rôle sera vu dans le doc. 5) et la zone médullaire de la glande surrénale, (3) la nature neuronale des connexions, qui sera à relier à la rapidité de la réponse adrénalique. Le symbolisme utilisé permet à l'élève de remobiliser ses connaissances sur la communication nerveuse (chapitre 15). L'encadré permet de replacer les différents organes cités dans l'organisme entier.

> Le **document 5** est le complémentaire du précédent et permet de faire le lien fonctionnel entre stimulation du système limbique (hypothalamus) et sécrétion d'adrénaline par la médullo-surrénale (le lien adrénaline medullo-surrénale sera réalisé dans le document 6). On observe que la stimulation d'une région précise de l'hypothalamus provoque la sécrétion d'adrénaline. Le schéma proposé est extrait du document 4, il conviendra de le replacer dans le contexte anatomique.

> Le **document 6** est un document d'histologie qui présente la glande medullo-surrénale à différentes échelles en réalisant des zooms successifs. On observe au microscope optique, après une coloration éosine-hématoxyline, la medulla au sein de laquelle on trouve des cellules chromaffines organisées autour d'un capillaire sanguin. Une observation en microscopie électronique permet d'observer la structure interne d'une cellule chromaffine avec notamment les granules de sécrétion d'adrénaline (vésicules en noir). Ce sera l'occasion pour l'élève de remobiliser ses notions de biologie cellulaire.

Unité 3

- > L'unité 3 se concentre sur la phase de résistance caractérisée par la sécrétion de cortisol.
- > Le **document 1** présente les structures cérébrales impliquées dans le contrôle de la phase de résistance. On retrouve le système limbique vu dans l'unité précédente en y ajoutant les connexions nerveuses entre les différents noyaux. Les synapses activatrices et inhibitrices sont représentées par des « + » et des « - » respectivement. On fait émerger la notion de centre intégrateur joué par l'hypothalamus (noyaux pré-optique et paraventriculaire) et le rôle des neurones paraventriculaires dans la sécrétion de CRH. Enfin, on remarquera le système porte vasculaire reliant l'hypothalamus et l'hypophyse et plus particulièrement les terminaisons synaptiques des neurones du noyau paraventriculaire (NPV) de l'hypothalamus et les cellules adrénocorticotropes de l'hypophyse antérieure dont il sera question après.
- Ce schéma relativement complexe est accompagné d'une légende complète pour aider l'élève à repérer les différentes structures importantes et leurs connexions. Il sert de base aux études fonctionnelles réalisées dans les documents suivants.
- > Le **document 2** s'intéresse au premier maillon de la voie de signalisation, les neurones du NPV responsables de la sécrétion de CRH : en condition stressante, par rapport au cas témoin, l'activité des neurones est fortement augmentée. Pour information, le marqueur utilisé pour l'hybridation *in situ* est c-fos. On notera également que l'activation est spécifique et restreinte au NPV, les zones situées à l'extérieur du NPV ne présentent pas ou très peu d'activation par rapport au cas témoin.
- > Le graphique permet de quantifier les observations réalisées sur les images microscopiques. En condition stressante, le nombre de neurones du NPV activés est toujours 10 à 30 fois supérieur par rapport à une condition sans stress, quel que soit l'âge des rats ; la différence est toujours significative. Le taux basal d'activité neuronale des neurones du NPV est toujours faible en absence de stress. En cas de stress, une activation nettement plus forte (facteur 2 à 3) est à noter pour les rats âgés de 2 à 3 mois. Cette observation permet de mettre en évidence que l'âge de l'individu influence sa sensibilité au stimulus stressant (variabilité inter-individuelle soulevée dans l'unité 1). Il sera intéressant de faire remarquer aux élèves que les graphiques présentés dans de très nombreux documents découlent de l'analyse de ce type d'images et d'insister sur l'importance de l'analyse et de l'observation de résultats bruts.
- > Grâce au **document 3**, l'élève pourra faire le lien entre stress, sécrétion de CRH et sécrétion de cortisol, avec une approche cinétique. Concernant le cortisol, on retrouve le même type de courbe que ce qui a été observé dans le document 1 de l'unité 2 : son taux augmente progressivement pendant la phase stressante et atteint un maximum en fin de phase (référence à une action tardive). La sécrétion de CRH par les neurones du NPV est beaucoup plus précoce : elle augmente très fortement au début de la phase de stress pour atteindre un pic au bout de 2 minutes puis chute progressivement pour atteindre sa valeur initiale au bout de 30 minutes. Noter que la sécrétion de CRH semble débuter légèrement avant le stimulus stressant, mais il est difficile de savoir s'il s'agit d'une augmentation réelle témoignant d'un phénomène d'anticipation ou bien d'un artefact de représentation d'un graphique pas suffisamment précis. En conclusion, le stress déclenche très rapidement la sécrétion de CRH par les neurones du NPV à la suite du stimulus stressant.
- > Le **document 4** permet de s'intéresser au second maillon de la voie de signalisation : les cellules adrénocorticotropes de l'hypophyse antérieure. Les cellules sont perfusées avec du CRH à différentes concentrations, et on suit leur sécrétion d'ACTH (molécule qui sera étudiée dans le document 5). La perfusion de CRH à une dose suffisamment élevée induit la sécrétion d'ACTH par les cellules adrénocorticotropes (la valeur seuil semble être 10^{-10} mol.L⁻¹). Il sera également important de remarquer la relation dose-réponse : plus la concentration en CRH perfusée est élevée, plus la quantité d'ACTH sécrétée est élevée. Ceci est à mettre en relation avec le codage en concentration d'un

message hormonal. L'élève se référera au document 1 pour replacer ces cellules dans le schéma anatomique.

> Le **document 5** permet d'ajouter le dernier acteur de la voie, la glande cortico-surrénale. L'ajout d'ACTH à 0 min dans le milieu de culture *in vitro* contenant les cellules de la glande cortico-surrénale induit une augmentation de la production de cortisol (mesuré dans le milieu de culture) : on passe d'une production quasi-nulle à près de $130 \text{ ng.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$. À noter que cette augmentation de la production est transitoire et ne dure que 100 minutes environ.

> Le **document 6** est un document d'histologie présentant la glande cortico-surrénale et les cellules sécrétrices de cortisol (pendant de celui sur la medullo-surrénale de l'unité précédente). On observe au microscope optique, après une coloration éosine-hématoxyline, le cortex au sein duquel trois zones sont visibles : la zone réticulée, la zone fasciculée et la zone glomérulée. L'élève peut aisément les repérer sur la coupe histologique à partir du schéma interprétatif du dessus. Le zoom est effectué sur la zone fasciculée au sein de laquelle on observe des spongiocytes organisés autour des capillaires sanguins. L'élève pourra remobiliser le vocabulaire descriptif vu dans les chapitres précédents. Le zoom final sur un spongiocyte vu en microscopie électronique permet de reconnaître le noyau et des mitochondries en abondance. Une particularité de ces cellules est leur richesse en gouttelettes lipidiques, contenant notamment du cholestérol, précurseur de la synthèse de cortisol (visible également en microscopie optique). À partir de la proximité avec le vaisseau sanguin, l'élève devra en comprendre que c'est la voie de communication par laquelle arrive l'ACTH (signal déclencheur de la production de cortisol), mais aussi par laquelle le cortisol est véhiculé.

Remarque. La synthèse du cortisol à partir de cholestérol comprend de nombreuses étapes dont certaines se déroulent dans la mitochondrie, ce qui explique leur abondance dans les spongiocytes (en plus de leur rôle dans l'apport énergétique). Le cortisol étant une hormone liposoluble (et non hydrosoluble comme l'adrénaline vue dans l'unité précédente), il ne peut être stocké à l'intérieur de vésicules de sécrétion en « attendant » le signal d'exocytose. Le cortisol est synthétisé « à la demande » par les enzymes de la voie de biosynthèse à partir du cholestérol. Il s'agit donc d'un mode de contrôle très différent de celui de la sécrétion d'adrénaline.

Unité 4

> L'unité 4 présente les conséquences physiologiques et comportementales de la sécrétion d'adrénaline et de cortisol durant les phases d'alarme et de résistance respectivement. L'effet sur le comportement n'est pas explicitement au programme, mais implicitement suggéré. C'est également un moyen intéressant de faire le lien entre les différentes conséquences physiologiques, leur rôle et des situations que les élèves connaissent.

> Le **document 1** présente les résultats d'une expérience réalisée sur des embryons de poulet. Pratiquement, des œufs de poulet fécondés et couvés artificiellement, sont ouverts. On peut alors observer le fœtus, son cœur et les battements cardiaques sont parfaitement visibles. Après injection d'adrénaline ou de liquide physiologique (solution contrôle), on suit la fréquence cardiaque par comptage du nombre de battements par unité de temps. À partir du tableau de valeurs fourni, l'élève pourra éventuellement construire un graphique. À t = 0 min, la fréquence cardiaque est identique dans les deux cas. Elle reste stable dans le cas contrôle (à quelques variations près) et augmente fortement chez l'embryon auquel de l'adrénaline a été injecté (d'un facteur 2,5). L'élève pourra en déduire que l'adrénaline induit une augmentation de la fréquence cardiaque. À noter qu'avec cette expérience, on ne sait pas si l'effet de l'adrénaline sur la fréquence cardiaque est direct ou indirect. Des précisions sur le protocole et des vidéos sont disponibles via l'URL fourni en ressource numérique.

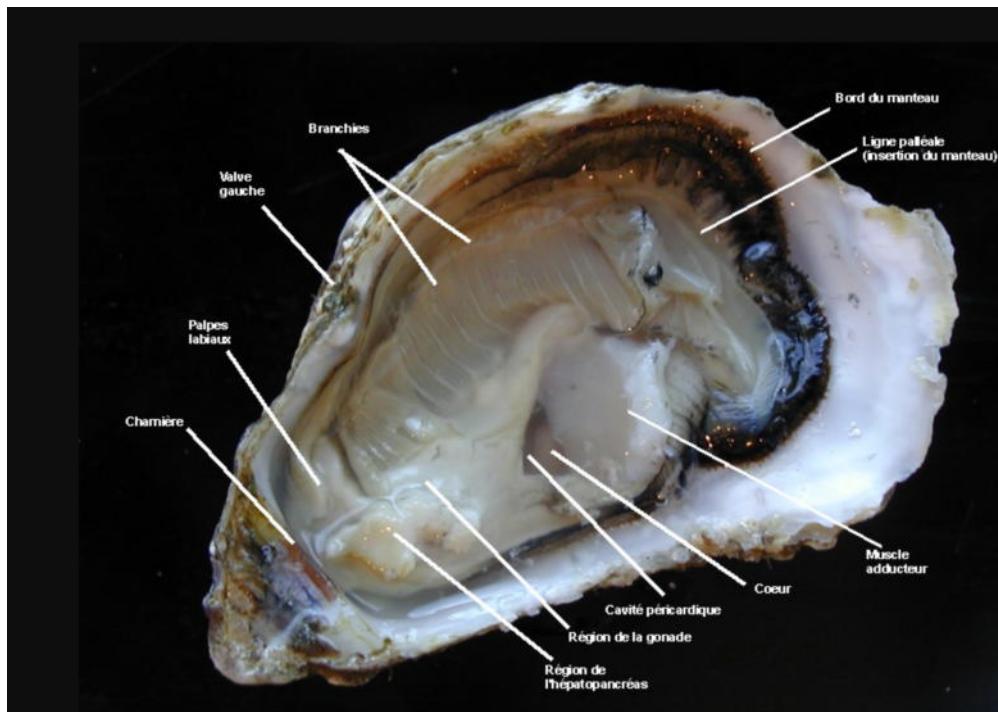
> Cette expérience est réalisable en classe mais sur une huître (moins visuel et moins parlant que l'embryon de poulet), pour des raisons légales et de matériel. Pour cela, placer l'huître avec la pointe

avant dirigée vers soi, la valve droite, plate vers le haut. Ouvrir l'huître en introduisant un couteau au niveau de la limite entre les 2 coquilles en sectionnant le muscle adducteur situé en position médiane et postérieure. La majorité de l'huître se trouve dans la valve gauche.

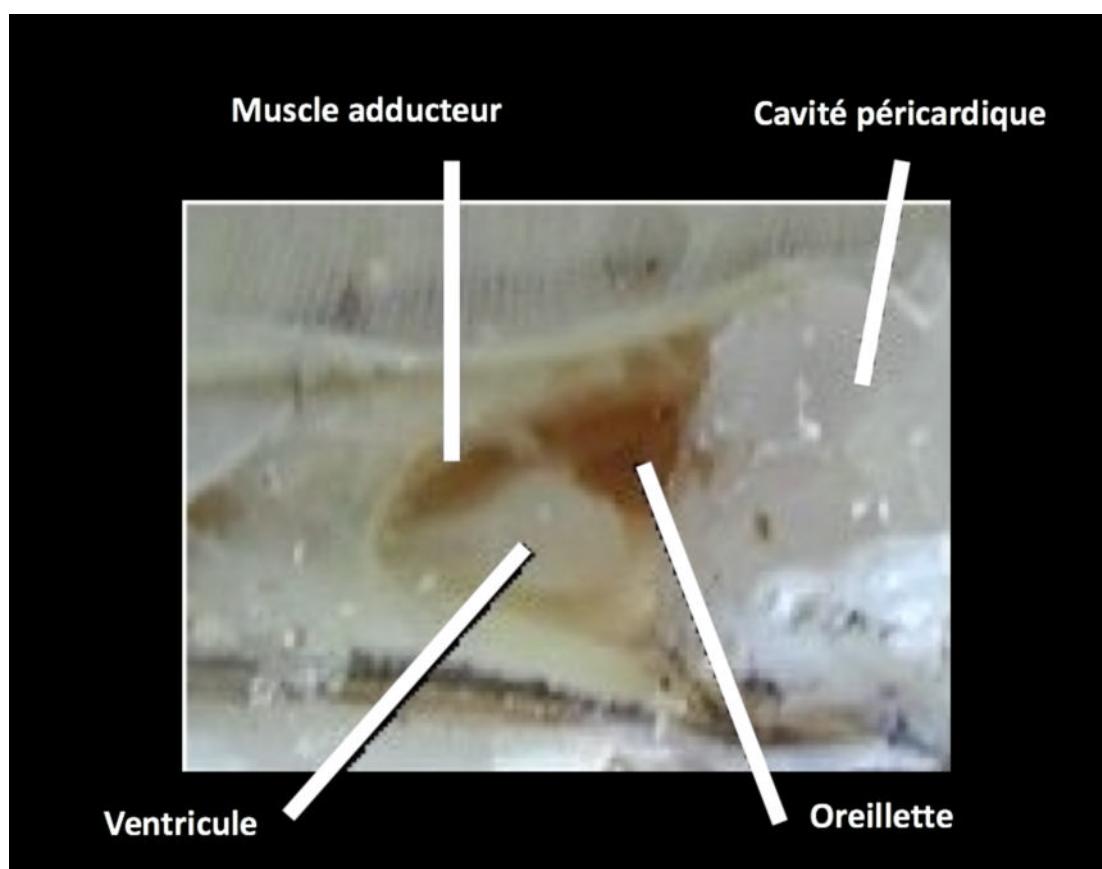
Vous observez le bord festonné du manteau souvent pigmenté, le cœur se situe juste à côté du muscle adducteur, dans la partie antérieure. Pour observer le cœur, incisez le manteau puis le péricarde qui entoure le cœur et écartez les lambeaux ; vous observez les battements cardiaques. Le cœur comprend une oreillette et un ventricule, et il bat à une fréquence de 20-30 contractions par minute.

Pour visualiser l'effet de l'adrénaline, vous pouvez déposer au compte-goutte quelques gouttes d'une solution d'adrénaline dans la cavité palléale, juste au-dessus du cœur, plusieurs concentrations peuvent être testées puis compter le nombre de battements par unité de temps, avant et après ajout d'adrénaline.

Anatomie interne de l'huître. Source : www.snv.jussieu.fr/bmedia/ATP/dis-hui.htm.

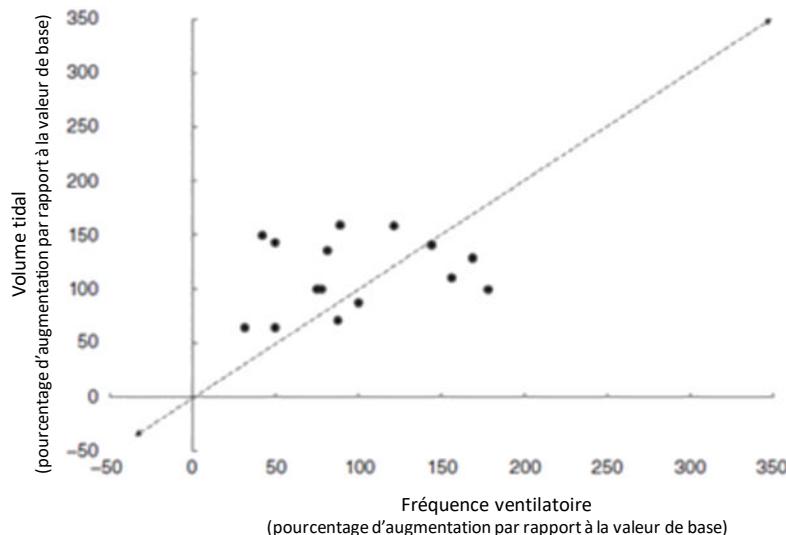


Dissection d'un cœur d'huître. Source : www.snv.jussieu.fr/bmedia/ATP/dis-hui.htm.



> Le **document 2** complète les effets de l'adrénaline sur la fréquence ventilatoire. À $t = 0$ min, la fréquence ventilatoire est de 25 cycles par minute, elle augmente faiblement à 30 cycles par minutes entre 1 et 3 min plus tard, puis fortement, jusqu'à 42 cycles par minutes, 5 min après l'injection. Elle décroît ensuite progressivement pour revenir à sa valeur initiale, 30 min après l'injection. On notera l'effet rapide de l'adrénaline sur la fréquence ventilatoire, quelques minutes, et son action transitoire avec un retour à la valeur initiale au bout de 30 min (non visible dans le document 1). Cependant, cette expérience ne présente pas de vrai contrôle avec l'injection d'une solution témoin ne contenant pas d'adrénaline.

Pour aller plus loin, des études montrent que non seulement la fréquence ventilatoire augmente mais également le volume tidal. Ci-dessous, un extrait de la publication « *The human ventilatory response to stress: rate or depth* », M. J. Tipton et coll., *J. Physiol.* 595(17) : 5729-5752 (2017). Des individus soumis à un agent stressant (exposition au chaud) voient une augmentation de leur volume tidal et de leur fréquence ventilatoire.



> Le document 3 s'intéresse à la glycémie sanguine, troisième paramètre énoncé dans le programme. L'étude proposée permettra à l'élève d'appréhender l'effet de l'adrénaline, du cortisol et leur action combinée. L'expérience est réalisée sur des chiens anesthésiés donc proche des conditions *in vivo*. L'ordonnée représente la variation de la glycémie et non la valeur de la glycémie : toute valeur positive indique une augmentation de la glycémie et inversement. L'injection de cortisol n'a pas d'effet sur la glycémie, la variation peut être considérée nulle (les barres d'erreur recouvrant la valeur 0). L'injection d'adrénaline provoque une augmentation quasi-immédiate de la glycémie jusqu'à atteindre un plateau à 3 h avec une variation de + 30 mg.dL⁻¹. L'action combinée de l'adrénaline et du cortisol induit une augmentation de la glycémie plus forte que celle de l'adrénaline seule (courbe toujours au-dessus), et toujours continue pendant 5 h (aucune phase de plateau observée). Ce sera l'occasion d'introduire la notion de synergie : l'effet combiné de l'adrénaline et du cortisol est bien supérieur à la somme des effets de chaque composé pris séparément.

> Le document 4 complète le document 3 en précisant l'origine du glucose et de l'augmentation de la glycémie. Deux mécanismes sont abordés :

(1) Le premier uniquement cité dans la légende renvoi aux notions vues dans le chapitre 18 : adrénaline et cortisol stimulent la glycogénolyse et donc la production de glucose qui sera libéré dans la circulation sanguine par les hépatocytes.

(2) Le second concerne le mécanisme de néoglucogenèse des hépatocytes. La néoglucogenèse n'étant pas explicitement au programme, elle est simplement vue comme une manière de produire du glucose à partir de petits molécules sanguines (alanine, lactate). Un exercice de fin de partie permet d'aller un peu plus loin sur ce point en présentant le cycle de Cori (pp. 518-519). Le cortisol n'ayant pas d'effet seul (document 3), son action n'est pas étudiée. Cependant, en toute rigueur, pour pouvoir effectuer une analyse précise, cette information serait nécessaire.

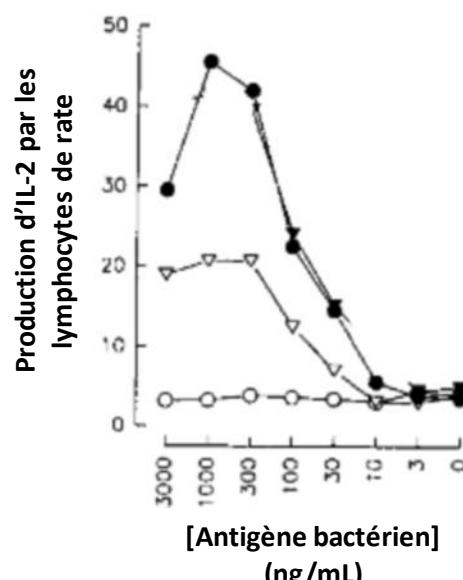
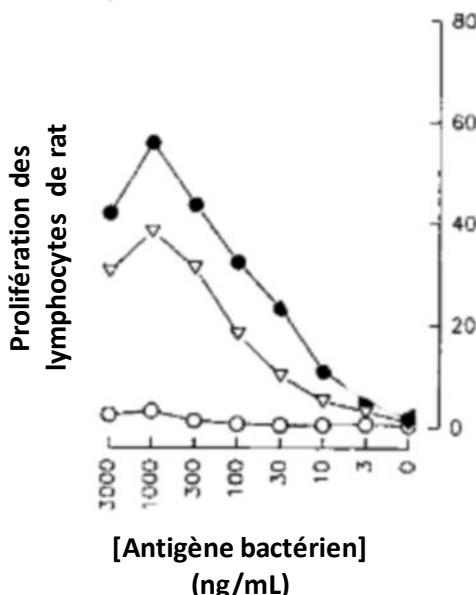
L'efficacité de la néoglucogenèse est mesurée à 0 jour (moment de l'injection = condition contrôle juste avant l'injection) et à 3 jours post-infusion. La présence d'adrénaline entraîne une augmentation significative de l'efficacité de la néoglucogenèse d'un facteur 2. L'action combinée de l'adrénaline et du cortisol induit une augmentation significative d'un facteur 1,8, non significativement différente de l'augmentation induite par l'adrénaline seule. On ne montre pas ici d'effet synergique comme dans le document 3, seule l'adrénaline semble avoir un effet positif sur la néoglucogenèse. Ce résultat pourra intriguer les élèves et des hypothèses explicatives pourront être énoncées comme un effet synergique sur d'autres voies du métabolisme comme la glycogénolyse (d'ailleurs démontrée).

> Le document 5 résume sous la forme de trois phrases, les effets du cortisol sur le système immunitaire. L'élève devra ici faire appel à ses connaissances de première pour en comprendre les implications. Une étape de remobilisation des connaissances pourra être nécessaire avant l'analyse de ce document. Les effets discutés sont les suivants :

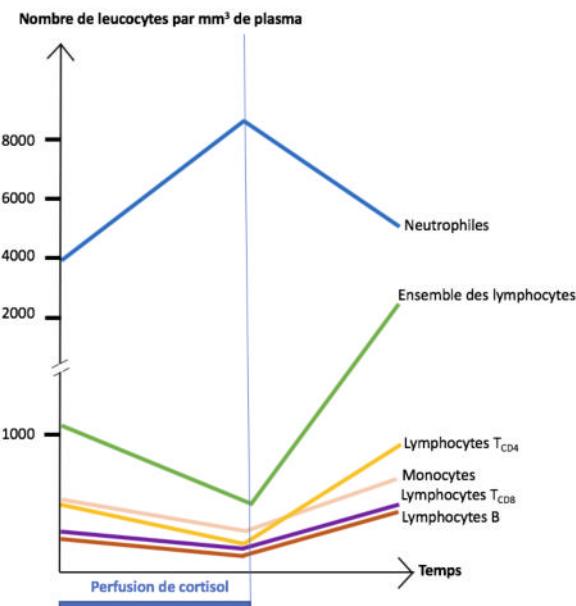
- (1) La diminution de la capacité d'activation des lymphocytes par les cellules dendritiques. On montre que, lorsque les cellules dendritiques sont traitées avec du cortisol, le nombre de cellules T qu'elles activent est plus faible. Pour aller plus loin, une analyse de document peut être réalisée à partir de cet extrait de la publication suivante : « *Glucocorticoids down-regulate dendritic cell function in vitro and in vivo.* », M. Moser et coll., *Eur J. Immunol.* 25(10) : 2818-2824 (1995).

Des cellules dendritiques sont traitées avec de la dexaméthasone (glucocorticoïde de synthèse) ou de l'éthanol. Leur capacité d'activation des lymphocytes T est alors mesurée. Pour cela, des lymphocytes T sont mis en présence ou non des cellules dendritiques traitées auquel on ajoute un antigène bactérien en quantité variable. L'activation des lymphocytes T est estimée par leur prolifération ou leur production d'IL-2.

- Lymphocytes de rate seuls
- Lymphocytes de rate mis en présence de cellules dendritiques traitées à l'éthanol
- △ Lymphocytes de rate mis en présence de cellules dendritiques traitées à la dexaméthasone (glucocorticoïdes/cortisol)

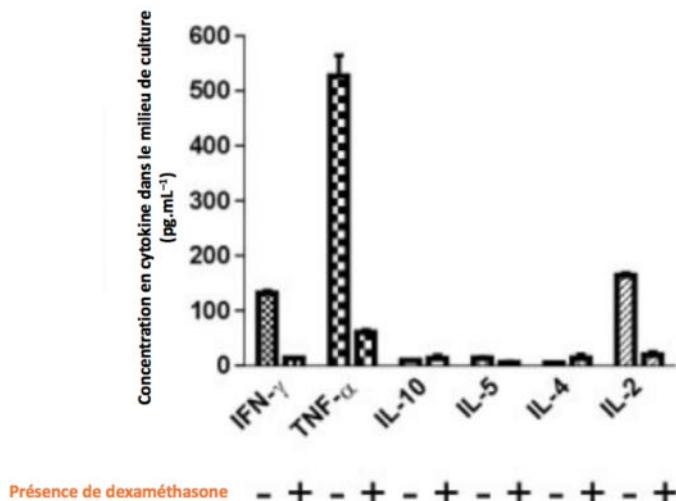


- (2) La diminution du nombre de lymphocytes T_{CD4} dans le sang et la lymphe. Ce phénomène est constaté rapidement après l'augmentation du taux de cortisol. Des études réalisées *in vitro* montrent plus en détail leur effet sur l'ensemble des leucocytes (ci-dessous, d'après Berne et Lévy, *Physiology*, Elsevier)



- (3) Forte diminution de la production de cytokines activatrices. Des résultats d'expériences *in vitro* issus de la publication « *Rapid immunosuppressive effects of glucocorticoids mediated through Lck and Fyn* » [M. Löwenberg et coll., *Blood* 106(5) : 1703-1710 (2005)] peuvent fournir des arguments expérimentaux

Des lymphocytes T_{CD4} activés sont cultivés *in vitro* pendant 12 h en présence d'un activateur du récepteur T et avec ou sans dexaméthasone (un glucocorticoïde de synthèse produisant des effets analogues au cortisol). La quantité de cytokines produites par ces cellules est alors mesurée dans le milieu de culture.



> Les photographies du **document 6** illustrent différents exemples de comportements chez des animaux face au stress provoqué par l'attaque d'un prédateur. L'élève pourra décrire les images proposées pour qualifier le comportement :

- mangouste face à un cobra : comportement de type « fight », les deux protagonistes s'affrontent ;
- cervidé en fuite : comportement de type « flight », le cervidé s'enfuit lorsqu'un prédateur arrive ;
- couleuvre faisant la morte : comportement de type « freeze » / « fright », la couleuvre ne s'enfuit pas face au prédateur, mais se fige et mime une couleuvre morte censée dissuader le prédateur.

La légende précise les différents types de comportements que l'élève pourra associer mais également leur temporalité de mise en œuvre.

> Le **document 7** fait le lien entre les différents types de comportements face au stress et les modifications physiologiques vues dans les documents précédents. Chez le lapin, la fréquence cardiaque est suivie dans trois situations :

- un comportement de repos qui correspond à la situation contrôle que l'élève devra repérer ;
- un comportement d'exploration au cours duquel l'animal se déplace pour explorer l'environnement dans lequel il est. Sa fréquence cardiaque augmente de 5 %, en lien vraisemblablement avec son activité physique ;
- un comportement de type « fight or flight » au cours duquel l'animal adopte un comportement tel que décrit dans le document 6. Sa fréquence cardiaque augmente fortement d'environ 30 % démontrant le lien entre comportement et modification d'un paramètre physiologique. Elle augmente plus fortement que lors d'un simple déplacement d'exploration.

Attention toutefois, la relation de cause à effet n'est ici pas démontrée. On pourra tout de même proposer une explication hypothétique fondée sur les connaissances, qui consiste à supposer que l'augmentation de la fréquence cardiaque permet un meilleur approvisionnement des muscles en nutriments et donc soutient un comportement de type « fight or flight ». Pour compléter le document, des images illustrant le comportement du lapin issues de la publication « Characteristics of heart rate fluctuations and respiratory movements during orienting, passive avoidance and flight-fight behavior in rabbits » [A. Richter et coll., *Int. J. Physiol.*, 10(1) : 75-83, 1990] peuvent être utilisées :

Comportements



> Le **document 8** complète les documents 6 et 7 en proposant un second lien entre paramètre physiologique modifié en situation de stress et comportement. La glycémie de souris en situation de stress (présence d'une souris étrangère) est mesurée à partir d'échantillons sanguins en parallèle d'une étude de leur comportement par visionnage vidéo. Le protocole est réalisé sur 9 souris et les données sont disponibles dans un tableau. L'élève pourra les utiliser pour reconstruire le graphique

présenté dans le document et tracer la droite de régression linéaire. La corrélation est ici très imparfaite mais une corrélation linéaire peut néanmoins être détectée (droite tracée).

L'élève pourra s'interroger sur la qualité de la régression en lien avec le programme de mathématiques. Pour prendre un peu de recul, la valeur du coefficient de corrélation est assez faible, mais ce sont des résultats classiques pour ce type d'étude comportementale. L'autre point qui pourra être soulevé pour expliquer ces résultats, c'est la très vraisemblable variabilité inter-individuelle, mais aussi les biais de mesure, car la durée de comportement de type fuite ou combat est estimée par visionnage d'une vidéo par l'expérimentateur. L'interprétation d'une posture ou d'une attitude n'est pas univoque. La même remarque que précédemment pourra être faite ici, il n'y a pas de relation de cause à effet démontrée.

> Le texte du **document 9** permet de préciser et d'élargir les notions vues sur le comportement en situation de stress. Il applique notamment la théorie de Cannon à l'homme et présente les facteurs psychiques ou sociaux influençant la réponse physiologique et comportementale. La notion de variabilité inter-individuelle devra également ressortir de l'analyse de ce texte.

Unité 5

> L'unité 5 aborde la dernière étape de l'épisode stressant : la sortie de l'état de stress. L'objectif est de présenter les mécanismes physiologiques à l'œuvre, notamment le rétrocontrôle du cortisol sur l'axe hypothalamo-hypophysaire, et d'introduire la notion de résilience.

> Le **document 1** présente l'effet de la sécrétion de cortisol sur la sécrétion d'ACTH et de cortisol lui-même : c'est la boucle de rétrocontrôle négatif. L'expérience proposée utilise une technique de pointe consistant à injecter précisément un analogue de cortisol directement dans le cerveau. La photographie présentée permet de visualiser réellement le dispositif expérimental. L'élève pourra se référer aux coupes de cerveau vues précédemment pour se repérer dans l'anatomie cérébrale. Chez les rats témoins (sans injection de DEX), la concentration sanguine en ACTH augmente très rapidement après le début de l'épisode stressant pour atteindre un seuil de 180 pg.mL^{-1} et diminue à la fin de l'épisode stressant. Chez les rats ayant reçu une injection préalable de DEX, la concentration sanguine augmente moins fortement (130 pg.mL^{-1}) et chute plus rapidement. L'injection de cortisol dans le noyau paraventriculaire de l'hypothalamus limite la sécrétion d'ACTH.

L'élève devra ici remobiliser les éléments vus dans l'unité 3 concernant l'axe hypothalamo-hypophysocortico-surrénalien, pour en déduire que le cortisol exerce un rétrocontrôle négatif sur la sécrétion de CRH par les neurones du noyau paraventriculaire. Il s'agit ici d'une boucle de rétrocontrôle de 3^e ordre.

Le second graphique, qui suit la concentration sanguine en cortisol, permet de compléter l'analyse et de boucler la boucle. Chez les rats témoins, l'augmentation de la concentration sanguine en cortisol suit celle de la concentration en ACTH, atteint un pic 30 minutes après l'injection et reste à une valeur élevée pendant l'ensemble de l'enregistrement. L'élève retrouvera les éléments déjà vus dans les unités précédentes (2 et 3). Chez les rats traités avec la DEX, le début de la réponse est identique mais la concentration sanguine en cortisol diminue beaucoup plus rapidement en lien avec la diminution de la concentration en ACTH. Attention, il n'y a pas de relation de cause à effet déductible à partir de ce seul document.

Le cortisol, au niveau hypothalamique (noyaux paraventriculaires), inhibe la sécrétion d'ACTH par les cellules adrénocorticotropes de l'hypophyse et par voie de conséquence sa propre sécrétion. Il s'agit d'une boucle de rétrocontrôle négatif. On peut émettre l'hypothèse que le cortisol inhibe les neurones du noyau paraventriculaire, ce qui sera démontré dans le document 3.

> Le **document 2** présente le dispositif d'enregistrement utilisé lors d'une expérience d'électrophysiologie (document 3). La légende du document permet de donner les éléments de compréhension essentiels, un document numérique permet d'aller plus loin dans la compréhension

de cette technique explicitement au programme. L'élève devra remobiliser ses connaissances sur la communication nerveuse vues aux chapitres 15 et 16.

> L'interprétation du **document 3** nécessite d'avoir au préalable compris la technique décrite dans le document 2. Le dispositif est réalisé *in vitro* sur des coupes de cerveau, les électrodes d'électrophysiologie sont implantées dans les neurones du noyau paraventriculaire de l'hypothalamus. Comme décrit dans le document 2, on enregistre la quantité de courant à injecter pour maintenir la différence de potentiel constante. L'élève devra remobiliser ses connaissances sur la communication nerveuse. Les enregistrements de courant bruts présentés en haut à gauche de la figure permettent d'avoir une analyse qualitative globale. L'activité électrique (nombre et amplitude des courants) des neurones du NPV de rats traités à la DEX est plus faible que celle de rats témoins. La DEX étant un analogue du cortisol, on peut en déduire que le cortisol diminue l'activité électrique des neurones du NPV. Le graphique de droite permet d'avoir une analyse quantitative et statistique : on note une diminution de 40 % de l'activité neuronale, significative et réalisée sur 18 sujets. Il convient d'insister sur l'importance d'analyser les données brutes et non directement les données graphiques (précision des observations).

> Les photographies du **document 4** terminent de poser les bases du rétrocontrôle négatif du cortisol. On suit la quantité de CRH sécrété par les neurones du NPV soumis ou non à un traitement à la DEX. La technique proposée ici est une immunofluorescence utilisant des anticorps dirigés contre le CRH (qui est un peptide de 41 acides aminés). En présence de DEX, le niveau de fluorescence rouge (intensité et pourcentage de surface) et donc la sécrétion de CRH est plus faible que dans le cas contrôle. Le cortisol inhibe donc la sécrétion de CRH par les neurones du NPV.

> À l'issue de l'analyse des documents 1 à 4, l'élève doit être capable de reconstruire la boucle de rétrocontrôle négatif.

> Le schéma du **document 5** permet à l'élève de replacer les différents éléments vus dans leur contexte et d'apporter une précision moléculaire avec le concept d'interaction hormone/récepteur. Comme mentionné dans la légende, l'élève devra repérer que les cellules du complexe hypothalamo-hypophysaire et certaines cellules du système limbique possèdent des récepteurs au cortisol et sont donc sensibles à son action. Le document suggère ici une action du cortisol directement sur les cellules adrénocorticotropes, ce qui n'était pas vu dans les documents précédents.

L'encart à droite précise également la relation récepteur-ligand dans le cas de l'ACTH, et son action positive sur la sécrétion de cortisol par les spongiocytes. Ce schéma complète les informations données précédemment dans l'unité 3 : l'ACTH stimule les enzymes de biosynthèse du cortisol. Ce schéma pourra servir de base à la construction du schéma bilan demandé dans la tâche complexe.

> Pour mieux appréhender le phénomène de boucle de rétrocontrôle, le **document 6** propose une modélisation numérique réalisable en ligne. Le manuel propose une version simplifiée du protocole, le détail des réglages étant proposé dans le manuel numérique. Le logiciel permet de créer chacune des variables du système. Il est conseillé de commencer par établir l'axe hypothalamo-hypophysio-cortico-surrénalien et la boucle de rétrocontrôle négatif. Puis lorsque le système fonctionne, vous pouvez ajouter la variable mimant un stimulus stressant qui sera fixée à 0 par défaut et pourra être activée lorsque l'expérimentateur choisira de perturber le système. Enfin, vous pouvez ajouter la variable de sortie, un paramètre contrôlé par le cortisol comme la glycémie. L'élève fait fonctionner le système en déclenchant un stimulus stressant et en suivant l'évolution de la valeur des variables au cours du temps sur le graphique qui s'affiche. Il pourra modifier différents paramètres pour voir leur effet. La notion de résilience pourra être introduite ici avec le retour à l'état initial du système.

À noter que le système est ici très incomplet car l'effet du cortisol sur la glycémie est en synergie avec l'adrénaline ; le modèle construit ici est très simplifié et ne tient pas compte des nombreuses interactions possibles. La démarche de modélisation est une démarche complexe, et il peut être envisagé un temps d'explication autour de ce point particulier : simplification du système, choix des variables retenues et écartées, limites du modèle construit.

> Le texte du **document 7** permet d'introduire la notion de résilience. L'élève devra en comprendre que la résilience est permise par la boucle de rétrocontrôle négatif assurée par le cortisol. De plus, cette capacité est variable selon les individus, la notion de variabilité inter-individuelle est également un élément clef. Enfin, le texte se termine par une ouverture vers le chapitre suivant sur le stress chronique.

Corrigé des parcours tâche complexe

Unité 1

> Éléments de correction

Le format attendu est un texte argumenté illustré d'exemples et de données quantitatives. Le plan de la réponse est donné dans la question posée. L'argumentation devra s'appuyer sur les documents présentés dans l'unité, il est attendu que l'élève fasse une synthèse des documents. Le texte pourra s'organiser de la manière suivante :

1. Une courte introduction (éventuellement une perspective historique s'appuyant sur le document 6)
2. Une première partie présentant la notion de stress et les situations qui le provoquent/ Le stress aigu désigne les réponses adaptatives (physiologiques, cognitives, comportementales) de l'organisme face aux agents stressants :
 - stimuli internes ou externes à l'organisme ;
 - stimuli physiques ou psychiques/émotionnels dus à des paramètres biotiques ou abiotiques.
 C'est une réponse biologique « normale ». (Tous les documents).
3. Une seconde partie présentant les manifestations biologiques du stress
 - augmentation de la concentration plasmatique enadrénaline et en cortisol (doc. 2 et 3) ;
 - modification de l'humeur (doc. 2) ;
 - augmentation de la fréquence cardiaque et ventilatoire (doc. 3, 4, 5, 6) ;
 - de manière corrélative, une inhibition de la digestion, de la croissance, de la reproduction (doc. 6) ;
 - avec un décalage de la cinétique permettant l'établissement des réponses et leur arrêt après le stimulus stressant ;
 - l'ensemble de ces réponses étant stéréotypée, c'est-à-dire similaire quel que soit le stimulus stressant considéré.
4. Une courte conclusion apportant une ouverture à portée plus générale, extension à d'autres animaux (doc 1), notion de variabilité inter-individuelle (doc. 6).

> Support d'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Synthèse	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée : <ul style="list-style-type: none"> • certains documents ne sont pas exploités • réponse à une seule des 2 sous-questions 	Démarche pertinente mais maladroite : <ul style="list-style-type: none"> • manque de synthèse dans le récapitulatif des situations stressantes ou dans le récapitulatif des situations biologiques • nature stéréotypée non relevée 	Démarche à la fois pertinente et cohérente

Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents : • toutes les situations stressantes ne sont pas relevées • toutes les manifestations biologiques ne sont pas relevées	Complets ou suffisants
Communication Texte	Non conforme	<ul style="list-style-type: none"> • Le texte ne précise pas l'origine des informations citées dans les documents • Le texte ne présente pas d'exemples et de données quantitatives • Le texte n'est pas argumenté 	Le texte est argumenté, présente l'origine des informations et contient des exemples et des données quantitatives

Unité 2

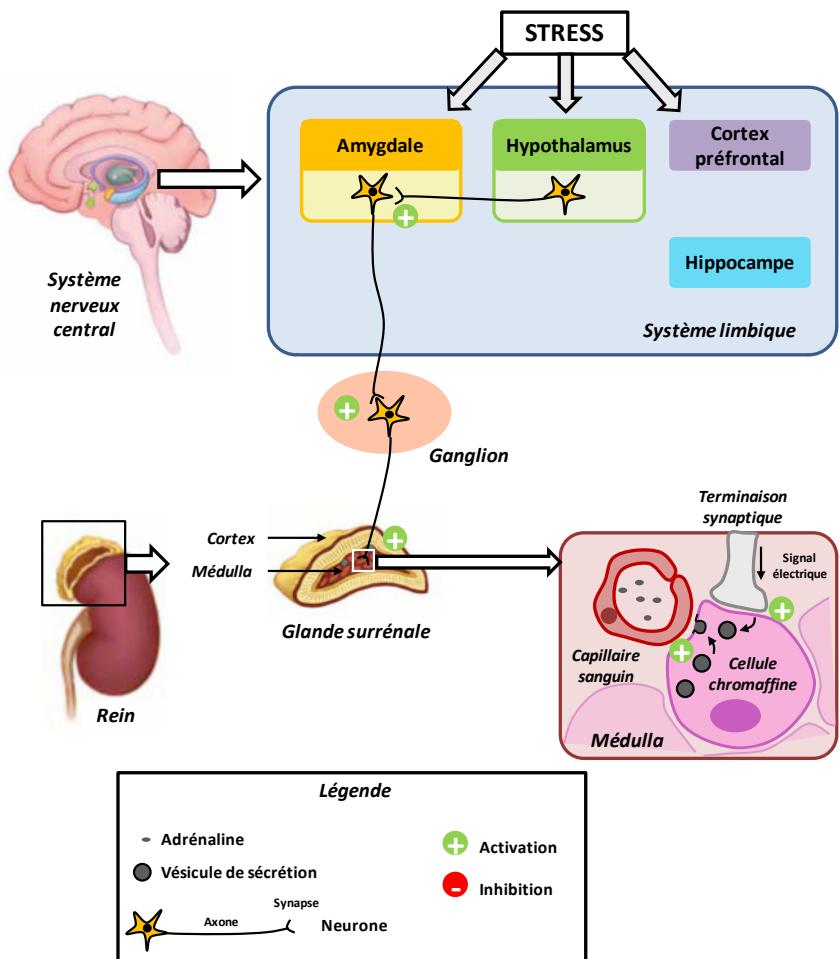
> Éléments de correction

Le format attendu est un schéma accompagné d'un texte court présentant la notion de phase d'alarme. Le schéma devra si possible intégrer les différentes échelles vues dans l'unité (échelle anatomique de l'organisme jusqu'à l'échelle cellulaire). Le texte accompagnant le schéma devra préciser ce qu'est la phase d'alarme et s'appuiera essentiellement sur la cinétique présentée dans le document 1.

Pour construire le schéma, l'élève pourra prendre comme base celui présenté dans le document 4 pour le compléter. Ce sera l'occasion pour lui de vérifier sa compréhension. Il faudra ajouter :(1) les éléments d'intégration du stimulus stressant au niveau du système limbique ; (2) la connexion nerveuse avec les cellules chromaffines. Pour ce dernier point, l'élève pourra s'appuyer sur ses connaissances vues dans les chapitres précédents. Enfin, il devra rendre le schéma fonctionnel en y agrémentant les informations collectées à partir des autres documents (doc. 2, 3, 5).

Voici un exemple de réponse possible :

La phase d'alarme est caractérisée par une réponse rapide de l'organisme au stimulus stressant. Le stimulus perçu par le système nerveux central conduit rapidement à la sécrétion d'adrénaline (doc. 1) grâce à la communication nerveuse (schéma). L'augmentation de la concentration plasmatique en adrénaline sera responsable des manifestations physiologiques.



> Support d'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Schéma et texte	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée : <ul style="list-style-type: none"> Certains documents ne sont pas exploités Manque l'un des deux supports (texte ou schéma) 	Démarche pertinente mais maladroite : <ul style="list-style-type: none"> Manque de synthèse des différents documents dans le schéma Texte sans lien avec le schéma 	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents : <ul style="list-style-type: none"> Manque de précisions sur la relation système nerveux-cellules chromaffines Schéma n'intégrant pas les informations fonctionnelles Schéma pas assez précis 	Complets et précis	
Communication Texte et schéma	Non conforme	Il y a un schéma et un texte	Le schéma n'est pas précis ou pas suffisamment légendé ou pas assez propre	Le schéma correspond aux attentes (précis, légendé, propre, etc.) Le texte est court et synthétique

Unité 3

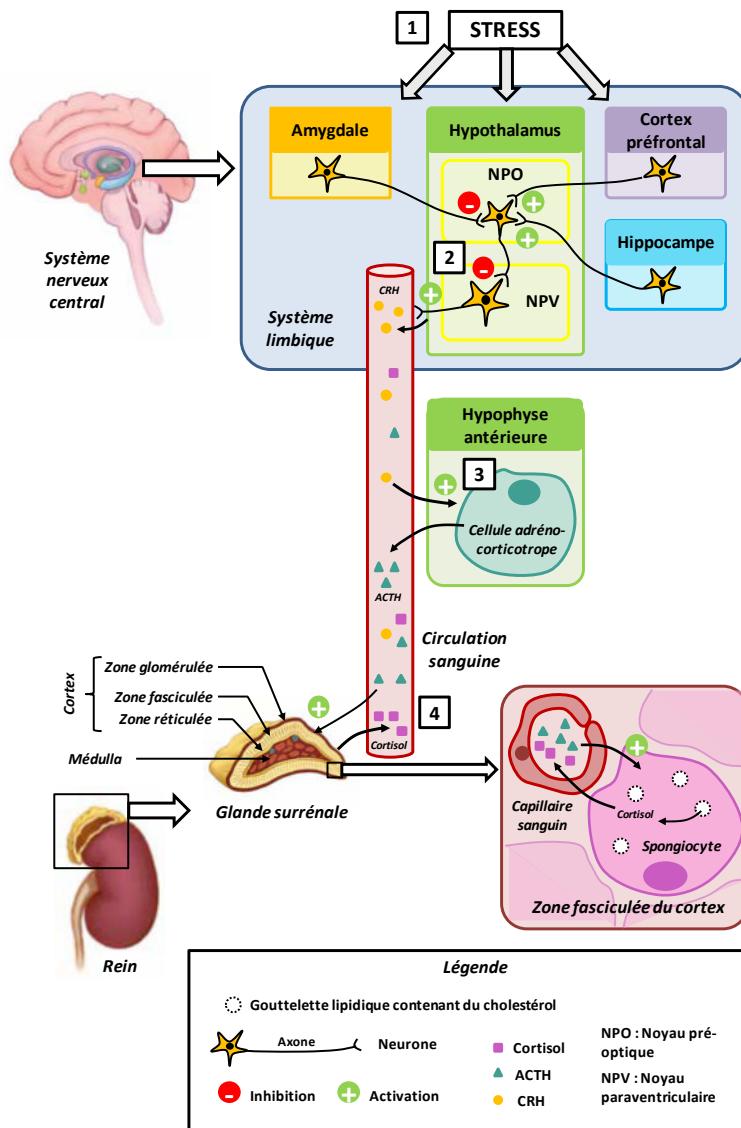
> Éléments de correction

Le format attendu est un schéma accompagné d'un texte court présentant la notion de phase de résistance. Le schéma devra si possible intégrer les différentes échelles vues dans l'unité (échelle anatomique de l'organisme jusqu'à l'échelle cellulaire). Le texte accompagnant le schéma devra préciser ce qu'est la phase de résistance et pourra prendre appui sur la cinétique présentée dans le document 1 de l'unité 2, et rappelée dans le document 3.

Pour construire le schéma, l'élève pourra prendre comme base celui présenté dans le document 1 pour le compléter. Ce sera l'occasion pour lui de vérifier sa compréhension. Il pourra y ajouter une glande cortico-surrénale avec un zoom sur les spongiocytes associés aux capillaires sanguins de la zone fasciculée. Il faudra ajouter aussi : (1) les éléments d'intégration du stimulus stressant au niveau du système limbique ; (2) la connexion sanguine entre les cellules adrénocorticotropes et les spongiocytes. Pour ce dernier point, l'élève pourra s'appuyer sur ses connaissances vues dans les chapitres précédents. Enfin, il devra rendre le schéma fonctionnel en y agrémentant les informations collectées à partir des autres documents (docs 2, 3, 4, 5).

Voici un exemple de réponse possible :

La phase de résistance est la seconde phase de réponse de l'organisme à un stimulus stressant. Le stimulus perçu par le système nerveux central et en particulier le système limbique conduit à la sécrétion de CRH par les neurones du NPV. Le CRH active la sécrétion d'ACTH par les cellules adrénocorticotropes de l'hypophyse antérieure. L'ACTH à son tour stimule la sécrétion de cortisol par les spongiocytes de la zone fasciculée de la glande cortico-surrénale. Les nombreuses étapes de cette voie avec une communication à la fois hormonale et nerveuse (neuro-hormonale) font que celle-ci est plus lente que celle conduisant à la sécrétion d'adrénaline : la sécrétion de cortisol présente donc un certain délai par rapport à la survenue du stimulus stressant. L'augmentation de la concentration plasmatique en cortisol sera responsable des manifestations physiologiques observées.



> Support d'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Schéma et texte	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée : <ul style="list-style-type: none"> • Certains documents ne sont pas exploités • Manque l'un des deux supports (texte ou schéma) 	Démarche pertinente mais maladroite : <ul style="list-style-type: none"> • Manque de synthèse des différents documents dans le schéma • Texte sans lien avec le schéma 	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents : <ul style="list-style-type: none"> • Manque de précisions sur la relation entre les trois composantes : système limbique et hypothalamus, hypophyse, glande cortico-surrénale • Schéma n'intégrant pas les informations fonctionnelles • Schéma pas assez précis 	Complets et précis	
Communication Schéma et texte	Non conforme	Il y a un schéma et un texte	Le schéma n'est pas précis ou pas suffisamment légendé ou pas assez propre	Le schéma correspond aux attentes (précis, légendé, propre, ...) Le texte est court et synthétique

Unité 4

> Éléments de correction

Le format attendu est une présentation orale reposant sur un diaporama. On attend une courte introduction sur le stress aigu, une conclusion répondant à la question posée et un développement s'appuyant majoritairement sur des schémas correctement légendés et titrés. Le texte devra être réduit à quelques phrases pertinentes.

Pour construire la présentation, l'élève s'aidera des schémas bilans réalisés dans les unités 2 et 3 précédentes, comme suggéré dans l'intitulé de la tâche complexe. Le schéma bilan de l'unité 2 présente la sécrétion d'adrénaline pendant la phase d'alarme ; il pourra être complété de l'effet de l'adrénaline sur la fréquence ventilatoire (document 2), la fréquence cardiaque (documents 1 et 7) et la glycémie (documents 3 et 4) vus dans cette unité. Le schéma bilan de l'unité 3 présente la sécrétion de cortisol pendant la phase de résistance ; il pourra être complété de l'effet du cortisol sur la glycémie (en synergie avec l'adrénaline) et sur le système immunitaire (document 5). Les aspects comportementaux et leurs liens avec les paramètres physiologiques modifiés pourront faire l'objet d'un troisième axe de la présentation. L'aspect comportemental sera développé chez l'animal et chez l'être humain grâce au texte du document 9. L'absence de relation de cause à effet devra être soulignée.

> Support d'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Présentation orale sur support diaporama	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée : <ul style="list-style-type: none">• Certains documents ne sont pas exploités• Manque certaines informations	Démarche pertinente mais maladroite : <ul style="list-style-type: none">• Manque de liens et de connecteurs logiques entre les différents aspects traités• Manque de synthèse et d'intégration	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absent	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents : <ul style="list-style-type: none">• Un des aspects n'est pas traité (sécrétion hormonale, conséquence physiologique, réponse comportementale)• Les 3 aspects sont traités trop superficiellement	Complets et précis	
Communication Présentation	Non conforme	Présentation orale s'appuyant sur des diapositives	Support de la présentation correctement construit (schémas bien légendés et titrés, peu chargée en texte) ; oral clair mais quelques imperfections	La présentation et le support répondent aux attentes

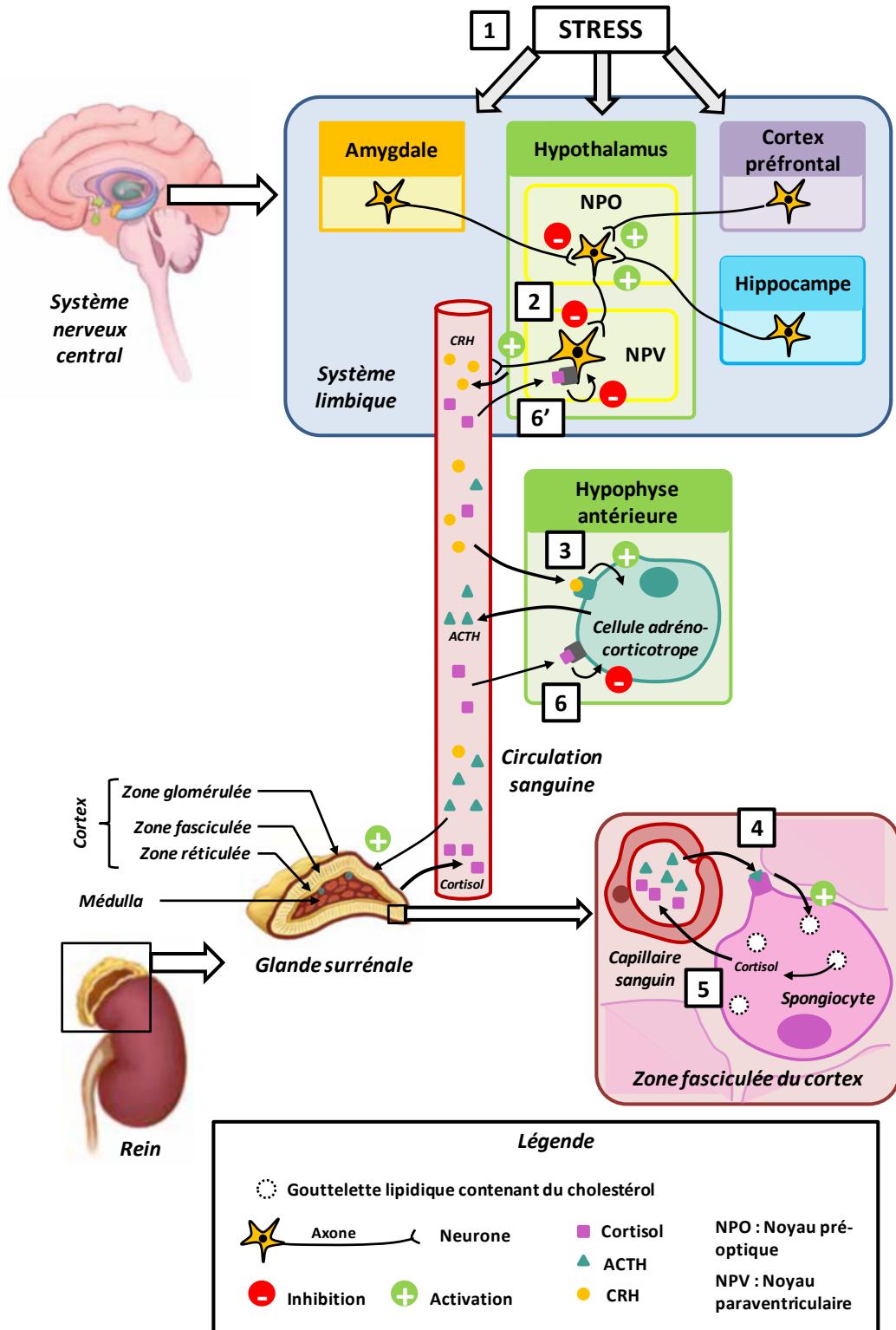
Unité 5

> Éléments de correction

Le format attendu est un schéma présentant la boucle de rétrocontrôle négatif mise en évidence dans l'unité. Le schéma devra si possible intégrer les différentes échelles vues dans l'unité (échelle moléculaire, cellulaire, anatomo-physiologique) et faire le lien avec la notion de résilience.

Pour construire le schéma, l'élève pourra prendre comme base le schéma bilan construit à l'unité 3 ou à défaut le schéma du document 1 de l'unité 3. Il pourra y ajouter une glande cortico-surrénale avec un zoom sur les spongiocytes associés aux capillaires sanguins de la zone fasciculée. Il faudra ajouter : (1) les éléments d'intégration du stimulus stressant au niveau du système limbique ; (2) la connexion sanguine entre les cellules adrénocorticotropes et les spongiocytes. Pour ce dernier point, l'élève pourra s'appuyer sur ses connaissances vues dans les chapitres précédents.

Sur cette base schématique, l'élève ajoutera les connaissances moléculaires vues dans ce chapitre : types de récepteurs (au cortisol et à l'ACTH) sur les cellules concernées et leurs interactions avec les molécules circulantes (cortisol, ACTH, CRH). Enfin, le schéma sera rendu fonctionnel en y ajoutant les informations collectées à partir des autres documents (docs 1, 3, 4, 6, 7). La fonctionnalisation du schéma peut être réalisée via des flèches montrant le trajet des molécules sécrétées ou de l'information électrique neuronale, via des symboles d'activation (+) ou d'inhibition (-). Une chronologie peut être indiquée par des numéros.



> Support d'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Schéma et texte	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée : • Le schéma est incomplet, des parties du système sont manquantes	Démarche pertinente mais maladroite : - Le schéma n'est pas fonctionnel mais uniquement anatomique	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents : • Manque une étape pour reconstituer la boucle de rétrocontrôle • La notion de rétrocontrôle n'est pas illustrée • Schéma pas assez précis	Complets et précis	
Communication Texte	Non conforme	Il y a un schéma	Le schéma n'est pas précis ou pas suffisamment légendé ou pas assez propre	Le schéma correspond aux attentes (précis, légendé, propre, etc.) Le texte est court et synthétique

Propositions corrigées de parcours pas-à-pas

Unité 1

Question 1. Observez les cartoons présentés dans le document 1 et déterminez ce qui induit un état de stress dans la situation présentée. Proposez une catégorisation des situations provoquant un stress.

1. Stress lié aux examens.
2. Stress lors d'un oral devant son supérieur hiérarchique.
3. Stress d'un animal pris en chasse par un prédateur.
4. Stress lié à des pensées de film d'horreur.
5. Stress physique d'un bain glacé.
6. Stress physique lié à une température élevée.

Le stress peut être physique ou psychologique, il peut-être dû à des stimuli biotiques ou abiotiques, internes ou externes à l'organisme.

Question 2. À l'aide des documents 2, 3 et 5, identifiez les manifestations physiologiques et psychiques du stress.

Le stress (quelque soit sa nature) provoque :

- une détérioration de l'humeur ;
- une augmentation de la concentration plasmatique enadrénaline ;
- une augmentation de la concentration plasmatique en cortisol ;
- une augmentation de la fréquence cardiaque ;
- une augmentation de la fréquence ventilatoire.

Question 3. À l'aide du document 4, commentez la cinétique de la réponse biologique à une situation stressante.

La réponse biologique, ici matérialisée par l'augmentation de la fréquence cardiaque et du débit sanguin (dans l'avant-bras), nécessite un délai de mise en œuvre suite au début du stimulus stressant. De même, l'arrêt de la réponse n'est pas immédiat après la fin du stimulus stressant, elle présente une diminution rapide puis une diminution plus lente avant de revenir à la valeur initiale (ce que l'on suppose).

Question 4. À partir de la lecture du document 6 et des informations des documents 2, 3, 5, justifiez la nature stéréotypée des réponses biologiques observées en situation de stress.

Une réponse stéréotypée est une réponse similaire quelque soit les stimuli appliqués. Dans tous les documents présentés, les stimuli stressants sont différents (stress psychique comme les astronautes ou le test de Stroop, stress physique thermique) mais les réponses observées sont similaires :

- augmentation de la concentration plasmatique enadrénaline dans les docs 2 et 3 ;
- augmentation de la fréquence ventilatoire dans les docs 3 et 5.

Ces données déduites des documents sont appuyées par le texte du document 6.

Question 5. À l'aide des documents 2 à 5, complétez votre réponse à la question 1 concernant le panel des situations stressantes.

- Stress psychique : stress des astronautes en mission, test de Stroop, test de calcul mental.
- Stress physique : exposition ou choc froid.
- Sources de stress internes à l'organisme : test de Stroop, test de calcul mental.
- Source de stress externes à l'organisme : évènements imprévus, chocs thermiques.

Unité 2

Question 1. Analysez et interprétez le document 1 pour caractériser les deux phases de réponse.

L'événement stressant est un saut en parachute. Avant cet événement, et par anticipation, la concentration plasmatique enadrénaline augmente fortement, et ce corrélativement à la fréquence cardiaque pour atteindre un pic centré sur l'événement stressant. C'est cinétiquement la première réponse de l'organisme qui est qualifiée de phase d'alarme.

De manière un peu plus tardive, la concentration plasmatique en cortisol augmente pour atteindre un pic quelques minutes après l'événement stressant. Cette seconde phase de la réponse est qualifiée de phase de résistance.

Question 2. Présentez le système limbique. Que se passe-t-il au niveau de cette structure cérébrale en situation de stress ?

Le système limbique est un groupe de structures cérébrales impliquées dans le contrôle du comportement et des émotions :

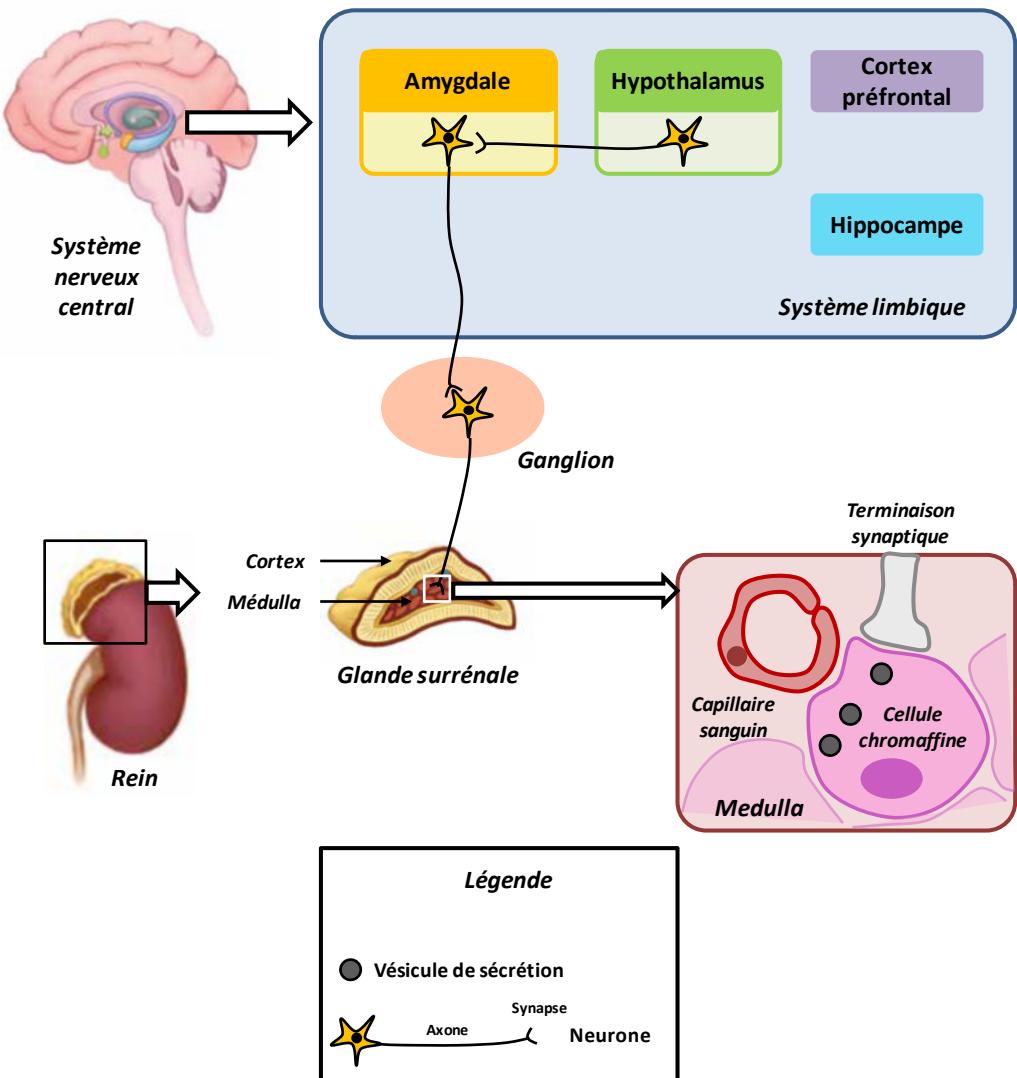
- l'amygdale est impliquée dans la gestion des émotions ;
- l'hippocampe est impliqué dans la mémorisation ;
- l'hypothalamus est impliqué dans le contrôle des fonctions végétatives ;
- le cortex préfrontal permet de traiter l'information et de prendre des décisions.

Lors d'un stress (comme le test de Stroop), l'activité de ces régions est fortement augmentée lorsque l'on compare un individu sensible au stress par rapport à un individu moins sensible.

Question 3. En utilisant les documents 4 et 6, construire sous forme schématique le lien anatomique entre le système limbique et les cellules chromaffines sécrétrices d'adrénaline.

Le document 4 présente les connexions nerveuses depuis le système limbique jusqu'à la medulla de la medullo-surrénale. Il suffit de reprendre ce schéma.

Le document 6 présente la structure de la surrénale avec la position et l'organisation des cellules chromaffines. Il faut compléter le schéma précédent en ajoutant un axone et une terminaison synaptique contactant une cellule chromaffine dans la medulla d'une glande surrénale. Cette cellule chromaffine se trouve à proximité dans un capillaire sanguin dans lequel elle libérera l'adrénaline stockée dans ses vésicules.



Question 4. Quel(s) document(s) présent(s) dans l'unité permet(tent) de démontrer le lien entre stimulus stressant et libération d'adrénaline ? Faites un résumé concis des éléments fonctionnels démontrés.

Le document 2 montre que l'injection d'adrénaline permet à un chien adrénalectomisé de retrouver des paramètres cardiovasculaires normaux suite à un stimulus stressant.

Le document 5 montre que la stimulation de l'hypothalamus (une région du système limbique) provoque la sécrétion d'adrénaline.

Le stimulus stressant active donc le système limbique et en particulier l'hypothalamus. L'hypothalamus activé provoque la libération d'adrénaline par les cellules chromaffines de la medullo-surrénale. L'hypothalamus étant connecté indirectement aux cellules chromaffines par voie nerveuse, la communication est ultra-rapide.

Bonus : le stimulus électrique de l'hypothalamus déclenche l'exocytose de neurotransmetteurs au niveau du bouton synaptique terminal situé dans la medullo-surrénale. Ce neurotransmetteur active l'exocytose des vésicules contenant l'adrénaline des cellules chromaffines.

Unité 3

Question 1. Analysez et interprétez les documents 2 et 3. Quel est l'effet du stimulus stressant ?

Sur le document 2, on remarque que le stimulus stressant provoque une activation des neurones du noyau paraventriculaire de l'hypothalamus (par rapport au cas contrôle). Cette activation est observée quel que soit l'âge des rats testés, mais est exacerbée chez des rats âgés de 2 à 3 mois. L'âge a donc une influence sur la sensibilité au stress. Le document 3 nous montre que le stress provoque très rapidement (en quelques minutes) la sécrétion de CRH par les neurones du noyau paraventriculaire de l'hypothalamus. Le stimulus stressant active donc les neurones du noyau paraventriculaire de l'hypothalamus qui sécrètent alors du CRH.

Question 2. Analysez et interprétez le document 4. Quel est l'effet du CRH sur l'hypophyse antérieure ?

La perfusion de CRH à une dose suffisante (10^{-10} mol.L⁻¹) provoque la sécrétion d'ACTH par les cellules adrénocorticotropes de l'hypophyse antérieure. Plus la concentration de CRH micro-perfusée est élevée, plus la sécrétion d'ACTH est élevée : il y a une relation dose-réponse. (Le signal codé en concentration de CRH est alors codé en concentration d'ACTH.)

Question 3. Analysez et interprétez les documents 5 et 6. Quel est l'effet de l'ACTH sur la glande cortico-surrénale ?

Le document 6 montre que la glande cortico-surrénale est composée de 3 zones : glomérulée, fasciculée, réticulée. La zone fasciculée contient des spongiocytes qui sont des cellules possédant de nombreuses mitochondries et des gouttelettes lipidiques contenant du cholestérol. Le cholestérol est le précurseur de la synthèse de cortisol. Ces cellules se situent à proximité des capillaires sanguins dans lesquels elles peuvent sécréter le cortisol.

D'après le document 5, l'ajout d'ACTH dans une culture *in vitro* de cellules de glande cortico-surrénale provoque une augmentation de leur sécrétion de cortisol après seulement quelques minutes. D'après le document 6, les cellules responsables de cette sécrétion sont les spongiocytes de la zone fasciculée. La sécrétion de cortisol est transitoire, elle augmente fortement et rapidement après l'ajout d'ACTH et retrouve une valeur presque identique à la période pré-ajout après 100 min.

En conclusion, l'ACTH induit une sécrétion transitoire de cortisol par les spongiocytes de la zone fasciculée de la glande cortico-surrénale.

Question 4. Analysez le document 1. Faites le lien avec vos réponses aux questions 1 et 2.

Les différents noyaux du système limbique sont connectés entre eux par des synapses activatrices ou inhibitrices. Ils convergent tous vers l'hypothalamus et en particulier le noyau pré-optique (centre intégrateur) qui inhibe les neurones du noyau paraventriculaire. Les neurones du noyau paraventriculaire font synapse au niveau d'un lit capillaire, ce sont vraisemblablement les neurones sécréteurs de CRH (cf documents 2 et 3). Leur activation dépend de la somme des signaux en provenance des différentes aires cérébrales du système limbique.

Le réseau capillaire hypothalamique est relié directement au réseau capillaire hypophysaire (système porte), le CRH libéré par les neurones du NPV pourra activer directement la sécrétion d'ACTH par les cellules adrénocorticotropes de l'hypophyse antérieure. Leur sécrétion d'ACTH pourra s'effectuer dans le même réseau capillaire et être distribué dans l'ensemble de la circulation sanguine. Au niveau des capillaires de la zone fasciculée de la cortico-surrénale, l'ACTH activera la sécrétion de cortisol par les spongiocytes.

Question 5. À partir de vos réponses aux questions précédentes, proposez un schéma qui retrace l'implication des différentes structures anatomiques dans la réponse de l'organisme au stress aigu et leur lien avec la sécrétion de cortisol.

Voir schéma de la tâche complexe.

Unité 4

Question 1. Analysez et interprétez le document 1. Quel est l'effet de l'adrénaline sur la fréquence cardiaque ?

L'expérience est réalisée sur un embryon de poulet. Lorsqu'on injecte du liquide physiologique, la fréquence cardiaque de l'embryon reste stable à 60 battements par minute environ. Lorsque de l'adrénaline est injectée, la fréquence cardiaque augmente fortement, d'un facteur 2,5 et atteint un plateau (à t_2 , t_3). Par comparaison au témoin, on peut en déduire que l'adrénaline induit une augmentation de la fréquence cardiaque.

Question 2. Analysez et interprétez le document 2. Quel est l'effet de l'adrénaline sur la fréquence ventilatoire ?

La fréquence ventilatoire est suivie chez des chiens anesthésiés qui reçoivent une injection d'adrénaline. Quelques minutes après l'injection, la fréquence ventilatoire augmente d'abord faiblement (de 20 à 30 battements par minute) puis plus fortement à 43 battements par minute, 5 minutes après l'injection. Elle diminue ensuite progressivement pour retrouver sa valeur avant injection après 30 minutes. En conclusion, l'adrénaline induit une augmentation de la fréquence ventilatoire.

Question 3. Analysez et interprétez les documents 3 et 4. Quels sont les effets de l'adrénaline et du cortisol sur la glycémie ?

L'injection de cortisol à des chiens n'a aucun effet sur l'augmentation de la glycémie, sa variation reste toujours nulle (barres d'erreur). En revanche, l'injection d'adrénaline provoque une augmentation rapide et forte de la glycémie qui atteint un plateau à $+30 \text{ mg.dL}^{-1}$, 3 heures après l'injection. L'injection combinée d'adrénaline et de cortisol induit une augmentation encore plus forte de la glycémie qui atteint 60 mg.dL^{-1} , 5 heures après l'injection. Adrénaline et cortisol ont une action synergique.

L'augmentation de la glycémie sanguine suppose une libération de glucose dans le sang. L'organe principalement impliqué dans cette fonction est le foie. On s'intéresse à l'action de l'adrénaline et du cortisol sur les hépatocytes.

L'adrénaline et le cortisol stimulent la glycogénolyse. La glycogénolyse est la voie métabolique permettant de produire du glucose à partir du glycogène. Le glucose produit sera alors libéré dans le sang augmentant la glycémie.

On suit également leur effet sur la néoglucogenèse, une voie permettant la synthèse de glucose à partir de petites molécules puisées dans le sang. L'effet du cortisol seul n'est ici pas étudié. L'infusion d'adrénaline à des chiens augmente l'efficacité de la néoglucogenèse par rapport au niveau pré-infusion d'un facteur 2. L'infusion combinée d'adrénaline et de cortisol augmente l'efficacité de la néoglucogenèse d'un facteur 1,8 par rapport au niveau pré-infusion. Il n'y a pas d'effet synergique entre le cortisol et l'adrénaline.

L'augmentation de la glycémie sanguine passe donc par une augmentation de la glycogénolyse hépatique stimulée par le cortisol et l'adrénaline et par une augmentation de l'efficacité de la néoglucogenèse hépatique stimulée par l'adrénaline.

Question 4. D'après les documents 6 et 9, quels sont les types de réponses comportementales mises en œuvre en situation stressant chez les animaux et chez l'homme ?

En conditions stressantes, les réponses comportementales peuvent être de quatre types :

1. « Freeze » : une immobilisation de l'individu face à la menace qui se présente.

2. « Flight » : une fuite face au danger.

3. « Fight » : le déclenchement d'un combat entre les deux protagonistes, dans le cas où la fuite **aurait** échoué ou si l'individu se sent menacé sans possibilité de s'enfuir.

4. « Fright » : une immobilisation totale, qualifiée d'effroi, connue chez les animaux qui font le mort et chez les humains après un événement traumatisique.

Ces différents comportements peuvent également se retrouver séquentiellement chez un même individu au cours d'un épisode stressant depuis l'étape 1 jusqu'à l'étape 4.

Enfin, il y a une forte variabilité inter-individuelle, notamment chez l'homme, qui dépend de facteurs psychologiques, sociaux, émotionnels et génétiques.

Question 5. D'après les documents 7 et 8, quel(s) lien(s) peut-on établir entre conséquences physiologiques du stress et comportement ?

D'après le document 7, la fréquence cardiaque d'un lapin augmente lors d'un comportement de type « fight or flight », de 30 % environ, par rapport à une situation de repos. Cette augmentation est bien plus forte que lors d'un simple exercice physique de type déplacement d'exploration, où elle n'augmente que de 5 %. Le comportement de type « fight or flight » est bien associé à une augmentation de la fréquence cardiaque. Aucun lien de cause à effet ne peut être déduit de cette expérience, il s'agit d'une simple corrélation.

D'après le document 8, plus la durée du comportement de fuite ou de combat est conséquente, plus la glycémie de l'individu considéré est élevée. Il y a donc une bonne corrélation entre comportement en situation stressante et augmentation de la glycémie. De même que précédemment, aucun lien de cause à effet ne peut être déduit de cette expérience, il s'agit d'une simple corrélation. De plus, on note une très grande variabilité individuelle, la droite de régression a un coefficient de corrélation assez faible.

Unité 5

Question 1. Analysez et interprétez le document 1. Comment se nomme l'effet mis en évidence ?

Chez les rats témoins (sans injection de DEX), la concentration sanguine en ACTH augmente très rapidement après le début de l'épisode stressant pour atteindre un seuil de 180 pg.mL^{-1} et diminue à la fin de l'épisode stressant. Chez les rats ayant reçu une injection préalable de DEX, la concentration sanguine augmente moins fortement (130 pg.mL^{-1}) et chute plus rapidement. L'injection de cortisol dans le noyau paraventriculaire de l'hypothalamus limite la sécrétion d'ACTH.

Or le cortisol est sécrété par l'axe hypothalamo-hypophysio-cortico-surrénalien : l'activation des neurones du NPV induit leur sécrétion de CRH, le CRH active la sécrétion d'ACTH par les cellules adrénocorticotropes et l'ACTH stimule la synthèse et la sécrétion de cortisol par les spongiocytes de la zone fasciculée. Le fait que le cortisol inhibe en amont la voie la sécrétion de molécules qui stimulent sa propre sécrétion s'appelle un rétrocontrôle négatif.

Le second graphique suit la concentration sanguine en cortisol. Chez les rats témoins, l'augmentation de la concentration sanguine en cortisol suit celle de la concentration en ACTH, atteint un pic 30 minutes après l'injection et reste à une valeur élevée pendant l'ensemble de l'enregistrement. Chez les rats traités avec la DEX, le début de la réponse est identique mais la concentration sanguine en cortisol diminue beaucoup plus rapidement en lien avec la diminution de la concentration en ACTH. Cela confirme les conclusions précédentes, le rétrocontrôle négatif du cortisol sur les cellules en amont de la voie permet de limiter sa propre sécrétion.

Question 2. D'après les documents 3 et 4, quel est l'effet du cortisol sur les neurones du NPV ? Vous vous aiderez du document 2 pour analyser le document 3.

Dans le document 3, on utilise un dispositif d'enregistrement électrophysiologique *in vitro* et on enregistre le courant dans les neurones du NPV de l'hypothalamus. Sur les enregistrements bruts, on observe que l'activité électrique (nombre et amplitude des courants) des neurones du NPV de rats

traités à la DEX est plus faible que celle de rats témoins. La DEX étant un analogue du cortisol, on peut en déduire que le cortisol diminue l'activité électrique des neurones du NPV. D'après le graphique, on quantifie cette diminution d'activité à environ 60 % de l'activité neuronale normale.

Sur les photographies du document 4, on remarque qu'en présence de DEX, le niveau de fluorescence rouge (intensité et pourcentage de surface) des neurones du NPV et donc la sécrétion de CRH est plus faible que dans le cas contrôle non traité. Le cortisol inhibe donc la sécrétion de CRH par les neurones du NPV.

D'après ces deux documents, on peut en déduire que le cortisol exerce un rétrocontrôle négatif en inhibant l'activité électrique des neurones du NPV et par voie de conséquence leur libération de CRH dans le sang.

Question 3. À partir de vos connaissances acquises dans les unités précédentes, reconstituez l'axe hypothalamo-hypophysio-cortico-surrénalien et les voies de communications qui les relient.

La réponse à cette question reprend le schéma bilan effectué dans l'unité 3.

Question 4. Précisez le schéma réalisé en positionnant les récepteurs aux différentes molécules : cortisol, ACTH, CRH. Complétez le schéma pour le rendre fonctionnel et matérialiser la boucle de rétrocontrôle négatif du cortisol.

- Le récepteur au cortisol est localisé sur les neurones du système limbique (amygdale, hippocampe, et neurones du NPV hypothalamique) ainsi que sur les cellules adrénocorticotropes.
- Le récepteur à l'ACTH est localisé sur les spongiocytes de la zone fasciculée de la cortico-surrénale.
- Le récepteur au CRH (non mentionné dans le document mais qui peut être déduit), est localisé sur les cellules adrénocorticotropes.

Des flèches matérialiseront le trajet des différentes molécules et signaux électriques et leurs effets positifs ou négatifs sur les cellules cibles.

Question 5. À partir de l'activité numérique du document 6, du texte du document 7 et de votre schéma réalisé à la question 4, expliquez le phénomène de résilience.

En faisant fonctionner le modèle numérique du document 6, on s'aperçoit que lors de l'application d'une perturbation, les taux sanguins de CRH, d'ACTH et de cortisol augmentent, plus ou moins fortement en fonction de l'intensité de la perturbation stressante provoquée. Cette augmentation transitoire est suivie d'une diminution et d'un retour à la normale, plus ou moins rapide en fonction de la perturbation provoquée. Ce phénomène disparaît si la boucle de rétrocontrôle négatif du cortisol sur les neurones du NPV est supprimée.

D'après le document 7, ce phénomène de retour à l'état d'équilibre initial des paramètres physiologiques s'appelle résilience. Ce phénomène de résilience est donc permis par la boucle de rétrocontrôle négatif assurée par le cortisol.

Cette capacité de résilience repose sur le système neuroendocrinien présent chez tous les individus mais semble variable selon les sujets.

Corrigés des exercices

Exercice 2

1. En absence de stress, on observe que la concentration plasmatique en ACTH est constante avant et après injection à une valeur d'environ 100 pg/mL quelle que soit la condition testée.

On en déduit que la sécrétion d'ACTH n'est pas activée en absence de stress ou par l'ajout de drogue bloquant les récepteurs à la noradrénaline.

2. Effet du stress

En condition de stress et en injectant une solution saline (contrôle sans drogue), on observe que la concentration d'ACTH augmente fortement à partir du moment d'injection pour atteindre un pic à 700 pg.mL⁻¹ au début de la phase de stress. Sa concentration reste élevée pendant toute la phase de stress puis diminue relativement lentement au cours du temps à la fin de la phase de stress. 30 minutes après la fin de l'épisode stressant, la concentration en ACTH plasmatique reste toujours supérieure à la concentration avant la phase stressante.

Par comparaison avec l'expérience précédente (sans stress), on en déduit que le stress induit une augmentation de la concentration d'ACTH plasmatique (qui est même anticipée par rapport à la survenue de l'épisode stressant).

3. Importance des récepteurs à la noradrénaline et effet de la localisation de l'injection

On cherche à déterminer l'importance des connexions synaptiques à noradrénaline dans l'évolution de la concentration plasmatique en ACTH liée à un stimulus stressant.

On réalise une injection d'un inhibiteur des récepteurs à noradrénaline soit dans le cervelet (courbe D), soit dans l'amygdale (courbe C) à une concentration identique et on compare la concentration en noradrénaline au pic :

Lieu d'injection	[ACTH] plasmatique (pg.mL ⁻¹) au pic
Sans	700
Cervelet	700
Amygdale	520

L'inhibiteur a un effet sur la sécrétion d'ACTH uniquement s'il est injecté au niveau de l'amygdale.

La signalisation à noradrénaline impliquée dans le contrôle de la concentration en ACTH plasmatique est située dans l'amygdale.

Remarque : Dans toutes les conditions testées, on observe une évolution de la concentration en ACTH plasmatique similaire à celle observée en absence d'injection de drogue.

Effet de la concentration en inhibiteur

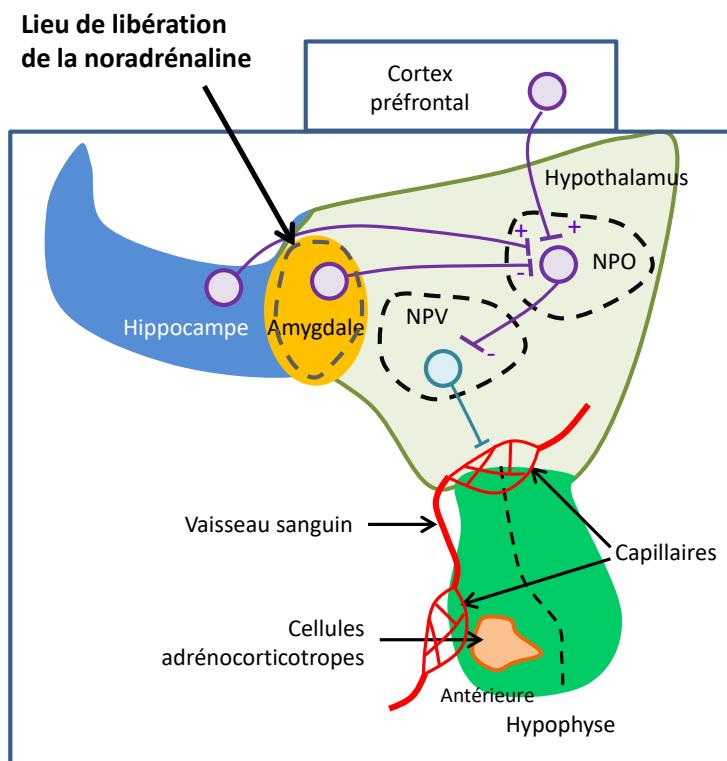
Cette même expérience est réitérée en injectant cette drogue à différentes concentrations dans l'amygdale (courbes A, B, C). Dans ces conditions, on observe une évolution de la concentration en ACTH plasmatique similaire à celle observée en absence d'injection de drogue.

Cependant, il est à noter que la concentration en ACTH plasmatique est toujours inférieure en présence de l'inhibiteur des récepteurs à la noradrénaline :

inhibiteur de récepteur à la NA	[ACTH] (pg.mL ⁻¹) au pic
Sans	700
0,2 mM	580
2 mM	520

De plus, plus la concentration en inhibiteur ajoutée est élevée, plus la concentration en ACTH est faible : il y a donc un effet dose-réponse.

On déduit donc que la sécrétion d'ACTH par l'hypophyse est dépendante de neurones à noradrénaline localisés dans l'amygdale.



Exercice 3

1.

Effet de l'adrénaline et du cortisol sur la concentration plasmatique en glucose

Doc. 1.

Lors de la perfusion d'adrénaline, on observe que la concentration plasmatique en glucose augmente rapidement de $90 \text{ à } 130 \text{ mg.dL}^{-1}$ en 60 minutes puis décroît lentement au cours des 4 heures suivantes. On en déduit que l'adrénaline induit l'augmentation de la concentration plasmatique en glucose.

Une expérience similaire est réalisée en ajoutant des doses croissantes d'adrénaline. On observe toujours un délai entre le début de la perfusion d'adrénaline et l'augmentation de la concentration plasmatique en glucose d'environ 1 heure. Et plus la concentration en adrénaline est élevée, plus la concentration plasmatique en glucose devient élevée. Il y a donc une relation dose réponse.

Doc. 2.

En présence d'adrénaline seule, la concentration plasmatique de glucose est évaluée à 35 mg.dL^{-1} . En présence d'adrénaline associée à du cortisol, la concentration plasmatique de glucose est évaluée à 65 mg.dL^{-1} . Donc la perfusion de cortisol associé à de l'adrénaline entraîne une augmentation de la concentration plasmatique en glucose.

Conclusion : L'adrénaline et le cortisol induisent une augmentation de la concentration plasmatique en glucose.

Effet de l'adrénaline et du cortisol sur la production de glucose par le foie

Doc. 1.

La perfusion d'adrénaline entraîne une augmentation rapide de la production de glucose par le foie, qui passe de $1,8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ à $2,8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ en environ 15 minutes. La production diminue ensuite lentement pour revenir à sa valeur initiale au bout de 2 heures environ. On en déduit que l'adrénaline induit une augmentation de la production hépatique de glucose.

Une expérience similaire est réalisée en ajoutant des doses croissantes d'adrénaline. On observe toujours un délai entre le début de la perfusion d'adrénaline et l'augmentation hépatique de glucose d'environ 15 minutes. À chaque fois que de l'adrénaline est ajoutée ou que sa concentration est augmentée, on observe une augmentation de la production de glucose (dans la même gamme de valeurs que pour la précédente expérience).

Remarque : À l'inverse, lorsque la perfusion d'adrénaline cesse, la production de glucose par le foie diminue très fortement (et devient inférieure à sa valeur initiale).

Si on compare la cinétique de production de glucose par le foie et celle du glucose plasmatique, on s'aperçoit que l'augmentation de la production de glucose par le foie précède toujours l'augmentation de la concentration plasmatique de glucose. Cela suggère (même s'il n'y a pas de relation de cause à effet démontrée ici) que l'augmentation de la concentration plasmatique en glucose serait liée à l'augmentation de la production hépatique de glucose. Cette hypothèse est également étayée par l'analyse de la seconde expérience.

Doc. 2.

En présence d'adrénaline seule, la production de glucose hépatique est d'environ $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, 1 heure après le début de la perfusion. En présence de cortisol associé à de l'adrénaline, la production de glucose hépatique est d'environ $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ après 1 heure de perfusion, soit 2 fois plus.

L'effet du cortisol (associé à l'adrénaline) sur la production hépatique de glucose est visible pendant toute la durée de l'expérience, avec, comme pour l'adrénaline, un délai d'environ 30 minutes avant que la production atteigne une valeur stable.

Remarque : Il est à noter qu'en présence d'adrénaline seule, la production hépatique de glucose a tendance à diminuer au cours du temps, alors qu'en présence de cortisol associé à l'adrénaline, elle reste plus élevée et stable sur les 5 heures que dure l'expérience.

Donc la perfusion de cortisol associé à de l'adrénaline entraîne une augmentation de la production hépatique de glucose. Comme pour l'expérience précédente, on peut faire l'hypothèse que l'augmentation accrue du glucose plasmatique lors de la perfusion de cortisol associé à de l'adrénaline serait due à une production accrue de glucose par le foie.

Remarque : Il y a plusieurs manières d'analyser les documents :

1. S'intéresser d'abord à l'effet de l'adrénaline et du cortisol sur la concentration en glucose plasmatique puis à leur effet sur la production de glucose par le foie. En terme de démarche, cela permet de poser une question intermédiaire : « À quoi est due l'augmentation de la concentration plasmatique en glucose lors de l'ajout d'adrénaline et/ou de cortisol ? »
2. S'intéresser d'abord à l'effet de l'adrénaline sur la concentration plasmatique en glucose et la production de glucose par le foie (doc. 1) puis à l'effet du cortisol (doc. 2). En terme de démarche, cela permet d'insister sur les effets associés de l'adrénaline et du cortisol.

2.

Si l'expérience du document 2 devait être répétée, il faudrait ajouter deux conditions supplémentaires :

- (1) Une condition avec perfusion d'une solution saline contrôle (contenant les mêmes constituants que la solution d'adrénaline et de cortisol mais sans ces deux composés). L'objectif serait d'avoir un point de comparaison de référence pour pouvoir apprécier l'effet de l'adrénaline sur la concentration plasmatique et la production hépatique de glucose.

- (2) Une condition avec perfusion d'une solution contenant du cortisol à la même concentration que celle utilisée dans la conditionadrénaline + cortisol. L'objectif serait d'avoir un point de comparaison pour pouvoir apprécier l'effet du cortisol seul sur la concentration plasmatique et la production hépatique de glucose. Cela permettrait de pouvoir déterminer si le cortisol et l'adrénaline ont un effet additif ou synergique.

Remarque : Dans les autres améliorations possibles de l'expérience, on peut suggérer :

- un suivi cinétique de la concentration plasmatique en glucose pour pouvoir la comparer à la cinétique de production hépatique et observer le temps de latence entre la perfusion et l'augmentation ;
- une précision sur les concentrations en adrénaline et cortisol utilisées : sont-elles physiologiques ?

Exercice 4

1. Doc. 1

On compare les différents paramètres physiologiques chez un sujet stressé (stress mental) et un sujet sain (témoin). On observe, une augmentation de la conductance cutanée, c'est-à-dire de l'activité électrique du corps humain de 40 %, une augmentation de la fréquence cardiaque de 9 %, une augmentation de la ventilation d'un facteur 2 et une augmentation de la concentration sanguine d'adrénaline et de cortisol.

Conclusion : le stress est à l'origine de l'augmentation de ces différents paramètres. L'adrénaline est impliquée dans l'augmentation de la fréquence cardiaque et de la ventilation. On peut supposer ici que l'augmentation de la concentration sanguine en adrénaline est responsable des effets observés sur la fréquence cardiaque et la ventilation (mais sans que le lien de cause à effet soit ici démontré).

2. Doc. 2

On analyse l'effet d'un β -bloquant sur deux paramètres physiologiques que sont la fréquence cardiaque et la pression artérielle systolique et diastolique.

Avec un traitement placebo, la fréquence cardiaque augmente de 20 %, et la pression systolique et diastolique de 17 % et 18 %, respectivement lors d'un test arithmétique (condition considérée stressante) par rapport à une condition normale. Ces résultats sont comparables (pour la fréquence cardiaque) à ceux observés dans le doc. 1.

Avec un traitement par β -bloquant, la fréquence cardiaque augmente de 8 %, et la pression systolique et diastolique de 10 % et 19 %, respectivement lors d'un test arithmétique. Il y a donc une moindre augmentation de ces paramètres (excepté pour la pression diastolique) lors d'un test stressant en présence d'un β -bloquant comparé au même test sans traitement β -bloquant. Donc les β -bloquants limitent les effets de la situation stressante sur la fréquence cardiaque et la pression systolique.

Or les β -bloquant sont des molécules qui bloquent les récepteurs à l'adrénaline. Donc l'ajout de β -bloquant mime l'effet d'une diminution de la concentration en adrénaline ou diminue l'effet de l'adrénaline sur ses organes cibles. On peut donc en déduire que l'adrénaline est responsable de l'augmentation de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle systolique en condition stressante.

Remarque : Il est aussi possible d'analyser l'effet du β -bloquant sur les paramètres physiologique d'un sujet témoin (en conditions non stressante). On observe alors une diminution de la fréquence cardiaque de 25 % et une diminution de la pression artérielle systolique de 10 %. Aucune modification de la pression artérielle diastolique n'est constatée. Selon le même raisonnement que précédemment, en condition non stressante, l'adrénaline est responsable d'une augmentation de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle systolique.

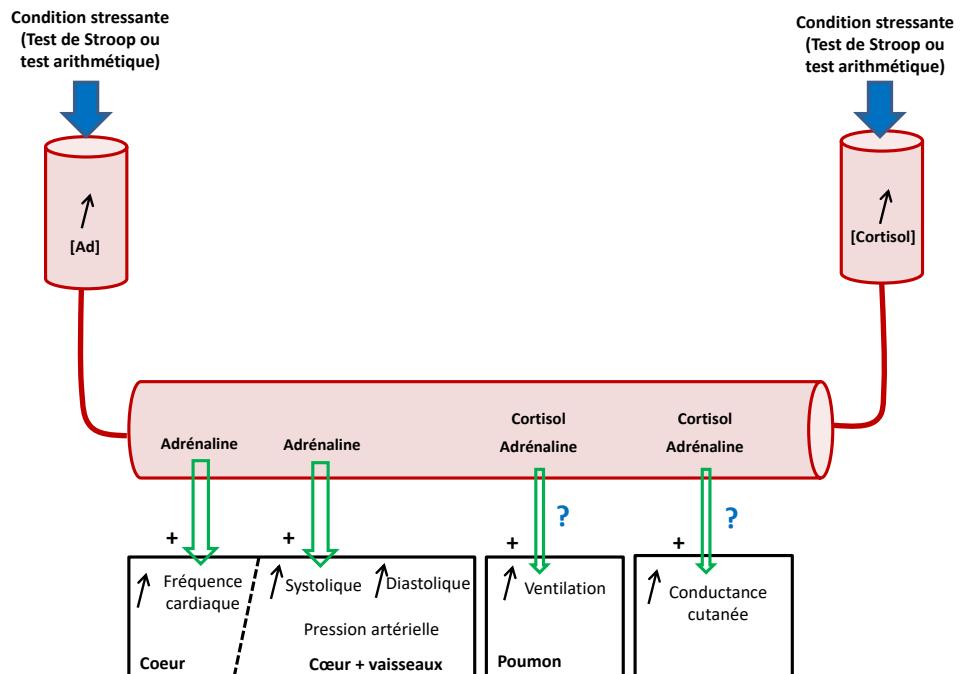
3.

La mifépristone est un antagoniste des récepteurs aux glucocorticoïdes (tels que le cortisol), c'est-à-dire que cette molécule bloque les récepteurs aux glucocorticoïdes et mime donc l'effet d'une diminution de la concentration en cortisol ou diminue les effets du cortisol sur ses organes cibles.

Si l'absence d'action (ou la diminution de l'effet) du cortisol n'a pas d'impact sur les paramètres physiologiques testés, c'est que **le cortisol** n'est pas impliqué dans le contrôle de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle (systolique et diastolique).

4.

Reprendre le schéma bilan du chapitre 19 et en extraire la partie correspondante :



Exercice 5

Les glandes surrénales

On remarque que la taille des glandes surrénales des rats stressés est supérieure à celle des rats témoins d'environ 0,1 cm (en longueur). On en déduit que le stress induit une augmentation de la taille des glandes surrénales de rats.

Or nous savons que les glandes surrénales sont impliquées dans la sécrétion des hormones du stress, l'adrénaline pour la medullo-surrénale et le cortisol pour la cortico-surrénale. L'hypertrophie de la glande pourrait s'expliquer par leur hyperactivité et leur sécrétion accrue de ses hormones, stimulée par l'axe hypothalamo-hypophysaire.

Les organes lymphoïdes : thymus et ganglions

On remarque que la taille des ganglionsiliaques des rats stressés est inférieure à celle des rats témoins d'environ 0,2 à 0,3 cm (en longueur). On effectue une observation similaire sur le thymus, dont le volume/surface diminue de moitié chez les rats stressés comparé aux rats témoins.

On en déduit donc que le stress induit une diminution de la taille des organes lymphoïdes.

Or nous savons que le thymus et les ganglions sont le lieu d'éducation des lymphocytes T et de résidence des lymphocytes T et B respectivement, c'est-à-dire des cellules de l'immunité adaptative.

L'hypotrophie de ces deux organes pourrait s'expliquer par un plus faible contenu en cellules immunitaires (notamment en lymphocytes). Ainsi, ces données suggèrent une inhibition du système immunitaire en conditions stressantes.

Conclusion

Ainsi, en conditions stressantes, on constate une modification de la taille des organes (augmentation ou diminution) qui peut être qualifiée d'adaptation. Les modifications physiologiques engendrées permettent à l'organisme de fonctionner dans les nouvelles conditions.

Exercice 6

Doc. 1.

Chez les sujets témoins, le taux de cortisol salivaire diminue lentement au cours du temps, passant de $0,17 \text{ } \mu\text{g.dL}^{-1}$ à $0,08 \text{ } \mu\text{g.dL}^{-1}$ en 150 min.

Si un stimulus stressant est appliqué, le taux de cortisol salivaire augmente assez brusquement, avant de diminuer à nouveau à la fin de la phase stressante. L'augmentation du taux de cortisol n'est pas immédiate après le début de la stimulation stressante, mais présente un délai d'environ 25 min et l'amplitude de l'augmentation est de $0,06 \text{ } \mu\text{g.dL}^{-1}$ soit à peu près 30% de la valeur initiale.

Doc. 2.

Une expérience similaire a été réalisée sur deux types de sujets présentant une réaction élevée ou faible aux situations stressantes. Chez les deux catégories de sujets, le stimulus stressant induit une augmentation de la concentration salivaire en cortisol :

- avec un délai d'environ 25 min (comme lors de l'expérience précédente) ;
- avec une amplitude variable selon la catégorie considérée.

Les sujets réagissant fortement au stress voient leur taux de cortisol salivaire augmenter fortement (de $0,14 \text{ } \mu\text{g.dL}^{-1}$ à $0,26 \text{ } \mu\text{g.dL}^{-1}$) soit un doublement. Les sujets réagissant modérément au stress voient leur taux de cortisol salivaire augmenter très faiblement (de $0,08$ à $0,10 \text{ } \mu\text{g.dL}^{-1}$).

L'amplitude du pic de cortisol consécutif à un épisode stressant dépend donc de chaque individu.

Remarque

1. On peut ajouter à l'analyse le cas du sujet de l'expérience du doc. 1 qui semble intermédiaire entre les deux catégories testées ici.
2. Il est à noter que les sujets réagissant faiblement aux situations stressantes, présentent, en temps normal, un niveau de cortisol salivaire nettement inférieur aux sujets réagissant fortement aux situations stressantes.

Délai du pic de cortisol

Dans toutes les expériences, on constate un délai entre l'application du stimulus stressant et le pic de cortisol. Compte-tenu de l'organisation de l'axe hypothalamo-hypophysio-cortico-surrénalien, on peut émettre l'hypothèse que le délai constaté correspond au temps nécessaire pour que l'ensemble des étapes de la cascade se mette en place :

1. Le stimulus stressant est perçu par les sens et transmis au système nerveux central, en particulier le système limbique.
2. Le système limbique active la libération de CRH par les neurones du noyau paraventriculaire de l'hypothalamus.
3. Le CRH circule par voie sanguine jusqu'aux spongiocytes de l'hypophyse antérieure.
4. En se fixant sur ses récepteurs, le CRH active la sécrétion d'ACTH par les spongiocytes.
5. L'ACTH circule par voie sanguine jusqu'à la glande cortico-surrénale.
6. En se fixant sur ses récepteurs, l'ACTH stimule la sécrétion de cortisol dans le sang.

Origine de la variabilité inter-individuelle

On observe une forte variabilité inter-individuelle en ce qui concerne l'amplitude du pic de cortisol consécutif au stimulus stressant.

L'origine de cette variabilité peut être multiple :

- **Origine génétique** : La sécrétion de cortisol impliquant de nombreux récepteurs et de nombreuses enzymes, on peut émettre l'hypothèse que chacun des gènes codant ces protéines présente plusieurs allèles. Chacun des allèles code alors une protéine avec des sensibilités, des affinités, des efficacités différentes. La multiplicité des combinaisons alléliques possibles de ces différents acteurs expliquerait la multiplicité des palettes de phénotypes observée.
- **Origine psychique et cognitive** : Chaque sujet recruté pour le test présente une sensibilité et un vécu qui lui est propre et ne réagira donc pas de la même façon à un même stimulus (indépendamment de son génotype), son système limbique sera plus ou moins activé.
- D'autres hypothèses peuvent être proposées.

Exercice 7

Doc. 1.

Dès le début du transport (condition stressante), la concentration sanguine d'ACTH augmente passant d'environ 0 pg.mL^{-1} à 1000 pg.mL^{-1} en 30 minutes.

De même, la concentration sanguine de cortisol augmente passant de 6 ng.mL^{-1} à 65 ng.mL^{-1} en 80 minutes, c'est-à-dire avec une cinétique plus lente.

Remarque : On retrouve ici le délai vu en cours.

La concentration sanguine en ACTH et cortisol diminue ensuite progressivement au cours du temps.

Conclusion : Le stress entraîne une sécrétion d'ACTH puis de cortisol.

Doc 2.

En comparant les conditions avant et après l'épisode stressant avec la condition « pendant » l'épisode stressant, on constate :

- une diminution significative de la concentration sanguine en LH de 20 %.
- une diminution significative de la fréquence des pulses de LH de 10 %.
- une diminution significative de l'amplitude des pulses de LH de 30 %.

Conclusion : Le stress affecte donc négativement la sécrétion de LH (fréquence et amplitude) chez la brebis.

Doc 3.

Cas contrôle

La GnRH est une hormone sécrétée par l'hypothalamus de manière pulsatile (à une fréquence de 16 mHz dans le cas testé ici).

La LH est une hormone sécrétée par l'hypophyse de manière pulsatile à une fréquence identique à celle de la GnRH. Sa sécrétion est d'ailleurs contrôlée par la GnRH d'où la concordance des pics.

Lors de la perfusion du liquide contrôle, on n'observe aucune modification de la sécrétion (ni de la concentration moyenne, ni de l'amplitude, ni de fréquence des pics) de GnRH par rapport à la condition sans injection de liquide.

De la même manière, on n'observe aucune modification de la sécrétion (ni de la concentration moyenne, ni de l'amplitude, ni de fréquence des pics) de LH par rapport à la condition sans injection de liquide.

Cas avec injection de cortisol

Lors de l'injection de cortisol, on n'observe aucune modification de la sécrétion (ni de la concentration moyenne, ni de l'amplitude, ni de fréquence des pics) de GnRH par rapport à la condition sans cortisol. Conclusion : Le cortisol n'affecte pas la sécrétion de GnRH par l'hypothalamus.

Lors de l'injection de cortisol, on observe une diminution de la concentration moyenne en LH passant de 10 ng.mL^{-1} à 5 ng.mL^{-1} au bout de 6 heures, une diminution de l'amplitude des pics de LH passant de 5 ng.mL^{-1} à moins de 2 ng.mL^{-1} et une perte de la pulsatilité. Conclusion : Le cortisol abolit la pulsatilité de la sécrétion de LH et affecte également sa concentration moyenne.

Remarque : On note une différence dans la fréquence et l'amplitude des pics de GnRH et de LH entre les 2 cas étudiés ici qui correspondent à 2 brebis différentes. Il s'agit d'une bonne illustration de la variabilité inter-individuelle. La fréquence des pics ne peut donc pas être comparée entre les 2 graphiques.

Réponse à la question

Dans le cycle sexuel féminin, une sécrétion pulsatile de GnRH par l'hypothalamus induit une sécrétion pulsatile de LH par l'hypophyse. Lorsque la sécrétion de LH dépasse un certain seuil (dénommé pic de LH), il y a ovulation : l'ovocyte II est expulsé du follicule de De Graaf dans les trompes. Il pourra alors être fécondé s'il rencontre un spermatozoïde. Pendant la phase lutéale, la sécrétion de LH redevient pulsatile. Enfin, l'axe hypothalamo-hypophysaire est sous contrôle d'une boucle de rétrocontrôle négative en dehors de la phase ovulatoire et positive pendant la phase pré-ovulatoire impliquant les œstrogènes.

Les documents permettent de démontrer que chez la brebis, le stress provoque une sécrétion d'ACTH et de cortisol, et on peut même affirmer d'après d'autres données que c'est la sécrétion d'ACTH qui induit la sécrétion de cortisol par la cortico-surrénale. En conditions stressantes, le cortisol est responsable de l'abolition de la sécrétion de LH. Si le cortisol abolit la sécrétion de LH :

- en phase pré-ovulatoire, alors le pic de LH ne pourra se produire et il n'y aura donc pas d'ovulation ;
- en phase folliculaire, la baisse de la concentration de LH entraînera une baisse de la concentration d'œstrogène nécessaire pour le développement folliculaire et le développement utérin au cours du cycle, mais également probablement une augmentation de la sécrétion de GnRH (à long terme) – la sécrétion de GnRH étant régulée négativement par les œstrogènes.

En conclusion, le stress aura donc un effet négatif sur la reproduction et la fertilité par l'intermédiaire du cortisol sécrété.

Exercice 8

Doc. 1

Le cortisol et la dexaméthasone ont la même structure chimique, à savoir 4 cycles plutôt hydrophobes et quelques groupements hydrophiles. S'ils ont la même structure chimique, ils pourraient avoir les mêmes fonctions physiologiques en se remplaçant l'un l'autre (mais peut-être avec une affinité ou des efficacités différentes).

Doc. 2

On observe un nombre de cellules par thymus plus faible lorsque celui-ci a été traité avec $1 \mu\text{g.mL}^{-1}$ de dexaméthasone par comparaison avec le cas contrôle. La diminution est voisine de 70 % passant de 130.10^6 cellules/thymus en condition contrôle à 35.10^6 cellules/thymus avec un traitement à la dexaméthasone. Conclusion : La dexaméthasone inhibe le développement des lymphocyte T dans le thymus : soit ils ne se multiplient pas, soit ils meurent. Il s'agit d'un effet immunosuppresseur.

Doc. 3

On étudie l'effet de la dexaméthasone directement sur des cellules de thymus en les incubant dans une solution contenant ou non de la dexaméthasone. On observe qu'en présence de dexaméthasone, la taille du marquage fluorescent est plus faible ($5\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre contre $10\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre en condition contrôle), mais le nombre de points marqués par champ d'observation est plus important (13 contre 6 en conditions contrôle). La diminution du marquage étant associée à une dégradation de l'ADN, on peut penser que le traitement à la dexaméthasone induit une dégradation de l'ADN des cellules du thymus, ce qui pourrait être responsable de leur mort.

Ce document permet de consolider une des hypothèses proposées à l'issue de l'étude du document 2 : l'effet immunosuppresseur de la dexaméthasone passerait par la mort des cellules du thymus (les lymphocytes T)

Doc. 4

En l'absence de bactéries, les macrophages ne sont pas activés, la production de $\text{TNF}\alpha$ (médiaiteur de l'inflammation) est nulle. En présence de bactéries (et en absence de traitement à la dexaméthasone), la production de $\text{TNF}\alpha$ avoisine les 20 ng.mL^{-1} . C'est le point de référence.

On teste ensuite l'effet d'un gradient de concentration en dexaméthasone sur la production de $\text{TNF}\alpha$ par les macrophages. On constate que plus la concentration en dexaméthasone appliquée augmente, plus la production de $\text{TNF}\alpha$ diminue jusqu'à atteindre un seuil à 10^{-7} mol/L pour lequel la production de $\text{TNF}\alpha$ ne diminue plus en dessous de 5 ng.mL^{-1} .

Le $\text{TNF}\alpha$ étant un médiateur de l'inflammation, la diminution de sa concentration signe un effet anti-inflammatoire de la molécule utilisée. La dexaméthasone est donc une molécule aux propriétés anti-inflammatoire.

Réponse à la question

Les doc. 2 et 3 montrent que la dexaméthasone a un effet immunosuppresseur : elle entraîne la mort des cellules du thymus, dont les lymphocytes T.

Le doc. 4 montre que la dexaméthasone a un effet anti-inflammatoire : elle diminue la production de médiateurs de l'inflammation comme le $\text{TNF}\alpha$ par les macrophages.

La dexaméthasone ayant une structure proche du cortisol (doc. 1), on peut supposer que son mode d'action est similaire à celui du cortisol. En effet, on sait que le cortisol a un effet anti-inflammatoire et immunosuppresseur : il diminue les capacités d'activation des lymphocytes ; il diminue la production de molécules activatrices comme les cytokines par les lymphocytes $T_{\text{CD}4}$; il diminue le nombre de lymphocytes $T_{\text{CD}4}$ et B.

Chapitre 20. L'organisme débordé dans ses capacités d'adaptation

Le chapitre 20 aborde la notion de mal-adaptation de l'organisme, lorsque le stress se prolonge sur le long terme et que l'organisme est débordé. Il s'inscrit dans la continuité chapitre 19 qui posait les bases de stress aigu. Avec cette thématique d'actualité, c'est l'occasion pour l'élève de comprendre les effets du stress chronique sur l'organisme humain et les moyens d'y remédier.

Le chapitre présente d'abord l'effet du stress chronique sur la structure et le fonctionnement du cerveau (**unité 1**), puis les moyens de lutter contre les pathologies engendrées grâce une thérapie médicamenteuse, les benzodiazépines (**unité 2**) ou via des alternatives non médicamenteuses (**unité 3**).

Thème 5 Corps humain et santé Comportements et stress : vers une vision intégrée de l'organisme	
Connaissances	Capacités, attitudes
<p>Si les agents stresseurs sont trop intenses ou si leur action dure, les mécanismes physiologiques sont débordés et le système se dérègle. C'est le stress chronique. > Unité 1</p> <p>Il peut entraîner des modifications de certaines structures du cerveau, notamment du système limbique et du cortex préfrontal. Cette forme de plasticité, dite mal-adaptative, se traduit par d'éventuelles perturbations de l'attention, de la mémoire et des performances cognitives. > Unité 1</p> <p>Ces dérèglements engendrent diverses pathologies qui sont traitées par des médicaments dont l'effet vise à favoriser la résilience. La prise de ces médicaments, comme les benzodiazépines dans le cas de l'anxiété, doit suivre un protocole rigoureux afin de ne pas provoquer d'autres perturbations notamment une sédation et des troubles de l'attention. > Unité 2</p> <p>Certaines pratiques non médicamenteuses sont aussi susceptibles de limiter les dérèglements et de favoriser la résilience du système. Chaque individu est différent face aux agents stresseurs, le stress intégrant des dimensions multiples et liées. > Unité 3</p>	<p>Interpréter des données cliniques et expérimentales montrant les effets du stress chronique sur la structuration des voies neuronales. > Unité 1</p> <p>Interpréter des données médicales et d'imagerie montrant les effets possibles du CRH sur l'amygdale et l'hippocampe à long terme. > Unité 1</p> <p>Recenser et exploiter des informations sur le mode d'action des benzodiazépines pour montrer leur activation des récepteurs à GABA (un neurotransmetteur inhibiteur du système nerveux) et leur effet myorelaxant et anxiolytique. > Unité 2</p> <p>Utiliser un logiciel de modélisation moléculaire pour illustrer la complémentarité entre une molécule et son récepteur. > Unité 2</p> <p>Concevoir et/ou mettre en œuvre une démarche de projet visant à élaborer un protocole pour tester l'effet de certaines pratiques alternatives (ex : mouvements respiratoires) à court ou long terme, en analyser les limites et comparer à un corpus de données scientifiques. > Unité 3</p>

Compétences travaillées et quelques capacités associées	Place dans le chapitre
Pratiquer des langages Utiliser un logiciel de traitement de données Communiquer à l'écrit sous forme d'un texte Communiquer à l'écrit par un schéma Communiquer dans un langage scientifiquement approprié	<ul style="list-style-type: none"> • Unité 2 • Unité 2 • Unité 1 • Unités 1 à 3
Pratiquer des démarches scientifiques Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution Interpréter des résultats expérimentaux et en tirer des conclusions Observer, expérimenter, calculer Synthétiser des informations provenant de plusieurs documents pour reconstruire un modèle ou un système biologique	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 3 • Unités 1 à 3 • Unités 1 à 3 • Unités 1 à 2
Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre Identifier, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources Identifier et choisir des outils et des techniques pour garder traces de ses recherches	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 1 à 3 • Unités 1 à 3
Adopter un comportement éthique et responsable	<ul style="list-style-type: none"> • Unités 2 et 3

Choix pédagogiques

Unité 1

> La notion de stress dans le langage courant fait souvent référence à ce que l'on appelle le stress chronique. Cette première unité permettra de définir ce qu'est le stress chronique, ses manifestations et les modifications structurales et fonctionnelles qu'il engendre sur le système nerveux central

> Le **document 1** présente un exemple de stress chronique : le syndrome de stress post-traumatique. Les items du questionnaire proposé et le pourcentage de réponse dans chaque catégorie permet d'évaluer qualitative l'état psychique des élèves concernés. Les résultats corroborent la définition de syndrome de stress post-traumatique donnée dans la légende. Le même questionnaire posé neuf mois après l'événement traumatisant permet d'évaluer l'état de stress de l'ensemble du groupe et d'identifier ceux pour qui le stress est chronique, c'est-à-dire persistant sur le long terme. Ce premier document permet d'insister sur cette notion. On note une diminution des cas de stress post-traumatique sévère à moyen et une augmentation de ceux de faible intensité. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions du chapitre 19 et la résilience abordée dans l'unité 5.

> Le **document 2** complète le précédent en présentant une palette exhaustive des symptômes liés au stress chronique. Ils peuvent être classés en trois catégories : symptômes physiques, symptômes de type mental-émotionnel, symptômes comportementaux. Il convient d'insister sur la diversité des symptômes et leurs combinaisons. La légende précise la définition du stress chronique par rapport au stress aigu et la notion de plasticité mal-adaptative qui est explicitement au programme. On réintroduit une notion déjà vue au chapitre précédent : les symptômes sont les mêmes quel que soit le stimulus stressant à l'origine du stress. Enfin, la légende présente quelques situations pouvant conduire au stress chronique.

> Le **document 3** présente les premières modifications structurales induites par le stress chronique à partir de données d'imagerie cérébrale. Ce sera la seconde occasion pour les élèves de se familiariser avec la technique et l'anatomie du cerveau étant donné que les mêmes structures vont être étudiées. Les ressources numériques sur l'IRM peuvent également être utilisées à cette occasion. La notion de substance grise est rappelée dans la légende, tout comme les fonctions de trois composants du système limbique. Les résultats présentés utilisent une échelle colorimétrique continue qui est le résultat du rapport suivant :

densité en substance grise des individus ayant subi un événement traumatisant
densité en substance grise des individus témoins

Lorsque le rapport est égal à 1, il n'y a pas de différence entre l'individu test et le témoin, la couleur correspond au noir. Si la densité en substance grise est plus élevée chez l'individu ayant subi un événement traumatisant, la couleur tend vers les teintes chaudes : rouge puis jaune puis blanc. Si la densité en substance grise est moins élevée chez l'individu ayant subi un événement traumatisant, la couleur tend vers les teintes froides : bleu.

On déduit des résultats présentés que l'hippocampe, l'amygdale et le cortex frontal médian, trois composants du système limbique, présentent une densité en substance grise plus élevée. La substance grise correspondant aux noyaux cellulaires, on en déduit qu'il y a plus de neurones dans ces aires cérébrales chez un sujet ayant subi un stress post-traumatique.

Remarque. L'idée de rapport présentée ici de manière simplifiée est très couramment utilisée en biologie sous un autre nom : la normalisation. C'est un concept clef de représentation des résultats qui peut être ici introduit en fonction de ce que souhaite développer l'enseignant.

> Après une vision à l'échelle de l'organe, le **document 4** aborde les effets du stress chronique à l'échelle cellulaire. Les expériences sont réalisées sur des rats suivant un protocole qui sera retrouvé

dans de nombreux documents ultérieurement. La morphologie des neurones de l'hippocampe est schématisée à gauche dans le cas témoin et dans le cas stressé. Ces schémas permettront de réaliser une première analyse qualitative. Les paramètres morphologiques sont alors quantifiés pour la partie apicale et basale de manière séparée. La longueur maximale des dendrites apicales est significativement réduite chez les individus stressés par rapport au témoin ; la longueur maximale des dendrites basales n'est que très faiblement réduite. Des résultats similaires sont constatés pour leur ramification : une diminution importante de la ramification des dendrites apicales ; et une faible réduction de la ramification des dendrites basales. Pour généraliser ces résultats, la légende précise que des modifications comparables peuvent être observées dans le cortex préfrontal et l'amygdale. Il est à noter que les modifications affectent également les dendrites mais ne sont pas forcément de la même nature ou de la même intensité. Enfin, d'un point de vue fonctionnel, on admettra que la transmission synaptique entre ces neurones est également modifiée.

Remarque. Dans une optique de travailler la démarche expérimentale, il pourra être intéressant de remarquer que le document 4 permet de bien faire la différence entre : (1) une analyse qualitative à partir d'une figure/schéma représentatif de ce qui peut être observé ; (2) une analyse quantitative de quelques paramètres qui semblent pertinents compte-tenu de l'analyse qualitative et qui ont été mesurés/comptés et représentés sous forme d'un graphique. La quantification permet également d'introduire une dimension statistique avec des barres d'erreur.

> Le **document 5** fait le lien entre stress chronique et production de CRH et d'ACTH. Ce document, associé au document 6, permettra à l'élève de comprendre le mécanisme à l'origine des différences morphologiques constatées dans le document 4. En cas de stress chronique, la concentration en CRH hypothalamique augmente d'un facteur 2 environ et celle d'ACTH sanguine d'un facteur 1,25. Les différences observées sont significatives. Le stress chronique stimule donc l'axe hypothalamo-hypophysio-adrenocorticotrope.

Remarques. 1. À noter que dans cette expérience, le stimulus stressant sur le long terme est différent des documents précédents. 2. La concentration en CRH est normalisée par rapport à la quantité totale de protéines extracellulaires dans l'hypothalamus.

> Le **document 6** est la suite logique du précédent. Il présente la morphologie de neurones de l'hippocampe cultivés *in vitro* en présence ou en absence de CRH et observés au microscope à fluorescence. L'élève devra analyser qualitativement les deux images proposées par comparaison. Il pourra s'appuyer sur le document 4 dans lequel une étude analogue a été réalisée sur des neurones hippocampiques en conditions *in vivo*. Dans ce document, l'analyse quantitative (graphique) est volontairement omise pour insister sur l'importance de l'analyse d'image. Toutefois, les données correspondantes sont disponibles dans le manuel numérique. L'enseignant pourra les utiliser s'il le souhaite. On pourra déduire de ce document que l'augmentation de la concentration en CRH (*in vitro*) induit une diminution de la longueur et de la ramification des dendrites.

> Le **document 7** est un schéma présentant les modifications des mécanismes régulant la sécrétion de CRH au niveau de l'hypothalamus. Le schéma est complexe et s'appuie sur les bases anatomiques et fonctionnelles vues dans le chapitre précédent. L'élève pourra s'y référer en cas de besoin. Un zoom est réalisé sur les neurones du NPV. Au niveau de sa connexion avec l'axone du neurone du NPO, la synapse est GABAergique, ce qui signifie qu'elle implique un neurotransmetteur inhibiteur le GABA. L'introduction du récepteur au GABA permettra de comprendre l'action des benzodiazépines dans l'unité suivante. En plus de cette influence GABAergique, les neurones du NPV possèdent des récepteurs au cortisol qui exercent un rétrocontrôle négatif (voir chapitre 19).

En cas de stress chronique, l'expression des récepteurs au cortisol diminue (il y a moins de récepteurs au cortisol au niveau de la membrane) ; de même l'expression et l'activité des récepteurs au GABA diminue, donc l'action inhibitrice est amoindrie. La combinaison de ces deux effets concourent à une augmentation de la sécrétion de CRH de 40 à 60 % par rapport à la normale. Ce document donne l'élément manquant pour faire le lien entre le stress chronique et les modifications morphologiques.

Remarque. Il conviendra de s'assurer que ce document est bien compris et que l'élève fait bien le lien avec le stress aigu du chapitre 19 et les différences présentées ici.

> Le **document 8** fait le lien entre altération de la morphologie neuronale (connexions synaptiques et développement) et conséquences comportementales, psychiques ou émotionnelles. L'élève devra mettre ce document en relation avec les symptômes présentés dans les documents 1 et 2.

Unité 2

> Les pathologies liées au stress chronique peuvent être traitées de différentes manières. L'unité 2 présente une catégorie de médicaments pouvant remplir cette fonction en traitant notamment l'état anxieux. L'explication de son mode d'action s'appuiera sur les mécanismes présentés dans l'unité 1.

> Le **document 1** permet une mise en contexte de l'unité avec la présentation de la famille de molécules étudiée : les benzodiazépines. La légende du document permet de définir ce que sont les benzodiazépines et la figure donne quelques chiffres clés.

> Le **document 2** est une première étape vers l'élucidation du mode d'action des benzodiazépines. On représente le récepteur au GABA introduit dans l'unité précédente avec les sites de fixation des deux molécules d'intérêt : (1) le GABA, ligand naturel du récepteur et neurotransmetteur ; (2) les benzodiazépines (ici l'alprazolam) étudiés dans cette unité en tant que médicament. Afin de mieux appréhender la structure du récepteur et son interaction avec ces deux molécules, une activité numérique utilisant le logiciel Libmol est proposée. L'élève pourra ainsi manipuler la molécule dans les trois dimensions de l'espace.

Le récepteur au GABA est inséré dans la membrane du neurone post-synaptique. Le GABA et les benzodiazépines possèdent des sites de liaison distincts sur le récepteur, situés tous deux sur la partie extracellulaire. Le GABA se fixe sur un site de liaison localisé sur la sous-unité β . Les benzodiazépines se fixent sur un site situé à l'interface entre la sous-unité α et la sous-unité γ . Enfin, la légende précise le mode de fonctionnement du récepteur : il s'agit d'un canal à ions Cl^- . L'ouverture du canal permet l'entrée des ions Cl^- , ce qui entraîne une hyperpolarisation membranaire et une inhibition du neurone.

Remarque. La molécule disponible sous Libmol ne comprend pas uniquement le récepteur au GABA et ses 2 ligands mais également une chaîne supplémentaire (megobody Mb38). Pour plus de clarté, celle-ci a été éliminée sur l'image proposée dans le manuel et dans les pdf supplémentaires fournis. Le fichier source (.txt) est également fourni en ressource numérique à destination exclusive de l'enseignant. Lisible grâce au logiciel Raswin, la molécule pourra être présentée en version informatique tel que dans le manuel.

> Le **document 3** complète ces informations en présentant l'effet des benzodiazépines sur le récepteur au GABA. L'expérience est réalisée *in vitro* sur des cellules possédant un récepteur au GABA en utilisant un dispositif d'électrophysiologie (voir chapitre 19 pour le principe de fonctionnement). L'intensité du courant engendré par le flux de Cl^- est enregistrée en fonction de la concentration en GABA ajoutée (l'échelle des abscisses est logarithmique). Plus la concentration en GABA extracellulaire est élevée, plus l'intensité du courant est élevée. Cela signifie qu'il y a une relation dose-réponse en fonction de la concentration en GABA. L'ajout de Diazepam conduit à un courant d'intensité plus élevée pour une même concentration en GABA. Ce résultat est retrouvé quelque soit la concentration en GABA utilisée entre 1 et 1000 μM . On peut en déduire que les benzodiazépines potentialisent (accentuent) l'effet inhibiteur du GABA.

Pour appréhender de manière intégrée l'effet des benzodiazépines, l'élève devra alors faire appel aux connaissances vues dans l'unité 1, notamment la localisation des récepteurs au GABA, leur importance dans l'intégration des signaux stressants et les modifications engendrées par le stress chronique.

> Le **document 4** présente trois des effets pharmacologiques principaux des benzodiazépines. Il s'agit d'expériences comportementales réalisées sur des animaux (singes ou rats). C'est une démarche différente de celles présentées ailleurs dans ce chapitre, elle pourra être soulignée.

- Dans l'expérience A, des doses variables de deux benzodiazépines anxiolytiques (Diazépam et Zolpidem) sont injectées à des singes. On teste alors leur capacité à fléchir la jambe pour mesurer le niveau de relaxation musculaire et leur capacité à se déplacer seul pour mesurer l'effet sédatif. Pour le fléchissement de la jambe, l'expérience est réalisée 3 fois de suite. Un expérimentateur étend la jambe du singe et évalue la flexion retour : un score de 0 est attribué si le singe plie la jambe normalement, 1 si le fléchissement présente un délai ou est incomplet, 2 si aucune flexion n'est observée. En absence d'injection de benzodiazépines, le score est fixé à 0, le fléchissement de la jambe est normal. Plus la quantité de benzodiazépines injectées est élevée plus le score est élevé et l'effet myorelaxant prononcé. L'effet est visible dès 1 mg/kg pour le Diazépam et seulement à partir de 5 mg/kg pour le Zolpidem. Pour une concentration donnée, l'effet du Diazépam est toujours plus élevé que celui du Zolpidem.
- Pour l'effet sédatif, l'attitude globale des singes et la persistance de leur déplacement dans l'espace sont évalués quantitativement à partir d'enregistrements vidéo par trois expérimentateurs indépendants. Plus le score est faible, plus la sédation est forte. En absence d'injection de benzodiazépines, le score est le plus élevé à environ 10. Plus la quantité de benzodiazépines injectées est élevée plus le score est faible et l'effet sédatif prononcé. L'effet est visible dès 1 mg/kg pour le Diazépam et seulement à partir de 10 mg/kg pour le Zolpidem. Pour une concentration donnée, l'effet du Diazépam est toujours plus élevé que celui du Zolpidem.

Remarque. Ce document suggère une information supplémentaire, non démontrée dans le document 3 : l'effet des benzodiazépines est dépendant de la dose administrée. On l'observe ici à une échelle physiologique et comportementale, il est fort probable que cela se traduise par un effet similaire à l'échelle moléculaire sur le flux de Cl⁻ des récepteurs au GABA.

- Dans l'expérience B, des benzodiazépines (Midazolam) sont injectées dans l'amygdale de rats. Leur degré d'anxiété est alors mesuré grâce à un dispositif classique dit en « + » surélevé. Un lien vidéo montrant le déroulement d'une telle expérience avec ses différentes étapes est proposé dans les ressources numériques. Il ne s'agit pas d'une expérience sur les benzodiazépines et leur effet sur le stress, mais le déroulement de l'expérience est en tous points identiques. La vidéo est en anglais.

Le rat se déplace sur une plateforme peu large dont une partie est renfermée sur chaque coté, constituant une zone dite rassurante, et une partie est totalement ouverte sur la salle d'expérimentation, constituant une zone anxiogène. Un enregistrement vidéo du rat est réalisé et le temps passé dans chaque zone est quantifié. En absence d'injection de benzodiazépines, le temps passé dans la zone ouverte (« anxiogène ») est estimé à environ 20 %. L'injection de benzodiazépines dans l'amygdale centrale entraîne une augmentation du temps passé dans la zone ouverte d'environ 10 %. On peut en conclure que le niveau d'anxiété du rat est plus faible dans ces conditions. L'injection dans l'amygdale basolatérale entraîne une augmentation du temps passé dans la zone ouverte d'environ 20 %, soit d'un facteur 2. Le rat est moins anxieux lorsqu'il a reçu des injections de benzodiazépines. L'effet est plus marqué lorsque l'injection a lieu dans l'amygdale basolatérale.

> Le **document 5** complète le précédent en présentant quelques effets secondaires des benzodiazépines. Un premier graphique présente quelques effets des benzodiazépines sur les performances cognitives de patients humains traités. Pour chaque tâche, on évalue si les patients traités aux benzodiazépines la réalisent mieux (score positif) ou moins bien (score négatif) que des patients non traités. Pour toutes les tâches testées, les patients traités la réalisent toujours moins bien avec un effet plus ou moins prononcé en fonction de la tâche considérée. La performance motrice ou la mémoire de travail semblent être les capacités cognitives les moins affectées. La psychomotricité, le temps de réaction ou la capacité de résolution de problème et de concentration semblent plus affectés. Il est à noter que les barres d'erreur sont assez grandes, témoignant d'une forte variabilité

interindividuelle : tous les patients ne répondent pas de la même manière aux benzodiazépines ou tous les patients ne présentent pas initialement le même niveau de capacités cognitives.

Le tableau est une synthèse d'une étude plus large réalisée par l'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM) fondée sur la base nationale de pharmacovigilance. Un aparté pourra être réalisé à l'occasion de l'étude de ce document pour présenter l'ANSM, son rôle et ce qu'est une base de pharmacovigilance. Des effets secondaires affectant le système nerveux (somnolence, coma, convulsions ou amnésie) sont rapportés dans 23 % des cas, des effets psychiatriques sont également relevés (confusion, hallucinations) et des chutes notamment chez les sujets âgés. Seuls les effets secondaires graves sont mentionnés ici. L'ANSM rappelle également que les effets décrits dans le tableau sont exacerbés lorsque la prise de benzodiazépines est associée à d'autres médicaments. La conclusion de l'étude est présentée dans la légende : « *Les benzodiazépines bien utilisées constituent des médicaments indispensables dans l'arsenal thérapeutique.* »

De ce document, l'élève devra en comprendre que les benzodiazépines (comme beaucoup de médicaments) n'ont pas que des effets bénéfiques sur la santé (voir document 4), mais également des effets indésirables, dits effets secondaires, qui peuvent avoir des conséquences graves sur l'état de santé à plusieurs niveaux (physiologique, psychique, cognitif, physique). Tous les individus ne sont pas égaux face à ces effets, comme en témoigne la variabilité des résultats présentés dans ce document. Il convient donc d'utiliser ces médicaments à bon escient et selon un usage correct, c'est la teneur de la conclusion de l'ANSM. Cette réflexion menée ici sur les benzodiazépines pourra être généralisée à l'ensemble des médicaments dans le cadre de l'éducation à la santé.

ANSM et pharmacovigilance

- L'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM) est placée sous la tutelle du Ministère de la santé. Elle garantit la sécurité des produits de santé (médicaments, produits biologiques, dispositifs médicaux) tout au long de leur cycle de vie, depuis les essais initiaux jusqu'à la surveillance après autorisation de mise sur le marché.
- La pharmacovigilance est la surveillance des médicaments et la prévention du risque d'effet indésirable résultant de leur utilisation, que ce risque soit potentiel ou avéré. Elle repose sur la notification spontanée des effets indésirables par les professionnels de santé et la mise en place d'enquêtes ou d'études pour analyser les risques.

> Le **document 6** complète le précédent en présentant un extrait de la notice d'utilisation d'une benzodiazépine, le Diazépam, et en soulignant les mises en garde et précautions à prendre. Le lien vers la notice complète est disponible en ressource numérique. Il permet une approche peut-être plus concrète des effets secondaires indésirables et plus proche du vécu des élèves. Il pourra être abordé avant le document 5.

Unité 3

> Les médicaments ne sont pas la seule manière de traiter les pathologies liées au stress chronique. L'unité 3 présente quelques méthodes alternatives, non médicamenteuses. La liste n'est pas exhaustive mais présente une palette large et diversifiée des méthodes existantes. Dans cette partie, le programme préconise d'adopter une démarche de type projet : « *Concevoir et/ou mettre en œuvre une démarche de projet visant à élaborer un protocole pour tester l'effet de certaines pratiques alternatives (ex : mouvements respiratoires) à court ou long terme, en analyser les limites et comparer à un corpus de données scientifiques.* » Les documents proposés ici ne devront pas être envisagés de manière classique, mais plus comme des supports de réflexion ou une base de données pour investiguer ces méthodes.

> Les **documents 1 et 2** présentent la thérapie dite EMDR : Eye movement desensitization and reprocessing, une méthode de méditation. Un protocole simplifié d'une séance d'EMDR est présenté dans le document 1 ; un descriptif plus détaillé est disponible en version numérique. Le document 2 présente les résultats du traitement d'un syndrome de stress post-traumatique par EMDR. Avec une thérapie placebo, le niveau de peur quantifié à la vue d'images effrayante est identique avant et après thérapie, il est d'environ 30 UA. Avant une thérapie EMDR, le niveau de peur est également d'environ 30 UA alors qu'après thérapie, il est d'environ 2-3 UA. Même si les barres d'erreur sont ici très grandes, les différences observées sont significatives. La thérapie EMDR permet de réduire significativement le niveau de peur des sujets atteints de syndrome de stress post-traumatique traités. Des images d'IRM accompagnent la quantification. L'élève pourra à nouveau s'entraîner à interpréter des données d'imagerie cérébrale.

> Le **document 3** présente l'effet de l'activité physique sur l'état dépressif de rats. Dans une première expérience, le document permet de faire le lien entre stress et taux de BDNF de l'hippocampe. En cas de stress, le taux de BDNF chute d'environ 25 %. Un traitement préalable par des anti-dépresseur permet de maintenir voire d'avoir un niveau de BDNF supérieur à la normale (120 %). Une activité physique préalable montre les mêmes effets. Une activité physique aurait des effets similaires à la prise d'anti-dépresseurs et permet de maintenir un taux de BDNF hippocampique similaire voire supérieur à la normale.

Dans une seconde expérience, on induit un état dépressif chez des rats et on teste leur comportement d'évitement d'un léger choc électrique. On quantifie deux paramètres : le nombre d'évitements sur l'ensemble des tests et le temps de latence entre le choc électrique et le déplacement du rat. En absence de pré-conditionnement, c'est-à-dire en absence d'induction d'un état dépressif, avec ou sans ajout de BDNF, le nombre d'évitements et le temps de latence sont similaires. Avec un pré-conditionnement, et sans ajout de BDNF, le nombre d'évitements chute de 50 % et le temps de latence triple : les rats s'écartent moins du choc qui leur est imposé, ils sont dans un état dépressif. L'injection de BDNF après le pré-conditionnement permet de restaurer la valeur initiale des paramètres comportementaux : nombre d'évitements et temps de latence. Le BDNF permet donc de restaurer le phénotype comportemental, il aurait un effet antidépresseur.

Après l'analyse de ces deux expériences, l'élève devra faire le lien pour expliquer l'effet de l'activité physique. Le stress entraîne une chute du taux de BDNF. Lors d'un conditionnement stressant (immobilisation et chocs électriques) comme présenté dans la seconde expérience, on peut supposer que le taux de BDNF hippocampique chute et on observe un état dépressif chez le rat. L'ajout de BDNF permet de restaurer un état normal et la première expérience nous apprend que la restauration d'un taux « normal » de BDNF peut être assurée par des antidépresseurs ou de l'activité physique.

Le document est relativement complexe en termes d'analyse. Cependant il s'agit d'une très belle occasion de faire le lien entre des aspects moléculaires et des aspects comportementaux. La légende ajoute quelques compléments sur l'importance de l'activité physique dans le traitement des troubles dépressifs.

> Le **document 4** met en lumière une troisième méthode alternative : la méditation de pleine conscience (MBSR). Le diagramme représente les différentes zones du cerveau impliquées dans les mécanismes méditatifs et leurs effets. L'élève pourra en déduire l'effet de la méditation sur les différents symptômes liés au stress chronique (unité 1, doc. 2) et leur lien avec le système limbique (unité 1, doc. 8).

> Le **document 5** complète le précédent en présentant les résultats d'une étude menée sur 300 patients présentant un stress ou une maladie chronique et ayant suivi un protocole de MBSR. Différents paramètres ont été mesurés avant et après le protocole de MBSR. L'élève pourra noter que les paramètres choisis rejoignent ceux présentés dans l'unité 1. L'étude globale permet de montrer une amélioration des capacités cognitives et comportementales après une MBSR. Dans le détail, on note une diminution de l'état de stress perçu par le sujet ou déduit d'une analyse médicale ; une amélioration de l'attention, de la conscience, du contrôle de soi, des capacités d'adaptation et d'autorégulation. Les données sont présentées en unités arbitraires et avec une marge d'erreur. L'élève pourra remarquer que, quel que soit le paramètre considéré, les barres d'erreur se recoupent, les différences présentées ne sont pas significatives mais témoignent plutôt d'une tendance qui est concordante pour l'ensemble des paramètres d'où la conclusion globale qui peut être tirée.

> Le **document 6** vient en appui des documents 4 et 5 avec l'interview de François Vialatte. Il propose une vision légèrement différente de la situation sous forme d'un équilibre entre homéostasie et allostasie. Ses études montrent que la méditation permet une amélioration significative de la gestion du stress. À noter ici que la méditation aurait un impact bénéfique sur la gestion du stress chronique mais également du stress aigu (chapitre 19), ce qui est corroboré par d'autres études. François Vialatte revient sur un second point important : la méditation est une pratique qui s'apprend et qui se travaille. Et plus l'apprentissage a débuté jeune, plus les bénéfices sont importants car le cerveau de l'enfant est plus plastique. L'élève pourra ainsi faire le lien avec le document 4 qui montre l'effet d'une pratique méditative sur différentes zones du cerveau.

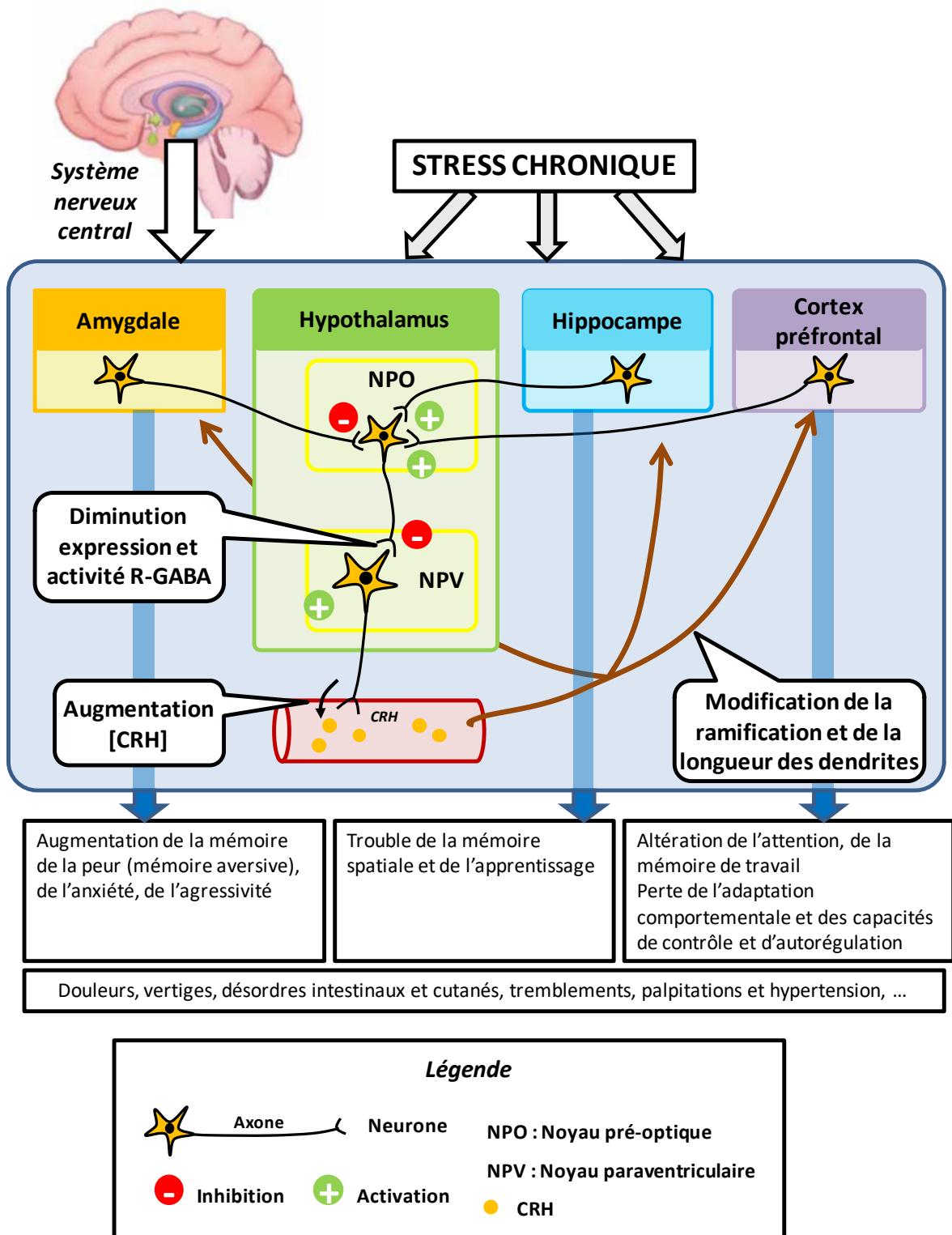
Corrigés des parcours tâche complexe

Unité 1

> Éléments de correction

Le format attendu est un schéma bilan synthétique présentant l'effet du stress chronique sur l'organisme. Ce schéma devra présenter la multiplicité des effets mais aussi les mécanismes physiologiques à l'origine de ces effets. Pour construire le schéma, l'élève pourra prendre comme base celui présenté dans le document 7 pour le compléter. Il faudra ajouter : (1) les éléments d'intégration du stimulus stressant au niveau du système limbique vu dans le chapitre 19 ; (2) l'augmentation de la sécrétion de CRH et d'ACTH ; (3) l'effet rétroactif du CRH sur la morphologie des neurones du système limbique (seul l'hippocampe présenté ici) ; (4) le lien entre ces modifications morphologiques et fonctionnelles et les symptômes observées. Le schéma devra être rendu fonctionnel en intégrant les informations collectées à partir des documents 4, 5 et 6.

Une idée suggérée ici mais non développée pourra émerger : l'affaiblissement de la boucle de rétroaction négative médiée par le cortisol. Son rôle important a été vu à la fin du chapitre 19. On voit ici que, dans le cas du stress chronique, cette boucle est totalement dépassé.



> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Schéma	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée <ul style="list-style-type: none"> • Certains documents ne sont pas exploités • Rendu partiellement schématique 	Démarche pertinente mais maladroite <ul style="list-style-type: none"> • Manque de synthèse des différents documents dans le schéma • schéma non fonctionnel 	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents. <ul style="list-style-type: none"> • Manque de précisions sur les mécanismes • Schéma n'intégrant pas les informations fonctionnelles • Schéma pas assez précis 	Complets et précis	
Communication Schéma	Non conforme	Il y a un schéma	Le schéma n'est pas précis ou pas suffisamment légendé ou pas assez propre	Le schéma correspond aux attentes (précis, légendé, propre)

Unité 2

Tâche complexe

> Éléments de correction

Le format attendu est un texte synthétique présentant à la fois le mode d'action des benzodiazépines et les limites de leur utilisation. Le texte pourra s'organiser en 3 parties : une sur le mode d'action, une sur les effets et une dernière sur les effets secondaires et les limites. Afin d'expliquer précisément le mode d'action des benzodiazépines sur le traitement du stress chronique, l'élève devra faire le lien avec les données vues dans l'unité 1.

Voici une proposition de texte :

Le stress chronique induit un dérèglement de la boucle de régulation impliquant le complexe hypothalamo-hypophysaire et les glandes surrénales. Les benzodiazépines sont des molécules à usage pharmacologique utilisées pour traiter les pathologies liées au stress chronique.

Mode d'action des benzodiazépines

En cas de stress chronique, l'expression et l'activité des récepteurs au GABA (notamment au niveau de l'hypothalamus) est fortement diminuée. Le signal inhibiteur médié par ce récepteur au niveau du noyau paraventriculaire est réduit, conduisant à une sécrétion accrue de CRH, et en cascade, des modifications structurales et fonctionnelles du système nerveux à l'origine de pathologies psychiques, cognitives et comportementales.

Les benzodiazépines se fixent sur la partie extracellulaire des récepteurs au GABA sur un site différent de celui du GABA (doc. 2). Elles augmentent alors l'intensité du flux entrant d'ions Cl⁻ : elles potentialisent l'effet du GABA (doc. 3). Leur action vient donc compenser la diminution du nombre et de l'activité des récepteurs au GABA et rétablir l'action inhibitrice limitant la sécrétion de CRH.

Effets des benzodiazépines anxiolytiques

Les benzodiazépines anxiolytiques ont un effet myorelexant (permettant un relâchement des muscles), un effet sédatif (apaisant) et un effet anxiolytique (qui diminue l'anxiété). Ces différents effets ont été mis en évidence grâce à des tests comportementaux réalisés sur des animaux de laboratoire (doc. 4). Leur effet est croissant avec la dose de benzodiazépine injectée. Les benzodiazépines agissent notamment sur les récepteurs au GABA du système limbique (hypothalamus et amygdale).

Effets secondaires des benzodiazépines

Si les benzodiazépines permettent de réduire l'anxiété, elles présentent également de nombreux effets secondaires affectant le système nerveux, les capacités cognitives, physiques ou psychiques des patients les consommant comme la somnolence, des convulsions, un état confusionnel ou des hallucinations, une faiblesse musculaire et de la fatigue pouvant entraîner des chutes chez les personnes âgées. Ces effets secondaires peuvent être graves, entraînant l'hospitalisation, une invalidité ou un décès ; ils sont exacerbés par la prise d'autres médicaments. Il est donc recommandé de suivre scrupuleusement les prescriptions médicales.

En conclusion, les benzodiazépines, lorsqu'elles sont bien utilisées, constituent un moyen efficace de réduire l'état d'anxiété lié au stress chronique.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Texte	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle à la question posée <ul style="list-style-type: none"> • Certains documents ne sont pas exploités • Réponse à une seule des deux sous-questions 	Démarche pertinente mais maladroite <ul style="list-style-type: none"> • Manque de synthèse des différents documents • Mode d'action non explicité en s'appuyant sur l'unité 1 	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents. <ul style="list-style-type: none"> • Informations scientifiquement erronées • Le texte ne fait pas le lien entre toutes les données de l'unité 	Complets et précis	
Communication Schéma	Non conforme	<ul style="list-style-type: none"> • Le texte ne précise pas l'origine des informations citées dans les documents • Le texte ne présente pas d'exemples et de données quantitatives • Le texte n'est pas argumenté • Le texte ne présente pas de liens logiques 	Le texte correspond aux attentes	

Unité 3

> Éléments de correction

La tâche complexe comprend plusieurs phases à réaliser en classe sous forme d'une activité.

1. Etablir un questionnaire pour évaluer l'état de stress chronique des élèves.

Les élèves pourront s'inspirer du document 1 de l'unité 1, du document 2 de l'unité 1, et du document 5 de l'unité 3. Les questions devront être adaptées à des élèves de leur âge. Elles pourront être générales (« Avez-vous des difficultés de concentration ? ») ou plus précises (« Faites vous des cauchemars la nuit ? Régulièrement ? Fréquence ? » ; « Êtes vous stressé par le devoir de SVT ? »). Il faudra veiller à ce que les questions permettent de bien d'évaluer le stress chronique et non le stress aigu.

2. Proposer un protocole pour tester l'efficacité d'une pratique non médicamenteuse.

La méthode devra être réalisable en classe et potentiellement sur le long terme car il est rare d'observer immédiatement l'effet d'une pratique non médicamenteuse. L'EMDR est difficilement réalisable en classe, bien qu'il existe des protocoles d'auto-hypnose. La pratique d'une activité physique n'est pas réalisable en classe et s'envisage sur le très long terme, mais elle pourrait faire l'objet d'un projet sur l'année avec les enseignants d'EPS pour favoriser la pratique sportive des élèves et évaluer ses effets. La méditation (MBSR) est la pratique la plus facile à réaliser en classe. De nombreuses ressources sont disponibles, notamment celles proposées par le psychiatre et psychothérapeute Christophe André, médecin à l'hôpital Sainte-Anne à Paris.

3. Les groupes confronteront leurs démarches et discuteront des limites de leur approche. Les limites qui pourront être discutées sont les suivantes :

- forme du questionnaire : réponse libre ou case à cocher (orienter le choix du sondé) ;
- nombre de questions du questionnaire et degré de précision des questions (toutes les formes de stress chronique sont-elles bien détectées/prises en compte ?) ;
- questions permettant de discriminer le stress aigu du stress chronique ;
- choix de la méthode : réalisable en classe ? Quelle organisation ? Quel choix de protocole ?
- prise en compte du temps nécessaire pour mettre en place de telles pratiques (pas de résultats à court terme) ;
- évaluation de l'état de stress post-traitement : par le même questionnaire ? Par un questionnaire différent ;
- comment seront traités les résultats ? Attribution d'un score à chaque question ? Quelle valeur accorder à chaque question ? Dimension statistique.

Cette discussion a pour objectif de faire réfléchir les élèves sur la démarche expérimentale et sur l'importance de chaque paramètre dans la mise au point du protocole. Il n'y a pas de solution unique ou de réponse univoque, la démarche est ici plus importante que le résultat final.

> Support pour l'évaluation

Niveau de réussite	1	2	3	4
Démarche Activité : questionnaire et protocole	Ne répond pas à la question posée	Démarche maladroite et partielle : seul le questionnaire ou le protocole ont été réalisés	Démarche pertinente mais maladroite : -Questionnaire ou protocole non aboutis, de nombreux paramètres n'ont pas été pris en compte	Démarche à la fois pertinente et cohérente
Contenu Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Absents	Incomplet par manque de connaissances et/ou d'extraction d'informations des documents. - Informations scientifiquement erronées - Le texte ne fait pas le lien entre toutes les données de l'unité	Complets et précis	
Communication Présentation orale	Non conforme	- Présentation orale non organisée/brouillon - Manque de justification des choix réalisés pour construire le questionnaire ou le protocole - Absence de présentation des limites de l'approche	La présentation correspond aux attentes	

Propositions corrigées de parcours « pas-à-pas »

Unité 1

Question 1.

Analysez et interprétez les documents 1 et 2. Définissez ce qu'est le stress chronique. Quels sont les symptômes caractéristiques ?

À la suite d'une expérience traumatisante, des élèves développent un état de stress post-traumatique plus ou moins fort, caractérisé par des pensées effrayantes, des difficultés de concentration, des maux de tête et de ventre, des insomnies, des troubles de l'attention, etc. Ces symptômes persistent chez certains plusieurs mois après l'événement traumatisant : c'est le stress chronique. Le stress chronique est un état de stress qui perdure dans le temps et/ou qui est très intense. Il peut être dû à de très nombreuses situations, mais les symptômes sont toujours similaires :

- troubles physiques : douleurs, maux de ventre et de tête, palpitations et hypertension, tremblements ;
- trouble émotionnels et mentaux : anxiété, fatigue, perte de mémoire et d'attention, déprime, confusion ;
- troubles comportementaux : détérioration de l'hygiène et de l'apparence, consommation de psychotropes, agressivité, tristesse, etc.

Question 2.

À partir de l'analyse des documents 3 et 4, précisez quel est l'effet du stress chronique sur le système limbique (à l'échelle tissulaire et cellulaire).

On déduit des résultats présentés dans le document 3 que l'hippocampe, l'amygdale et le cortex frontal médian, trois composants du système limbique présentent une densité en substance grise plus élevée. La substance grise correspondant aux noyaux cellulaires, on en déduit qu'il y a plus de neurones dans ces aires cérébrales chez un sujet ayant subi un stress post-traumatique. Le stress chronique induit donc une modification structurale du tissu neuronal.

Le document 4 présente les effets du stress chronique sur la morphologie des neurones. Chez les individus stressés, la longueur maximale des dendrites apicales des neurones hippocampiques est significativement réduite ; la longueur maximale des dendrites basales n'est que très faiblement réduite. Des résultats similaires sont constatés pour leur ramification : une diminution importante de la ramification des dendrites apicales et une faible réduction de la ramification des dendrites basales. Il semblerait que ces modifications structurales ne soient pas cantonnées aux neurones hippocampiques mais retrouvées également au niveau des neurones de l'amygdale et du cortex préfrontal. D'un point de vue fonctionnel, la transmission synaptique entre ces neurones est également modifiée.

Le stress chronique provoque donc des modifications structurales du système limbique à l'échelle tissulaire et cellulaire.

Question 3.

À partir de l'exploitation des documents 5, 6, et 7, reconstituez le mécanisme à l'origine des modifications structurales et fonctionnelles constatées à la question 2.

D'après le document 5, en cas de stress chronique, la concentration en CRH hypothalamique augmente d'un facteur 2 environ et celle d'ACTH sanguine d'un facteur 1,25. Le stress chronique stimule donc l'axe hypothalamo-hypophysio-adrenocorticotrope.

D'après le document 4, on peut déduire que l'augmentation de la concentration en CRH induit une diminution de la longueur et de la ramification des dendrites des neurones de l'hippocampe.

Enfin, le document 7 nous apprend qu'en cas de stress chronique, l'expression des récepteurs au cortisol diminue (il y a moins de récepteurs au cortisol au niveau de la membrane) ; de même l'expression et l'activité des récepteurs au GABA diminue, d'où une moindre action inhibitrice. La

combinaison de ces deux effets concourent à une augmentation de la sécrétion de CRH de 40 à 60 % par rapport à la normale.

Ainsi le stress chronique diminue les actions inhibitrices sur les neurones du NPV (rétrocontrôle négatif du cortisol et neurotransmission GABAergique inhibitrice). La sécrétion de CRH augmente alors de 40 à 60 % par rapport à la normale et provoque des modifications de la morphologie des neurones du système limbique (longueur et ramification des dendrites).

Question 4.

À l'aide du document 8, faites le lien entre vos réponses aux questions 1 et 2.

La morphologie des neurones et le fonctionnement des synapses du système limbique sont modifiés en situation de stress chronique. L'altération des connexions synaptiques de l'hippocampe, de l'amygdale et du cortex préfrontal sont responsables des pertes d'attention, de mémoire, des difficultés d'apprentissage, de l'augmentation de l'anxiété et de l'agressivité, et d'une diminution des capacités de contrôle et d'autorégulation. En bref, l'atteinte du système limbique est responsable d'une bonne partie des symptômes liés au stress chronique décrits dans les documents 1 et 2.

Unité 2

Question 1.

En utilisant les données des documents 1, 2 et 3, présentez l'effet des benzodiazépines sur l'activité du récepteur au GABA.

Les benzodiazépines sont une famille de molécules à usage pharmacologique (doc. 1). Elles se fixent sur la partie extracellulaire du récepteur au GABA situé sur le neurone post-synaptique. Leur site de liaison est distinct de celui du GABA et localisé à l'interface entre la sous-unité α et γ (doc. 2). Le récepteur au GABA est aussi une protéine canal qui, lorsqu'elle interagit avec le GABA, s'ouvre pour permettre l'entrée d'ions Cl^- à l'intérieur du neurone. L'intensité du courant engendré par le flux de Cl^- augmente avec la concentration en GABA extracellulaire : il y a une relation dose-réponse (doc. 3). La présence de benzodiazépines dans le milieu extracellulaire potentialise l'effet du GABA en augmentant plus fortement l'intensité du courant (pour chaque concentration en GABA l'effet est augmenté en présence de benzodiazépines) (doc. 3).

Question 2.

En utilisant les éléments vus dans l'unité 1 et votre réponse à la question 1, expliquez le mode d'action des benzodiazépines à l'échelle de l'organisme

En cas de stress chronique, l'expression et l'activité des récepteurs au GABA des neurones du noyau paraventriculaire de l'hypothalamus sont fortement diminués. Le GABA étant un neurotransmetteur inhibiteur, cela a pour effet d'augmenter la sécrétion de CRH et de provoquer des modifications structurales et fonctionnelles du système nerveux (voir unité 1). Les benzodiazépines permettent de potentialiser l'effet du GABA en augmentant le flux de Cl^- à travers le récepteur-canal. Leur action vient donc compenser la diminution du nombre et de l'activité des récepteurs au GABA, et rétablir l'action inhibitrice limitant la sécrétion de CRH.

Question 3.

D'après le document 4, quels sont les effets pharmacologiques des benzodiazépines à l'échelle de l'organisme ?

Les benzodiazépines anxiolytiques ont un effet myorelaxant (permettant un relâchement des muscles), un effet sédatif (apaisant) et un effet anxiolytique (qui diminue l'anxiété). Ces différents effets ont été mis en évidence grâce à des tests comportementaux réalisés sur des animaux de laboratoire (doc. 4). Leur effet est croissant avec la dose de benzodiazépine injectée. Les

benzodiazépines agissent notamment sur les récepteurs au GABA du système limbique (hypothalamus et amygdale).

Question 4.

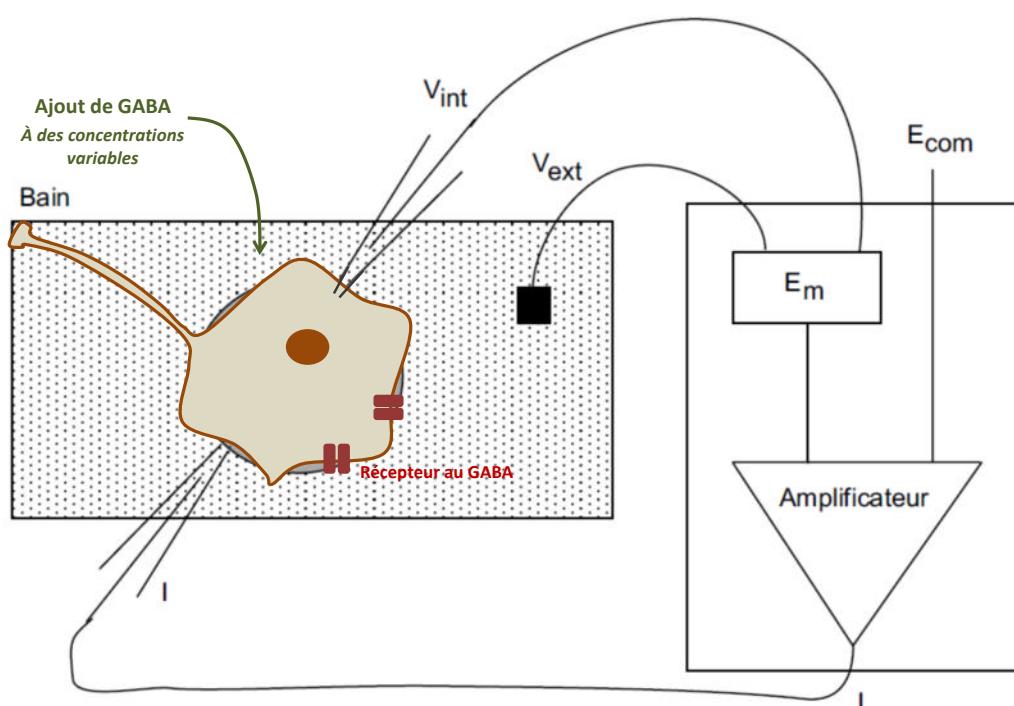
En utilisant les documents 1, 5 et 6, indiquez quels sont les effets indésirables et les limites de l'utilisation des benzodiazépines.

Les benzodiazépines sont des médicaments consommés par une large partie de la population française (6,5 millions de personnes et 64,6 millions de boîtes vendues) (doc. 1). Si les benzodiazépines permettent de réduire l'anxiété, elles présentent également de nombreux effets secondaires affectant le système nerveux, les capacités cognitives, physiques ou psychiques des patients les consommant comme la somnolence, des convulsions, un état confusionnel ou des hallucinations, une faiblesse musculaire et de la fatigue pouvant entraîner des chutes chez les personnes âgées (doc. 5 et 6). Ces effets secondaires peuvent être graves ; ils sont exacerbés par la prise d'autres médicaments (doc. 5). Il est donc recommandé de suivre scrupuleusement les prescriptions médicales.

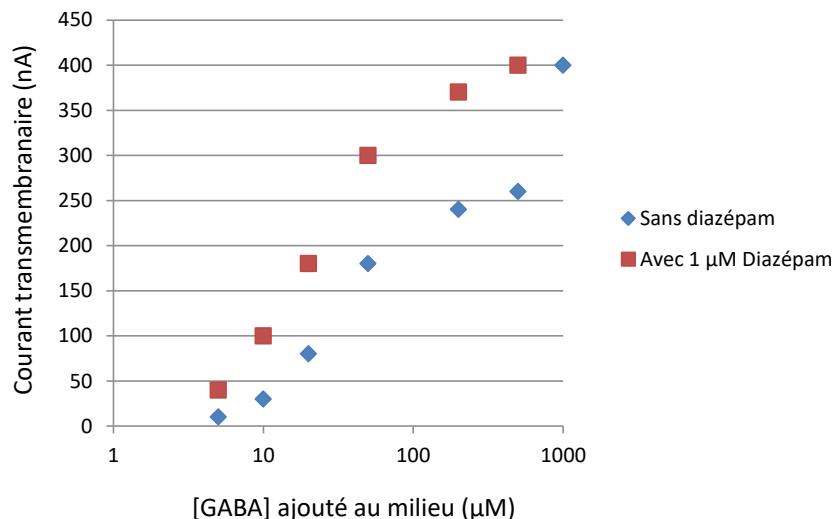
Éléments de correction des exercices

Exercice 2.

1. Schéma de l'expérience :



2. Graphique amplitude maximale des courants électriques transmembranaires en fonction de la concentration en GABA (\pm Diazepam)



Compte-tenu de la gamme de concentrations utilisées pour le GABA, une échelle logarithmique en abscisse permet de mieux représenter les données. Par ailleurs, ce graphique est très proche de celui présenté unité 2 doc. 3.

d3. Plus la concentration en GABA augmente, plus l'amplitude des courants enregistrés augmente. Il ne s'agit pas d'une relation de proportionnalité, la courbe semblant tendre vers une asymptote horizontale au-delà d'une certaine concentration (non testée) dans l'expérience réalisée. On observe la même allure de courbe avec et sans Diazépam.

4. Pour chaque concentration testée, en présence de 1 μM de diazépam, l'amplitude des courants est toujours supérieure à celle sans Diazépam. Cependant, en absence de GABA, qu'il y ait ou non du Diazépam, aucun courant transmembranaire n'est observé.

Le Diazépam potentialise donc l'ouverture des canaux mais est incapable d'entraîner leur ouverture en absence de GABA : en sa présence, l'amplitude des courants enregistrés est donc plus élevée. Les récepteurs au GABA étant des récepteurs canaux inhibiteurs du SNC, le Diazépam favorise l'inhibition des neurones du NPV, donc la libération de CRH et la résilience du système.

Exercice 3.

1.

Doc 1. Un rat non agressé placé dans la cage associée aux conditions stressantes ne présente pas de modification significative de son comportement : exploration, étirements, prise alimentaire, toilettage, phases d'immobilisme. C'est le témoin.

Un rat agressé dont la cage est placée à proximité du lieu de l'agression présente des comportements exacerbés : temps d'immobilisme allongé, beaucoup moins de cabrements. À l'inverse d'autres comportements ne semblent pas du tout affectés : toilettage, exploration, étirements, prise alimentaire. Ces comportements exacerbés sont typiques de comportements associés au stress (type freeze, flight or fight) et dénotent un état de stress chez le rat.

Conclusion : Un rat agressé replacé dans un contexte stressant aura donc un comportement différent d'un rat non agressé placé dans ce même contexte.

Doc 2. On évalue l'état d'anxiété du rat en le faisant évoluer sur une plateforme partiellement fermée (zones rassurantes) et partiellement ouverte (zones stressantes).

Un rat qui n'a jamais subi d'agression/stress passe environ 40 % de son temps dans la zone ouverte (c'est le témoin). Un rat agressé passe seulement 7 à 8 % de son temps dans la zone ouverte (anxiogène) 1 jour après son agression (alors qu'il y passait 40 % de son temps avant l'agression). Au cours du temps, le temps passé dans la zone ouverte de ce rat augmente progressivement pour atteindre 30 % au bout de 21 jours. Le rat présente donc un état d'anxiété plus important que la normale pendant au moins 21 jours après son agression, même si le niveau d'anxiété semble diminuer au cours du temps. On peut qualifier ce stress de chronique.

Au bout de 14 à 21 jours, les barres d'erreurs des rats témoins et agressés se recoupent, il n'y a pas de différence significative de l'état d'anxiété entre ces 2 groupes. On peut considérer que l'état d'anxiété des rats agressés est revenu à la normale en 3 semaines.

Il est à noter que, quels que soient les rats observés, il existe une grande dispersion des valeurs obtenues, il y a donc une très grande variabilité inter-individuelle dans le temps passé dans les différentes zones du dispositif. Elle est le reflet de la variabilité inter-individuelle des individus face au stress.

2.

L'objectif de l'expérience est de tester les conséquences sur la masse de la glande cortico-surrénale (responsable de la sécrétion de cortisol) et sur la morphologie des neurones de l'hippocampe (longueur et ramification des dendrites) de deux protocoles stressants :

- un protocole induisant un stress aigu (stress bref) ;
- un protocole induisant un stress chronique (stress répété sur 21 jours à raison d'une stimulation toutes les 48 h).

3.

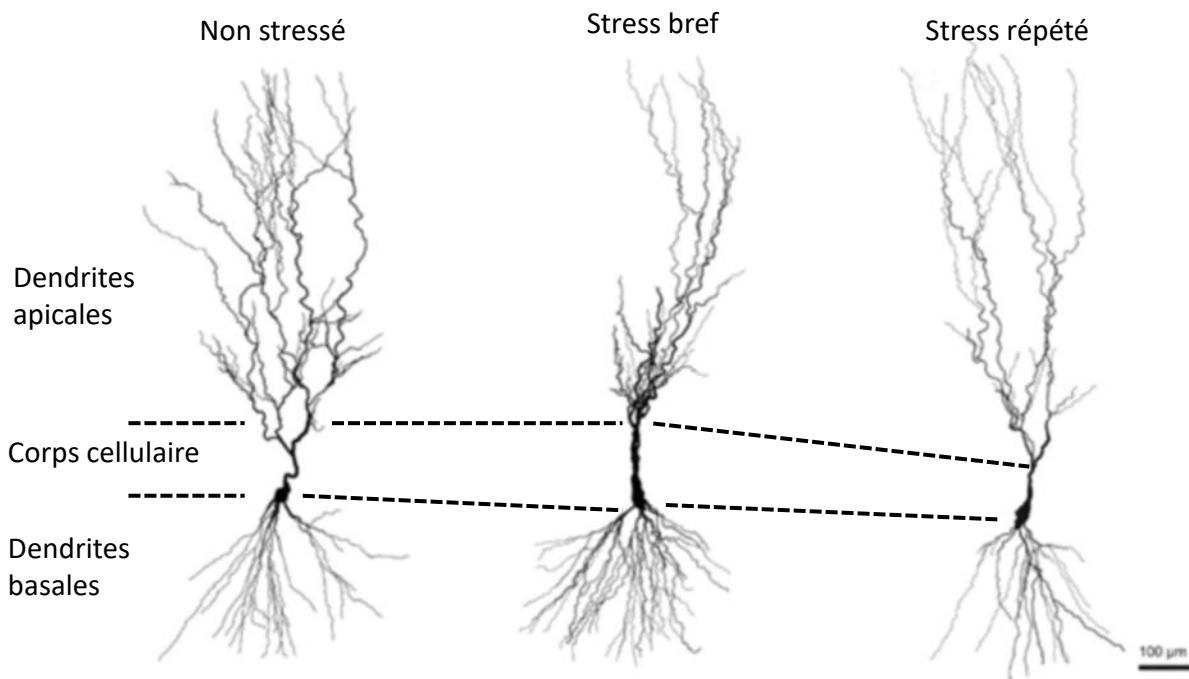
Un stress aigu ou un stress chronique entraîne une augmentation de la masse de la glande cortico-surrénale d'environ 25 à 30 % respectivement.

Un stress bref/aigu entraîne une diminution de la longueur des dendrites apicales de 25 %, une augmentation de la longueur, de la surface et du volume des dendrites basales de l'hippocampe d'un facteur 2 environ par rapport à un état non stressé.

Un stress répété/chronique entraîne une diminution de la longueur, de la surface et du volume des dendrites apicales de l'hippocampe d'un facteur 2 environ et aucune modification des paramètres des dendrites basales par rapport à un état non stressé.

Enfin, le stress répété entraîne une diminution du volume des dendrites apicales par rapport au stress bref, et le stress bref entraîne une augmentation de la longueur, de la surface et du volume des dendrites basales par rapport au stress répété.

En conclusion, stress bref/aigu et stress répété/chronique entraînent tous deux des modifications de la morphologie des dendrites de l'hippocampe mais il s'agit en majeure partie de modifications différentes.



4.

- Modification comportementale lorsque le rat est replacé dans conditions associées à l'expérience stressante : réactivation d'un état de stress même longtemps après l'expérience.
- Augmentation de l'état d'anxiété qui persiste dans le temps jusqu'à 21 jours environ.
- Augmentation de la masse de la glande cortico-surrénale et potentiellement de la quantité de cortisol sécrétée.
- Si le stress est répété = stress chronique, modification de la morphologie dendritique des neurones de l'hippocampe : diminution de la longueur, surface, volume des dendrites apicales.
- Si le stress est bref = stress aigu, modification de la morphologie dendritique des neurones de l'hippocampe : diminution de la longueur des dendrites apicales et augmentation de la longueur, surface, volume des dendrites basales.

Les effets à long terme dépendent donc du type de stimulus stressant.

Exercice 4.

1.

- En condition stressante, la longueur des dendrites hippocampiques passe à 800 μm contre 1300 μm en condition contrôle.
- En condition stressante, le nombre de ramifications dendritiques de l'hippocampe passe à 9 contre 14 en condition contrôle.

Le stress induit une diminution de la longueur et du nombre de ramifications dendritiques des neurones hippocampiques par rapport à une condition contrôle d'environ 30 %. Les différences constatées sont significatives et les barres d'erreur ne se recoupent pas.

2.

- En condition stressante et traitée à l'adiazolam, la longueur des dendrites hippocampiques est de 1250 µm, contre 800 µm en condition stressante, soit comme le contrôle (les barres d'erreur se recoupent). On a une restauration du phénotype.
- En condition stressante et traitée à l'adiazolam, le nombre de ramifications dendritiques de l'hippocampe est de 13 contre 9 en conditions stressante, soit comme le contrôle (les barres d'erreur se recoupent). On a une restauration du phénotype.

Le traitement à l'adiazolam avant la phase stressante permet de retrouver une morphologie dendritique (longueur et ramification) semblable au contrôle.

3. Le traitement à l'adiazolam permet de restaurer une morphologie dendritique hippocampique normale, semblable au contrôle. Étant donné que l'hippocampe est une des structures du système limbique et que l'altération du système limbique est impliquée dans les symptômes liés au stress chronique, on peut supposer que la restauration d'une morphologie normale s'accompagne d'une réversion des effets comportementaux et physiologiques du stress chronique.

Remarque : Pour avoir une inversion de tous les effets du stress chronique, il faudrait s'assurer que l'adiazolam a également un effet sur les autres structures du système limbique.

Exercice 5.

1.

Entre la 1^e et la 20^e session de la thérapie, le groupe contrôle ne voit pas son score de sensations négatives modifié alors que le groupe suivant la thérapie a une nette chute de son score de sensations négatives (de 22 à 19 UA en moyenne). Le niveau d'attention du groupe contrôle augmente entre la 1^e et la 20^e session mais de manière moins importante que celui du groupe suivant la thérapie. Enfin, la concentration salivaire en cortisol du groupe contrôle augmente légèrement entre la 1^e et la 20^e session alors que celle du groupe suivant la thérapie chut fortement passant de 6,5 nmol/L à 5 nmol/L en moyenne. En résumé, la respiration profonde permet d'augmenter le niveau d'attention des participants et diminuer les sensations négatives et le taux de cortisol (signe d'état de stress physiologique) : elle permet donc d'améliorer les capacités cognitives et comportementales et diminuer l'état de stress.

Remarque : la concentration de cortisol salivaire reflète fidèlement la concentration de cortisol sanguine.

Analyse critique

Les individus du groupe suivant la thérapie ont lors de la 1^{ère} session un score de sensation négative et un taux de cortisol bien plus élevés que le groupe contrôle et à l'inverse un niveau d'attention bien plus faible.

En théorie, lors de la 1^e session, si les deux groupes étaient homogènes, il ne devrait pas il y avoir de différence importante. Existe-t-il un biais dans la répartition des participants de cette expérience ? Par

exemple, pour le score de sensations négatives, observerait-on une différence si le niveau à la première session était identique pour les 2 groupes ?

La variabilité interindividuelle est toujours très importante pour les individus du groupe suivant la thérapie et beaucoup plus faible pour le groupe contrôle. Cette grande variabilité inter-individuelle masque-t-elle l'effet de la thérapie elle-même ? On pourrait suggérer un autre protocole au cours duquel un même individu suivrait d'abord un protocole placebo puis un protocole de respiration profonde, les données seraient ensuite comparées individu par individu.

2.

- Le stress chronique caractérisé par un certain nombre de symptômes cognitifs et comportementaux comme l'angoisse, la peur, la perte d'attention, des insomnies, l'absence de plaisir et physiologiques comme un taux sanguin de cortisol élevé.
- Les données présentées suggèrent un effet positif de la respiration profonde sur un certain nombre de symptômes du stress chronique : niveau d'attention, humeur (sensations négatives), taux de cortisol.
- Les données présentées ne seraient peut-être pas totalement fiables (présence de biais), elles nécessiteraient confirmation.
- Il existe une très grande variabilité interindividuelle dans la réponse à cette thérapie

Réponse : Oui pour préconiser cette thérapie mais sans certitude sur le résultat d'après les données présentées.

Correction des épreuves BAC

Génétique et évolution

1. Le brassage des génomes à chaque génération (p. 116) Type 1

Éléments de réponse

Arguments scientifiques possibles (expérience, observation, exemples, ...)	Eléments des connaissances attendus
Dessins d'interprétation de figures de méiose et de fécondation	Définition de la reproduction sexuée, impliquant méiose et fécondation. Ces deux processus peuvent être schématisés.
Le résultat d'un test-cross ($F_1 \times P_2$ du doc 1 , avec F_1 issus de $P_1 \times P_2$) donne des phénotypes parentaux majoritaires et des phénotypes recombinés minoritaires. Or, ce test-cross nous informe des gamètes produits par les individus F_1 .	Mise en évidence d'un brassage intrachromosomique, à illustrer sous forme d'un schéma, en localisant les deux gènes liés sur lesquels s'est appuyé l'élève.
Dessin d'observation d'un chiasma chromosomique au MET	
Exemple de croisements à partir de 2 populations P_1 et P_2 de lignées pures, au choix du candidat, pour lesquelles on étudie deux caractères gouvernés par deux gènes indépendants. Le résultat d'un test-cross ($F_1 \times P_2$, avec F_1 issus de $P_1 \times P_2$) donne des phénotypes parentaux et des phénotypes recombinés en proportion égale. Or, ce test-cross nous informe des gamètes produits par les individus F_1 .	Mise en évidence d'un brassage interchromosomique, à illustrer sous forme d'un schéma avec 2 gènes indépendants. Le schéma doit montrer que selon la disposition des chromosomes homologues de part et d'autre du plan équatorial en métaphase I, la combinaison allélique des gamètes change. Un échiquier de croisement du test-cross illustre les 4 phénotypes obtenus et équiprobables.
Les chromosomes portent une multitude de gènes. Chez l'humain, on en compte environ 30 000.	Les brassages intra et interchromosomiques lors de la méiose produisent une infinité de gamètes à la combinaison allélique unique. Ce brassage est amplifié par la rencontre aléatoire des gamètes lors de la fécondation

2. La couleur de la peau humaine (pp. 116-117) Type 2

QUESTION Exploitez l'ensemble des documents et mobilisez vos connaissances pour expliquer comment la couleur de la peau est déterminée génétiquement et proposez une cause à sa diversification depuis 70 000 ans.

On attend dans le raisonnement de l'élève qu'il ait extrait les informations suivantes :

- Il y a des différences de composition en mélanine entre les peaux foncée et claire : les cellules d'une peau claire contiennent 10 fois moins de pigments de mélanine que les cellules d'une peau très foncée. En outre, elles contiennent environ 78% d'eumélanine (pigment foncé) et 22 % de phéomélanine (pigment clair), contre environ 97% d'eumélanine et 3% de phéomélanine pour les cellules de peaux très sombres (**doc 2**).
- Il existe différents variants du gène *MC1R* impliqué dans la production de mélanines. La fréquence allélique du variant associé à une peau foncée est très majoritaire chez les africains. Les trois autres variants associés à une peau claire ont une fréquence allélique nulle ou quasi nulle chez les africains, et sont davantage présents dans les autres populations étudiées (**doc 6**).
- Les UVB ont des effets sur les cellules épidermiques à la fois mutagènes, démontrés chez la souris (**doc 4** : 4 fois plus de délétions sur une séquence d'ADN lorsque les souris ont été exposées à 1 kJ d'UVB.m⁻² par rapport au témoin négatif), mais aussi bénéfiques pour la synthèse de vitamine D3 (**doc 3**).
- Les eumélanines ont un effet protecteur contre les effets mutagènes des UVB, tandis que les phéomélanines se décomposent sous l'effet des UVB et libèrent des substances cancérogènes (**doc 3**). En effet, le rayonnement en UVB est plus fort dans la zone intertropicale qu'aux plus hautes latitudes (**doc 5**).

On attend dans le raisonnement de l'élève qu'il ait mis en relation ces informations pour proposer que :

- La variation du rayonnement UVB constitue une pression de sélection.
- Des mutations aléatoires sont survenues au fil des migrations hors d'Afrique et notamment vers de plus hautes latitudes où le rayonnement UVB est plus faible. Celles entraînant un éclaircissement de la peau ont été sélectionnées, en réponse à une double contrainte : la nécessité d'une protection contre les UVB et d'une production minimale de vitamine D3 par la peau sous l'action des UVB.
- Les mutations associées à une peau claire, qui seraient survenues dans les populations africaines restées en Afrique, et exposées à un fort rayonnement UVB, auraient été contre-sélectionnées.

3. Endosymbioses et transferts horizontaux chez des insectes (pp. 118-119) Type 2

QUESTION Exploitez les documents et utilisez vos connaissances pour montrer que ces processus sont survenus chez les Psyllidae (insectes) et qu'ils sont des moteurs de leur diversification.

Eléments de correction

Informations à extraire des documents	Idées-clés déduites de la mise en relation des documents
<p>Introduction : Les psylles se nourrissent exclusivement de sève élaborée. Or, cette alimentation est déficiente en certains acides aminés essentiels, indispensables à leur bonne santé (doc 1). Comment expliquer le maintien de ce comportement alimentaire ?</p>	
<p>Doc 2 : les psylles possèdent des cellules spécialisées, nommées bactériocytes, constituant le bactériome. Des bactéries <i>Carsonella rudii</i> se trouvent dans ces cellules. Elles sont transmises par l'ovule. La vésicule entourant ces bactéries dérive du bactériocyte.</p> <p>Doc 3 : Le génome de <i>Carsonella rudii</i> est environ 30 fois plus petit que celui d'<i>E.coli</i>, une bactérie non endosymbiotique et contient 23 fois moins de gènes. Il est donc très réduit.</p> <p>Doc 4 : Un gène de <i>Carsonella rudii</i> a été intégré dans le génome de la cellule hôte.</p>	Ces observations sont des arguments en faveur d'une endosymbiose d'hérédité cytoplasmique des bactéries <i>Carsonella rudii</i> dans les cellules de l'hôte, ayant entraîné une régression de leur génome et le transfert horizontal d'un de leur gène dans le génome de la cellule hôte.
<p>Doc 4 : Dans les bactériocytes sont produits des acides aminés, notamment essentiels, absents de l'alimentation des psylles. Ces biosynthèses sont assurées par l'action complémentaire d'enzymes codées par des gènes de l'hôte, de l'endosymbiose, et de gènes d'origine bactérienne intégrés dans le génome nucléaire de l'hôte, acquis par transfert horizontal.</p> <p>De telles voies métaboliques hautement intégrées s'observent chez les cochenilles.</p>	En dépit de l'extrême réduction du génome de <i>Carsonella</i> , de nombreux gènes nécessaires à la synthèse des acides aminés absents dans la sève des plantes ont été maintenus. Cet argument est en faveur d'une coévolution entre la bactérie et son hôte, résultant de mutations (dont des délétions) puis de la sélection des endosymbioses viables et avantageuses.

<p>Doc 5 : Les arbres phylogénétiques des Psyllidés et de leurs endosymbiotes sont congruents (concordants). Cela signifie que la phylogénie des endosymbiotes suit celle de leurs hôtes.</p>	<p>Cette congruence met en évidence que ces endosymbioses n'ont pas été transmises entre lignées de psylles, mais verticalement, à partir d'un évènement unique d'infection entre une bactérie et un ancêtre des <i>Psyllidae</i>, suivie d'une coévolution entre les partenaires.</p>
<p>En conclusion, le déficit en acides aminés essentiels chez les <i>Psyllidae</i> est surmonté grâce à une symbiose obligatoire avec une bactérie, possédant le bagage génomique permettant de synthétiser ces substances. Cette endosymbiose a réuni deux espèces séparées en une nouvelle entité reproduisant conjointement les partenaires. Ces partenaires ont subi en bloc la sélection naturelle. Elle a maintenu des gènes chez l'un et l'autre aux fonctions complémentaires permettant la synthèse d'acides aminés essentiels, adaptant ainsi les insectes à une niche alimentaire spécifique. Au fil des générations, ces partenaires ont co-évolué, engendrant de nouvelles lignées et de nouvelles espèces. Des gènes bactériens acquis par transfert horizontal, par l'hôte, sont aussi impliqués dans les voies de biosynthèse des acides aminés. Ils sont complémentaires du génome natif de l'hôte et de l'endosymbiose. Les transferts horizontaux ont donc aussi contribué à la diversification des <i>Psyllidae</i>.</p>	

Correction des épreuves BAC

À la recherche du passé géologique de notre planète

1. L'ouverture de l'Atlantique Nord (p. 190) Type 2

QUESTION À partir des documents et de vos connaissances, reconstituez les étapes qui ont conduit à la formation de la Pangée puis à l'ouverture de l'Atlantique Nord. Vous préciserez les structures qui, aujourd'hui, témoignent de ces différentes étapes. Vous déterminerez au niveau de quelle suture continentale cette ouverture s'est produite et proposez une explication à sa localisation.

Analyse des documents et mobilisation des connaissances, dans le cadre du problème scientifiqueposé

Critères évalués	Indicateurs
<ul style="list-style-type: none">• Pertinence des éléments prélevés dans les documents pour résoudre le problème scientifique.• Complétude et pertinence des connaissances pour traiter le problème de manière complète, en plus des données issues des documents.	<ul style="list-style-type: none">• Les éléments prélevés sont en lien avec le sujet, un tri est bien opéré par l'élève :<ul style="list-style-type: none">– les marges passives se mettent en place par distension crustale ;– les sutures sont formées par la collision d'au moins deux ensembles continentaux après disparition d'unités océanisées par subduction ;– la subduction des océans de grande taille appauvrit le manteau et le rend cassant ;– la subduction de petits océans rend homogène et non cassante la lithosphère suturée.• Connaissances :<ul style="list-style-type: none">– de SVT 1^e : déplacement des plaques, subduction, notion de fusion partielle des roches, roches de la lithosphère ;– de SVT T^e : suture, roches des ceintures orogéniques, marges passives et mécanismes de mise en place des marges.

Démarche personnelle

Critères évalués	Indicateurs
<ul style="list-style-type: none"> Qualité de la démarche de résolution (adéquation de la démarche avec le problème posé) Qualité de la rédaction de la démarche de résolution (vocabulaire et syntaxe au service d'une logique scientifique) 	<ul style="list-style-type: none"> L'élève construit bien un propos autour de la question posée, c'est à dire la recherche d'arguments en faveur de sutures plus favorables que d'autres à la mise en place de nouvelles marges. Toute démarche logique et explicative est acceptée.

Exploitation (mise en relation/confrontation) des informations prélevées et des connaissances au service de la résolution du problème.

Critères évalués	Indicateurs
<ul style="list-style-type: none"> Mise en relation pertinente des données prélevées et des connaissances avec le problème à résoudre. Présence et justesse de la conclusion apportant une réponse correcte au problème posé. 	<p>L'élève met en relation :</p> <ul style="list-style-type: none"> – la direction de la fracturation concordant avec une des sutures – le magmatisme de subduction plus ou moins important et la fragilité de la lithosphère. <p>• La direction calédonienne a été privilégiée lors de l'ouverture atlantique car elle a été le siège de la subduction d'un vaste océan qui a appauvri la lithosphère et l'a rendu cassante.</p>

Explications scientifiques détaillées pour l'enseignant

Les éléments extraits des connaissances sont en vert.

- Le **document 1** montre que la fracturation continentale s'est déroulée du Trias au Crétacé moyen (1^e carte). Certaines zones, comme celles au large de la marge irlandaise, ont commencé à se distendre près de la côte au Jurassique supérieur. La distension a progressé vers le large au Crétacé moyen. La rupture continentale (2^e carte) s'est aussi déroulée de manière asynchrone au Crétacé moyen pour la partie méridionale (en vert) de la zone étudiée puis au Cénozoïque pour la partie septentrionale (en jaune).

La côte au large du massif armoricain (qui était proche de la marge ibérique puisque ce bloc Ibérique à pivoté au Cénozoïque pour former les Pyrénées) suit une direction NE-SO qui prolonge la zone de fracture au large de l'Irlande.

- Le **document 2** situe les restes des sutures orogéniques des Calédonides (en vert), que l'on retrouve dans le nord de l'Écosse et de l'Irlande, au niveau de la côte ouest de la Norvège et des Appalaches (sur la côte est de l'Amérique du nord). Ces sutures ont toutes une direction NE-SO identique à celle de l'Atlantique Nord.

Toutefois, bien que l'on retrouve des traces de suture varisque de part et d'autre de l'Atlantique (en rouge) la direction Est-Ouest des Varicides (chaîne varisque) ne semble pas avoir été celle qui a généré une nouvelle zone de distension lors de l'ouverture de l'Atlantique Nord.

- Dans le **document 3**, on apprend que la chaîne calédonienne est le résultat de la collision d'au moins trois plaques – Laurentia, Avalonia et Baltica – après disparition d'un vaste océan, le Iapetus.

La lithosphère de cet océan était de type « accrétion rapide », puisqu'on nous apprend qu'il est constitué d'une croûte magmatique, générée par la fusion partielle des minéraux fusibles des périclites du manteau. **On sait que la fusion partielle appauvrit le manteau en ces éléments facilement fusibles. On peut donc en penser que le manteau lithosphérique issu de cette collision devait avoir un comportement cassant et peu ductile (voir chapitre 7).**

Cet océan est ensuite entré en subduction à la fois au niveau de la côte américaine, mais aussi sur la côte de l'ouest de la Norvège et du nord de l'Écosse/Irlande. Le magmatisme de subduction est important, ce qui produit des plutons dans la lithosphère chevauchante, comme en Normandie au sein des gneiss crustaux.

- Le **document 4** montre que la chaîne varisque est le résultat de la collision entre la lithosphère issue de la collision Laurentia-Avalonia-Baltica et le Gondwana. Cette collision fait suite à la disparition de l'océan Rhénan, un océan plus petit que le Iapetus, dont la lithosphère était moins magmatique. **Son manteau n'a pas été appauvri par fusion partielle et il pourra fondre ultérieurement si les conditions le permettent (voir chapitre 7).**

La fermeture de l'océan Rhénan affectera la future France en suturant les Ardennes et le nord du Massif armoricain avec le sud de la France. Notons aussi que la plaque Ibérique est au niveau de la future côte atlantique.

Le magmatisme de subduction est faible. On peut supposer que c'est en lien avec l'étroitesse de l'océan, qui ne permet pas à une courte plaque en subduction de libérer suffisamment d'eau pour entraîner la fusion partielle de la lithosphère chevauchante. En revanche, un magmatisme post-collisionnel est noté, ce qui montre que lorsque les contraintes tectoniques diminuent, la lithosphère hydratée et son manteau non appauvri peuvent entrer en fusion partielle et produire des magmas de types granitiques (à point de fusion plus bas)

- Le **document 5** montre que les magmas Calédoniens sont surtout localisés sur le nord du Massif armoricain selon une direction est-ouest et que les magmas varisques reprennent en partie cette localisation ainsi qu'une direction qui suit la suture ophiolitique de Vendée (vers Nantes). On signale ici que le comportement de la lithosphère dans le Massif armoricain peut être modifié à cause de la mise des plutons plus récents d'âge varisque en place au sein de la chaîne calédonienne.

- Le **document 6** montre que si la lithosphère océanique qui entre en subduction est vaste et constituée d'une croûte magmatique (et donc d'un manteau appauvri), le magmatisme de subduction est important. Ce magmatisme modifiera le comportement tectonique ultérieur de la plaque chevauchante. Les deux portions de lithosphères suturées dans la ceinture orogénique auront ainsi des comportements mécaniques différents face aux futures distensions, ce qui est favorable à la fragilisation de la lithosphère.

À l'inverse, si le magmatisme intervient que lors de la phase post-orogénique, comme c'est le cas des subductions de petits océans, à lithosphère océanique de type « accrétion lente », l'ensemble de la ceinture orogénique sera touché par une fusion partielle généralisée. La lithosphère adoptera un comportement plus homogène tout en effaçant d'éventuelles failles crustales. Ce type de magmatisme collera franchement la suture en faisant fondre la lithosphère de l'intérieur (voir chapitre 7).

- **En conclusion**, l'Atlantique s'est ouvert selon une direction Calédonienne car la subduction du Iapetus a généré une suture de type hétérogène facilement cassable par des mouvements tectoniques divergents ultérieurs. La suture varisque n'a pas été suivie par l'ouverture Atlantique car elle avait été trop parfaitement soudée les blocs crustaux pendant l'orogenèse. Ceci a rendu la rupture impossible, y compris dans les zones touchées par l'orogenèse calédonienne d'Armorique.

2. Reconstitution d'une collision au Permien (p. 192) Type 2

QUESTION En utilisant vos connaissances et les documents disponibles, donnez les arguments en faveur l'interprétation de la ligne des klippes proposée par les géologues. Puis, à l'aide notamment de vos connaissances sur la datation, reconstituez la succession des événements qui a abouti à la fermeture du bassin.

Analyse des documents et mobilisation des connaissances, dans le cadre du problème scientifique posé

Critères évalués	Indicateurs
<ul style="list-style-type: none">Pertinence des éléments prélevés dans les documents pour résoudre le problème scientifique.Complétude et pertinence des connaissances nécessaires pour traiter le problème de manière complète, en plus des données issues des documents.	<ul style="list-style-type: none">Les éléments prélevés sont en lien avec le sujet, un tri est bien opéré par l'élève :<ul style="list-style-type: none">utilisation des différents principes de datations qui permettent de replacer les éléments dans un ordre chronologiques ;la pétrologie des roches de la lithosphère océanique et continentale (socle/magma) permet de replacer les roches dans leur contexte géodynamique (extension/subduction).Connaissances :<ul style="list-style-type: none">SVT 2^e : principe d'altération/transport/sédimentation et signification de ces dépôts ;SVT 1^e : magmatisme de subduction ; structure d'une chaîne de montagnes ;SVT T^{le} : datation relative/absolue, suture, ophiolites.

Démarche personnelle

Critères évalués	Indicateurs
<ul style="list-style-type: none">Qualité de la démarche de résolution (adéquation de la démarche avec le problème posé).Qualité de la rédaction de la démarche de résolution (vocabulaire et syntaxe au service d'une logique scientifique).	<ul style="list-style-type: none">L'élève construit son développement autour de la question posée, c'est-à-dire la recherche d'arguments permettant d'affirmer que cet affleurement correspond au reste d'un bassin d'arrière-arc puis d'en reconstituer la genèse et la disparition lors de la collision.Toute démarche logique et explicative est acceptée. La richesse de l'exploitation du vocabulaire scientifique issu des connaissances est valorisée.

Exploitation (mise en relation/confrontation) des informations prélevées et des connaissances au service de la résolution du problème.

Critères évalués	Indicateurs
Mise en relation pertinente des données prélevées et des connaissances avec le problème à résoudre. • Présence et justesse de la conclusion apportant une réponse correcte au problème posé.	<ul style="list-style-type: none"> • L'élève met en relation : <ul style="list-style-type: none"> – la présence de lithosphère océanique comme marque d'une distension puis d'une obduction ; – la présence de gneiss comme marque de la fragmentation d'un continent en une marge hyper-étirée ; – la présence de sédiments et de coulées de laves comme les trace de l'évolution du bassin d'arrière-arc ; – les principes de datation relative et absolus avec l'organisation chronologique de l'histoire de la zone. • La ligne des klippes est bassin d'arrière-arc formé au Dévonien, qui a évolué au moins pendant tout le Carbonifère inférieur puis s'est fermé ensuite par lors de la collision qui a donné naissance à la chaîne varisque.

Explications scientifiques détaillées pour l'enseignant

Les données issues des connaissances sont en vert

- Un bassin d'arrière-arc est une zone océanisée située entre la marge continentale et un arc volcanique. Il est liée à l'extension de la lithosphère continentale chevauchante produite par l'intense traction de la plaque en subduction (**document 2**). Le fond océanisé contient, dans cet exemple, du manteau serpentiniisé injecté de gabbros des roches sédimentaires.
- On distingue une différence de sédimentation entre les différentes zones :
 - sur les bords de la marge étirée se déposent des produits d'altération des reliefs de la croûte continentale en cours d'extension : grès, conglomérats ;
 - sur le fond de la lithosphère du bassin d'arrière arc d'accrétion lente on trouve des ophicalcites qui, comme le décrit le **document 4**, correspondent à des roches formées par l'aglomération de fragments de laves basaltiques, de serpentine mantellique et de gabbros déchiqueté par l'altération hydrothermale de la lithosphère ;
 - au niveau de l'arc volcanique se déposent un mélange de roches détritiques d'altération continentale et de laves et cendres d'origine volcanique.
- On demande dans ce travail de rechercher les indices permettant de définir que la région d'Oderen correspond aux restes d'un bassin d'arrière-arc de ce type et de la marge associée.
- Dans le **document 1**, on apprend que :
 - dans la région il y a plusieurs unités plissées qui se superposent par le biais de contacts anormaux (failles et chevauchements). **Le mode d'affleurement de ces éléments permet d'envisager une superposition d'écailles de nature différentes lors qu'une collision** ;
 - l'unité de Markstein chevauche une kippe ;
 - ces deux formations chevauchent l'unité d'Oderen. Les unités d'Oderen et de Markstein reposent sur le socle. ;
 - on distingue des plutons produisant des filons qui remontent dans l'unité de Markstein ;

– grâce au principe de datation relative on peut dire que les granites et les filons sont d'âge plus récents que les trois unités (Markstein, klippe et Oderen) à la mise en place par chevauchement de ces unités superposées, c'est le principe de recouplement.

- L'analyse par Google-Earth de la klippe, proposé dans le **document 3**, précise la composition de cette dernière. On voit qu'au contact par faille de l'unité d'Oderen reposent des gneiss, roche de nature continentale profonde.

- Le **document 7** précise que le gneiss présente des zircons dont la datation radio-isotopique a été réalisée. C'est une datation absolue à partir des isotopes uranium/plomb. L'âge de ces zircons gneiss couvre une période très vaste avec des âges compris entre 2090 et 2591 Ma, pendant le Précambrien, ce qui représente 500 Ma. Ceci permet de dire que la croûte s'est formée pendant une période assez longue pendant le Précambrien entrecoupés de phases tectoniques enregistrées à chaque fois dans les zircons. Puis qu'à partir de 2090 Ma, son évolution s'est arrêté puisque les zircons n'ont rien enregistrés d'autre. Ce gneiss appartenait à une croûte profonde et stable. L'exhumation de roches continentales profondes peut être liée au basculement des blocs continentaux lors de la phase d'amincissement d'une marge passive. Dans ce contexte, le gneiss est donc probablement un bloc basculé qui s'est mis en place au moment de la fracturation continentale, donc à une période forcément très proche de celle de la mise en place des gabbros océaniques.

- Le **document 4** précise que la péridotite est serpentinisée et que les ophycalcites produites lors de manifestations hydrothermales contiennent (principe d'inclusion) des fragments de gabbros datés par une autre méthode de datation isotopique absolue, utilisant le rapport isotopique entre l'isotope père Sm (samarium) et l'isotope fils Nd (néodyme). Le gabbro est agé de 372 Ma. On précise que la composition chimique globale du gabbro est identique à celle d'un fond océanique à accrétion lente, ce qui est souvent le cas dans un bassin d'arrière arc (**doc. 1**).

La présence sur les roches océaniques d'un conglomérat recouvert d'argiles sableuses (**doc. 3 et 5**), souligne la proximité du continent.

Ce fragment de lithosphère correspond donc à du manteau exhumé injecté de gabbro et altéré par hydrothermanisme. Cette lithosphère a été mise en place à l'extrémité de la marge passive dont elle a reçu des sédiments détritiques, à proximité des blocs basculés de croûte continentale profonde.

- Le klippe chevauche l'unité d'Oderen et l'unité de Markstein chevauche le klippe, mais on ne peut pas utiliser le principe de superposition pour dater les unités car ces dernières sont dans un contexte actif d'une point de vue tectonique.

- L'analyse des roches des deux unités (**document 5**) renseigne sur leur nature sédimentaire et magmatique et sur les événements qui ont eu lieu dans la région où elles ont été mises en place. Ce document montre la succession des roches dans les différentes unités. Certaines associations de roches semblent être analogues puisqu'on retrouve les successions verticales identiques (principes de continuité stratigraphique et de superposition). En prenant en compte les fossiles présents dans les argiles (principe de datation biostratigraphique, **document 6**), on peut rapprocher les argiles de l'unité moyenne d'Oderen à l'unité de Markstein. L'une et l'autre sont d'âge Viséen inférieur (le Tournaisien et le Viséen moyen englobent le Viséen inférieur).

- La série d'Oderen est géographiquement proche de la série de Markstein puisque leurs argiles contiennent les mêmes fossiles. Ce sont des débris de plantes flottées, ce qui indique la proximité du continent. De plus, on retrouve le même type de plante. Cette information valide l'idée d'un bassin d'arrière-arc car si les plantes sont identiques (*Racopteris, Asterocalamites* **doc. 6**) :

- soit elles ont la même origine et leur transport n'a pas été long ;
- soit elles ne proviennent pas du même endroit, mais comme elles correspondent à la même association floristique, elles proviennent d'un même biome (donc de la même ceinture climatique). La présence à Oderen de rhyolithes, d'andésite et d'autres laves (**doc. 5**) est le signe que cette unité était proche d'une zone où le magmatisme était intense. La nature des roches fait penser à celle d'un arc volcanique de subduction.

L'unité d'Oderen correspondrait donc au bord du bassin constitué par l'arc volcanique.

- Pour finir, les argiles contiennent les mêmes associations faunistiques et floristiques qui ont été datés **biostratigraphiquement** (doc.6). La partie médiane de l'unité d'Oderen est du même âge (Tournaisien à Viséen moyen) que l'unité de Markstein (**principe de continuité latérale**).

L'épaisseur importante de l'unité d'Oderen (+ 4000 m) montre une subsidence du bassin sédimentaire sur une longue durée (de 359 à 323 Ma, soit 36 Ma). On peut penser que l'unité de Makstein est reliée à la marge hyper étirée car elle ne contient pas de lave. Elle également reçu d'importantes quantités de sédiments (du même âge).

- Les troncs silicifiés et recouverts par la rhyolithe datent du Serpukhovien (**doc. 6**), ce qui indique que le magmatisme et donc la subduction était sans doute encore actifs à la fin du Carbonifère inférieur.
- Les alternances de grès et d'argile (**doc. 6**) à Oderen et à Markstein montrent que la subsidence se faisait par à-coups car elle superpose des phases où les éléments sont grossiers (grès), ce qui indique une reprise de l'altération donc (soulèvement tectonique), et des phases plus calmes avec le dépôt des argiles.

• Conclusions

> Les gneiss appartiennent à la croûte continentale profonde et ancienne qui formait le socle d'un continent dont la marge est entrée en subduction. Les phénomènes de traction exercés par la subduction ont conduit à la mise en place d'un bassin d'arrière-arc et d'un volcanisme d'arc insulaire.

> L'ouverture de ce bassin est postérieure à 372 Ma (âge dévonien des gabbros).

> Les séries sédimentaires et les productions magmatiques sont enregistrées pendant presque tout le Carbonifère inférieur, ce qui correspond donc à la phase de distension du bassin d'arrière-arc (**rappelons que lorsqu'une lithosphère devient plus âgée elle devient plus épaisse plus dense et s'enfonce dans l'asthénosphère ce qui explique la subsidence**). Ces sédiments sont produits par l'arc volcanique mais aussi par l'abrasion du continent au niveau des bords de marge étirée.

> Les argiles et grès du Viséen (Carbonifère inférieur) dont les épaisseurs atteignent au moins le millier de mètres sont interprétés comme des turbidites qui se sont déposées dans un bassin en bordure d'une ceinture orogénique en formation. Les reliefs étaient érodés et les produits d'altération se déposaient dans le bassin en subsidence, formant ainsi une succession épaisse de sédiments détritiques (conglomérat, grès et argiles). L'activité volcanique était intense et apportait à la série des éléments volcano-détritiques.

> Au niveau des klippe, la présence de gabbros, d'ophicalcites et de périclites serpentinitisées indique l'existence d'un fond océanisé de type accrétion lente d'âge dévonien. La présence de ces ophiolites à proximité des gneiss laisse penser que le site est très près de la côte car le gneiss est un fragment de la croûte continentale profonde (fragment de bloc basculé d'une marge en extension) et que cette ophiolite correspond à un manteau de bord de marge exhumé. La présence d'un **volcanisme calco-alcalin** pendant le Carbonifère est un indice d'un contexte régional en subduction. Le bassin océanisé est sans doute un bassin d'arrière-arc.

> Les **plissements** dans les sédiments des différentes unités (**doc. 1**) **montrent la convergence** qui conduit à la fermeture du bassin d'arrière-arc. Cette convergence, postérieure au Serpukhovien, va favoriser le décollement des roches sédimentaires de leur socle et le charriage des différentes unités. Les gneiss, interprétés comme un bloc basculé sont chevauchés par **les ophiolites** (lambeaux du substratum du bassin océanique entraînés lors du chevauchement) de la klappe, c'est une **obduction**. Cette portion océanique est chevauchée par l'unité de Markstein qui correspond aux sédiments de la marge hyperétirée. La klappe et l'unité de Markstein chevauchent l'unité d'Oderen, qui correspond probablement à l'autre extrémité du bassin d'arrière-arc au niveau de l'arc volcanique.

> Pour finir, pendant ces chevauchements collisionnels, des plutons granitiques se sont mis en place et ont injectés les formations chevauchantes le long des failles. Pour connaître l'âge de la fin de l'événement tectonique qui a affecté cet ensemble, il faudrait effectuer une datation absolue des granites.

Correction des épreuves BAC

De la plante sauvage à la plante domestiquée

1. Les fleurs : relation structure-fonction (p. 286) Type 1

En introduction, on insistera sur la nécessité de la pollinisation croisée et l'utilisation de vecteurs (physico-chimiques ou biologiques) pour faciliter le transport du pollen. Ces derniers étant indispensables compte tenu de la vie fixée des plantes.

L'exposé doit faire apparaître une description de la structure de la fleur entomogame et le lien avec l'attraction des insectes pollinisateurs, leurs récompenses éventuelles et les conséquences de cette interaction pour l'insecte et pour la plante (une pollinisation suivie de la fécondation).

On pourra utiliser des exemples illustrant les notions suivantes (les exemples sont entre parenthèses) :

- couleurs (coquelicot), morphologies (sauge), motifs (coquelicot) et odeurs (rafflésie) des fleurs favorables à l'attraction des insectes ;
- mécanismes favorisant le dépôt ou le prélèvement du pollen par les insectes (sauge, linaire) ;
- récompense pour l'insecte : nectar (sauge, linaire) et/ou pollen (coquelicot) ;
- bénéfice pour la plante : pollinisation croisée (particulièrement importante lorsque des barrières à l'autofécondation sont présentes). On pourra rappeler que le dépôt du grain de pollen sur le stigmate de la fleur se poursuit par la germination du tube pollinique permettant l'acheminement des gamètes mâles à proximité des gamètes femelles et la fécondation.
- exemples de bénéfice unilatéral (pour un seul des deux partenaires) : l'insecte ne tire pas de bénéfices de la pollinisation de la rafflésie ; la plante ne tire pas de bénéfice (pas de pollinisation) si l'insecte pollinisateur se nourrit du nectar en évitant les étamines (exemple de la linaire).

On pourra insister sur le fait que les pièces stériles de la fleur (pétales et sépales) sont impliquées dans l'interaction avec l'insecte (attraction, récompense), alors que les pièces fertiles (étamines et pistils) sont impliquées dans la reproduction sexuée de la plante au sens strict.

2. Les fruits : relation structure-fonction (p. 286) Type 1

En introduction, on insistera sur le fait que les plantes ayant une vie fixée, la dissémination des structures de reproduction (graines) est facilitée par les caractéristiques du fruit (structure contenant les graines).

L'exposé doit faire apparaître que la diversité (morpho-anatomique, biochimique) des fruits est liée à la diversité des modes de dissémination. L'exposé pourra être structuré par facteur de dissémination et illustré par des exemples :

- les facteurs abiotiques : l'eau (exemple de la noix de coco, du nénuphar) et le vent (exemple du pissenlit, de la clématite) ;
- les facteurs biotiques : la fourrure des animaux (exemple de la bardane), le transport par le tube digestif (exemple de la tomate, de la pomme), la dissémination liée à la constitution de réserves par certains animaux comme les écureuils (exemple des noisettes, des noix, des châtaignes, des glands).

3. Les humains et les plantes (p. 286) Type 1

L'exposé doit montrer la dépendance des humains aux plantes. Pour cela, on expliquera comment les plantes, par la photosynthèse notamment, produisent un grand nombre de molécules dont beaucoup sont utiles aux humains.

Un plan chronologique allant de la réduction du carbone atmosphérique à la constitution de molécules organiques par les plantes puis à leur utilisation par les humains permet de répondre au sujet. On pourra évoquer enfin les différents usages que les humains font des plantes : alimentation (source d'énergie et de micro-nutriments), textile, construction, etc.

Détail des différentes parties possibles de l'exposé :

L'introduction insistera par exemple sur l'omniprésence des plantes dans notre quotidien (alimentation, textile, construction) et proposera de montrer quelle est l'origine de cette diversité d'usage.

1) Utilisation du carbone atmosphérique par les plantes

De nombreuses expériences (Bonnet, Calvin et Benson notamment) ont permis de montrer l'importance, chez les plantes, de la lumière dans le processus de photosynthèse permettant à partir de dioxyde de carbone atmosphérique la production de molécules organiques (des glucides puis une grande diversité de molécules utilisant en plus du dioxyde de carbone et de l'eau, les éléments chimiques prélevés dans le sol). On peut rappeler l'expérience permettant de mettre en évidence la présence d'amidon dans des feuilles exposées à la lumière (voir page 224).

2) Fonctions des molécules produites

Après avoir rappelé succinctement que ces molécules ont des fonctions dans la plante vivante (cellulose et lignine pour permettre la croissance, amidon et lipides pour la mise en réserve énergétique, anthocyanes et tanins pour les interactions avec les animaux et champignons), on notera qu'il existe une très grande diversité de molécules.

3) L'importance alimentaire des plantes pour les humains

Les humains se nourrissent exclusivement d'êtres vivants (animaux, végétaux, champignons, micro-organismes), la photosynthèse fournissant, *in fine*, la totalité des molécules alimentaires des humains. En effet, les végétaux nourrissent les animaux et les champignons dont les humains se nourrissent. Les micro-organismes alimentaires se développant à leur tour grâce molécules organiques des autres êtres vivants. Les humains trouvent dans les plantes non seulement des sources d'énergie (amidon, lipides) mais également une grande diversité de nutriments essentiels (acides aminés, vitamines, etc.).

4) L'importance non alimentaire des plantes pour les humains

Les plantes fournissent par ailleurs des matériaux de construction (bois du chêne riche en cellulose et en lignine), des molécules pharmaceutiques (dérivé de l'aspirine, dérivé de la morphine, molécules anticancéreuses, etc.) et cosmétiques (beurre de karité, tiaré, coprah, etc.). Les plantes fournissent également des fibres textiles (coton, lin, chanvre) le plus souvent riches en cellulose.

En conclusion, les humains sont totalement dépendants des plantes pour leur alimentation et pour de nombreux autres usages. La domestication des plantes leur a permis de produire en grande quantité les organes et molécules synthétisées par les plantes.

4. Pollinisation de la balsamine de Burton (p. 287) Type 2

QUESTION Expliquez comment les adaptations développées par les fleurs et les insectes leur permettent de tirer avantage de la relation mutualiste qui les lie. Vous organiserez votre réponse selon une démarche de votre choix en intégrant des données des documents et des connaissances utiles.

Les documents mettent en regard des adaptations à la pollinisation de la balsamine de Burton (l'éperon contenant le nectar) et les adaptations au prélèvement du nectar de trois insectes (trompes). On peut donc se poser la question du lien entre ces adaptations et l'efficacité de la pollinisation de la balsamine.

Éperon et nectar de la balsamine de Burton

Chez la balsamine de Burton, on observe la présence d'un éperon contenant du nectar (**doc 1**). Le nectar est une substance sucrée produite par les plantes, souvent au niveau des fleurs. Ce nectar est une attraction et une récompense pour les insectes visitant la fleur. Si ces insectes au cours de cette visite se couvrent de pollen, ils pourront transporter ce pollen vers une autre fleur de la même espèce assurant ainsi le service de pollinisation.

L'éperon est une structure morphologique des pétales qui oblige les insectes visitant la fleur à pénétrer profondément dans celle-ci pour prélever le nectar et par conséquent à se couvrir de pollen.

Trompes des insectes polliniseurs

Chez les trois espèces d'insectes visitant la balsamine de Burton, on observe des trompes de longueurs variables selon l'espèce (**doc 2**). *Rhingia mecyana* a à la fois la trompe la plus longue et la pénétration la plus importante dans l'éperon de la balsamine. Nous pouvons donc supposer que cet insecte est plus à même de consommer le nectar produit par la fleur (**doc 2**). Cependant, cela n'est pas suffisant pour savoir si c'est le meilleur insecte pollinisateur puisque cela dépend notamment de sa capacité à transporter du pollen.

On constate que *Melanostoma sp.* est le premier des trois insectes à visiter les balsamines le matin (**doc 3**). Avec une trompe courte, il peut donc boire le nectar situé en haut de l'éperon. L'abeille réalise ses visites en milieu de journée et peut ainsi utiliser le nectar situé à mi-hauteur dans l'éperon. *Rhyngia mecyana*, en fin de journée, est le seul insecte à pouvoir utiliser le nectar qui reste dans le fond de l'éperon (**doc 3**).

Efficacité de la pollinisation

On constate que l'abeille domestique dépose le plus grand nombre de grains de pollen par fleur (**doc 4**). Cette efficacité peut être due à des adaptations spécifiques de l'abeille (pilosité, capacité à transporter et à déposer le pollen) et n'est pas forcément dépendante de sa capacité à exploiter le nectar. *Melanostoma sp.*, dont le prélèvement de nectar est limité par sa trompe courte (**doc 2 et 3**) est aussi l'insecte qui transporte le moins efficacement le pollen (**doc 4**). La trompe de *Rhyngia mecyana* paraît mieux adaptée à la collecte de nectar (**doc 2 et 3**), mais cela ne suffit pas pour être un bon pollinisateur (**doc 4**).

On peut toutefois remarquer que les quantités de pollen transportées par *Melanostoma sp.* et *Rhyngia mecyana* ne sont pas négligeables : leur somme équivaut à la quantité transportée par l'abeille. Ces deux insectes fournissent donc un service de pollinisation, certes moins efficace que l'abeille domestique mais tout à fait appréciable.

Conclusion

Dans cet exemple, il ne semble pas y avoir de corrélation entre les adaptations des insectes polliniseurs (les trompes permettant de prélever le nectar) et l'efficacité de la pollinisation. Toutefois, même les polliniseurs les moins efficaces (*Melanostoma sp.* et *Rhyngia mecyana*), parviennent collectivement à transporter les mêmes quantités de pollen que l'abeille seule. En conséquence, l'ensemble des trois espèces réunies permet d'exploiter la ressource (nectar) fournie par la fleur et d'assurer un service de pollinisation plus important qu'une seule de ces espèces. Ces éléments réunis nous donnent un exemple de l'importance de la biodiversité des polliniseurs dans la réalisation du service de pollinisation.

5. Prédateur ou pollinisateur ? (pp. 288-289) Type 2

QUESTION Analysez les mécanismes qui optimisent la pollinisation des fleurs entomogames présentées et mettez-les en lien avec l'évolution des modes de pollinisation au sein du genre *Epipactis*. Vous organiserez votre réponse selon une démarche de votre choix en intégrant des données des documents et des connaissances utiles.

L'ensemble des documents présentés évoque la pollinisation d'orchidées du genre *Epipactis*. S'agissant d'une pollinisation par des insectes, se pose la question de l'attraction de ces derniers et de la récompense éventuelle (bénéfice) qu'ils tirent de l'interaction avec ces orchidées.

L'attraction des guêpes sociales

On constate que les épipactis à larges feuilles (*E. helleborine*) produisent des mélanges de substances similaires à celles émises par des choux attaqués par des piérides (doc 1). Or, ces dernières sont des proies des guêpes. On peut donc faire l'hypothèse que les guêpes visitent les épipactis attirées par l'odeur ressemblant à celle de choux attaqués et contribuent ainsi à la pollinisation. Le doc 2 confirme que les guêpes ont une préférence pour les choux infestés de Chenilles (par rapport à des tubes vides ou à des choux sains) ou pour les fleurs d'*E. helleborine* (par rapport à un tube vide). Ce document montre également que cette attraction est due aux substances synthétiques produites par la fleur (comparaison avec le solvant de chromatographie seul). Le doc 3 montre que ces substances attirant les guêpes sociales et imitant celles produites par des choux infestés de Chenilles ne se retrouvent pas chez toutes les espèces du genre. Notamment *E. atrorubens*, dont on sait (doc 5) qu'elle est pollinisée par les bourdons, ne produit pas ces substances.

Dans cette interaction, les guêpes sociales contribuent à la pollinisation des orchidées. En revanche, l'attraction est unurre puisque les guêpes ne trouveront pas la source de nourriture qu'elles recherchent dans l'odeur imitée par la fleur. Il s'agit d'une exploitation du service pollinisateur des guêpes par *E. helleborine*.

L'attraction des syrphes

Dans le doc 4, les substances émises sont comparables à celles émises par un puceron en situation d'alarme. La fleur attire ainsi une femelle syrphe cherchant à déposer ses œufs près des pucerons. La femelle syrphe peut alors polliniser l'épipactis et la fleur fournit à la femelle syrphe un emplacement pour le dépôt de ses œufs (les larves seront à proximité de leur source de nourriture : les pucerons). Si cette ponte protège potentiellement la fleur d'éventuels pucerons, l'absence de pucerons réels trompe l'insecte qui ne trouve donc pas de récompense dans cette interaction.

La diversité des modes de pollinisation chez les épipactis

D'après l'arbre phylogénétique du genre (doc 5), on constate que les orchidées peuvent être pollinisées par des abeilles solitaires, des bourdons, des syrphes, des guêpes, des polliniseurs variés ou être autogames. Il semble que le mode de pollinisation de l'ancêtre commun aux épipactis est la pollinisation par les syrphes. On peut imaginer que selon les espèces de polliniseurs potentiels présentes dans l'environnement, les épipactis ont évolué pour attirer, notamment par des signaux chimiques, les polliniseurs existants.

Notons, que les systèmes d'attraction chez les épipactis semblent variés puisque les polliniseurs eux-mêmes le sont. D'après les deux exemples fournis, il semble que si les épipactis ont une attraction efficace de leurs polliniseurs elles ne fournissent pas de récompense (en tout cas pas dans les deux exemples cités ici).

Conclusion

Le genre *Epipactis* fournit un exemple de relation complexe avec les polliniseurs reposant sur des signaux chimiques d'attraction qui constituent des leurre puisque, dans les deux exemples étudiés ici, il n'y a pas de récompense à la clé pour les insectes.

Correction des épreuves BAC

Les climats de la Terre

1. La mer monte ? (p. 366) Type 1

Les critères évalués sont indiqués dans la colonne de gauche, les indicateurs de la colonne de droite sont déclinés pour ce sujet.

Critères évalués	Indicateurs
<ul style="list-style-type: none"> Cohérence de l'organisation du propos par rapport au questionnement posé. <p><i>Remarques à propos de l'organisation de l'exposé</i></p> <ul style="list-style-type: none"> > Les éléments mobilisables sont précisés dans la colonne de droite en noir. Ils ne donnent pas un plan ou une organisation-type. > Les éléments indiqués en vert dans la colonne de droite sont ceux qu'un élève peut mobiliser à partir du programme. > Toutes les organisations logiques permettant de répondre à la question sont recevables. <ul style="list-style-type: none"> Exactitude et complétude des éléments nécessaires pour traiter le sujet (connaissances ; expériences, observations, exemples) <p><i>Remarques à propos de la complétude des connaissances</i></p> <ul style="list-style-type: none"> > Les éléments indiqués en vert sont directement issus du programme, c'est-à-dire que ce sont des éléments exigibles. > On n'attend pas qu'un élève « récite par cœur » ces phrases et ces mots-clés mais qu'il se les approprie et les organise en un tout cohérent. 	<ul style="list-style-type: none"> L'élève fait le lien entre l'évolution du climat et l'augmentation du niveau de la mer, puis dans un second temps, explique comment l'élévation du niveau de la mer peut modifier le climat. L'élève utilise un vocabulaire scientifique adéquat. <p><i>Idées concernant : le lien climat – variation niveau de la mer</i></p> <ul style="list-style-type: none"> > La glaciation (exemple : au Carbonifère-Permien) ou la déglaciation entraîne la variation du volume d'eau dans l'océan (exemple : la déglaciation actuelle provoque la montée du niveau marin). > La dilatation thermique des océans liée à l'élévation de la température atmosphérique entraîne la variation du volume de l'eau. > On attend ici des expériences. <p><i>Idées concernant le lien variation niveau de la mer – climat</i></p> <ul style="list-style-type: none"> > Action sur l'albédo. > Action de l'accroissement des surfaces d'évaporation sur l'effet de serre. > Action sur la circulation océanique et le brassage des eaux avec des effets sur l'atmosphère. > Action sur le cycle géochimique du carbone : piégeage dans les réservoirs géologiques des carbonates et des roches carbonées au niveau des plateformes. > On attend ici des expériences. <ul style="list-style-type: none"> L'élève peut étayer son propos avec : <ul style="list-style-type: none"> des schémas légendés des phases de haut niveau marin / bas niveau marin. des schémas de climat froid / chaud : bas niveau marin au Permien et climat aride + glaciers ; haut niveau marin au Crétacé et climat chaud et humide. des expériences sur la dilatation thermique de l'eau. des expériences sur la solubilité du CO₂/pH/production de carbonate des expériences ExAO de mesure de l'albedo (radiomètre) des expériences ExAO ou modélisation de l'effet de serre en lien avec les variations de la surface océanique.

2. Calcaires et climats (p. 366) Type 1

Les critères évalués sont indiqués dans la colonne de gauche, les indicateurs de la colonne de droite sont déclinés pour ce sujet.

Critères évalués	Indicateurs
<ul style="list-style-type: none"> Cohérence de l'organisation du propos par rapport au questionnement posé. <p><i>Remarques à propos de l'organisation de l'exposé</i></p> <ul style="list-style-type: none"> > Les éléments mobilisables sont précisés dans la colonne de droite en noir. Ils ne donnent pas un plan ou une organisation-type. > Les éléments indiqués en vert dans la colonne de droite sont ceux qu'un élève peut mobiliser à partir du programme. > Toutes les organisations logiques permettant de répondre à la question sont recevables. <ul style="list-style-type: none"> Exactitude et complétude des éléments nécessaires pour traiter le sujet (connaissances ; expériences, observations, exemples) <p><i>Remarques à propos de la complétude des connaissances</i></p> <ul style="list-style-type: none"> > Les éléments indiqués en vert sont directement issus du programme, c'est-à-dire que ce sont des éléments exigibles. > On n'attend pas qu'un élève « récite par cœur » ces phrases et ces mots-clés mais qu'il se les approprie et les organise en un tout cohérent. 	<ul style="list-style-type: none"> L'élève explique les interactions entre le réservoir des roches carbonatées et le couple de réservoirs atmosphère/hydrosphère sur l'effet de serre et le climat global. L'élève utilise un vocabulaire scientifique adéquat. <p><i>Idées concernant la précipitation des carbonates</i></p> <ul style="list-style-type: none"> > Transformations chimiques modifiant la concentration atmosphérique en CO₂ : réactions de dissolution du CO₂ dans l'eau puis de précipitation des carbonates. > Solubilité du CO₂ dans l'eau > Nature des roches formées et climat : formation de roches carbonatées construites : craie du Crétacé, barres récifales actuelles ou fossiles, corrélation formation de carbonates / concentration atmosphérique en CO₂ élevée / effet de serre. > Rôle de la vie dans la précipitation de carbonates : test de foraminifères, coquilles de mollusque, de cnidaire, d'oursins, d'algues, biofilms... > Mise en place d'évaporites (carbonates, gypse) et climat aride > Altération hydrothermale des silicates des roches basiques piégeage du CO₂ produit par le réservoir du manteau et dissous dans l'eau. > Stromatolithes précambriens, piégeage du CO₂ et refroidissement. > Bancs calcaires signatures d'un climat moins hydrolysant plus aride. > On attend ici des expériences. <p><i>Idées concernant l'altération des carbonates</i></p> <ul style="list-style-type: none"> > Cycle biogéochimique du carbone ; équation de dissolution du CO₂ aboutissant à la formation d'ions hydroniums et à une diminution du pH. > Altération des massifs calcaires karst, libération du CO₂ et d'ion Ca²⁺ dans les eaux. > Bancs marneux : altération de roches incluant les carbonates sous climat hydrolysant. > Dissolution des coquilles et des tests dans des eaux acides (riches en CO₂). > Dissolution accrue des carbonates lorsque la température augmente car le CO₂ est moins soluble. > On attend ici des expériences.

	<ul style="list-style-type: none"> • L'élève peut étayer son propos avec : <ul style="list-style-type: none"> – des expériences ExAO ou réactifs sur la solubilité du CO₂/pH/altération/production de carbonates. – un schéma bilan comparant le climat et la disponibilité ou piégeage du CO₂.
--	---

3. Une reconstitution paléoclimatique (p. 367) Type 2

QUESTION Expliquez, en utilisant vos connaissances et les documents disponibles, quel était le climat Yprésien inférieur, quelles en étaient les causes probables. Puis proposez des hypothèses susceptibles d'expliquer l'origine des changements climatiques observés dès l'Yprésien supérieur.

Analyse des documents et mobilisation des connaissances, dans le cadre du problème scientifique posé

Critères évalués	Indicateurs
<ul style="list-style-type: none"> • Pertinence des éléments prélevés dans les documents pour résoudre le problème scientifique • Complétude et pertinence des connaissances nécessaires pour traiter le problème de manière complète, en plus des données issues des documents 	<ul style="list-style-type: none"> • Les éléments prélevés sont en lien avec le sujet, un tri est bien opéré par l'élève : <ul style="list-style-type: none"> – nature et signification des indices climatiques montrant un climat chaud (doc. 1 à 5) ; – nature et significations des indices montrant l'origine du climat chaud (doc. 1, 6 et 7) ; – nature et signification des indices expliquant l'origine du refroidissement postérieur (doc. 4). • Connaissances : <ul style="list-style-type: none"> – SVT 2^e : altération des roches, transport, dépôt, sédimentation ; – SVT 1^e : déplacement des plaques, volcanisme, collision ; – Enseignement scientifique 1^e : albédo, roches carbonées, piège à CO₂ ; – SVT T^{le} : datation, roches des ceinture orogéniques, principe et équations de l'altération des minéraux silicatés, indices et conséquence des paléoenvironnements chauds sur le climats, magmatisme et climat, rapports isotopiques δ¹⁸O et δ⁸⁷Sr, biomes. – Enseignement scientifique T^{le} : CH₄ et CO₂ et effet de serre, rétroactions climatiques.

Démarche personnelle

Critères évalués	Indicateurs
<ul style="list-style-type: none"> Qualité de la démarche de résolution (adéquation de la démarche avec le problème posé) Qualité de la rédaction de la démarche de résolution (vocabulaire et syntaxe au service d'une logique scientifique) 	<ul style="list-style-type: none"> L'élève construit bien un propos autour de la question posée : rechercher des arguments montrant le climat chaud, expliquer ses causes, montrer le refroidissement, expliquer les causes Toute démarche logique et explicative est acceptée.

Exploitation (mise en relation/confrontation) des informations prélevées et des connaissances au service de la résolution du problème.

Critères évalués	Indicateurs
<ul style="list-style-type: none"> Mise en relation pertinente des données prélevées et des connaissances avec le problème à résoudre (confrontation pertinente des données et des connaissances pour résoudre le problème) Présence et justesse de la conclusion apportant une réponse correcte au problème posé. 	<ul style="list-style-type: none"> L'élève met en relation : <ul style="list-style-type: none"> les indices biologiques, les rapports isotopiques, les concentrations en gaz à effet de serre et le climat ; la nature des sédiments et le climat ; les événements géodynamiques et leurs effets sur la production ou le piégeage du CO₂ ; les événements géodynamiques et leurs effets sur les flux océaniques et le climat. Le climat était très chaud à l'Yprésien inférieur car : le fort magmatisme de LIP a libéré beaucoup de CO₂ ; les environnements marécageux produisent des gaz à effet de serre (CH₄ et H₂O), à l'origine d'une rétroaction positive. Le climat s'est rapidement et fortement refroidit à cause de l'altération des roches et de modifications de la paléogéographie.

Explications scientifiques détaillées pour l'enseignant

Le travail porte sur trois notions à développer. Il s'agit tout d'abord de reconstituer le climat à l'Yprésien inférieur grâce aux indices que sont la connaissance de l'emplacement et de la signification des biomes (**doc. 1 à 4**) et la reconstitution des paléotempératures grâce aux données isotopiques (**doc. 5**). L'origine du climat de l'Yprésien sera enduite étudié à partir de l'analyse des **doc. 6 et 7**. Enfin, les causes de la fluctuation climatique dès l'Yprésien supérieur seront déterminées grâce à l'étude du **doc. 8**. Les connaissances apparaissent en vert ci-dessous.

1. Mise en évidence d'un climat chaud

Le **document 1** localise dans le Bassin parisien (plus précisément dans le Bassin de Paris) les affleurements étudiés dans le **document 2**. Ces reconstitutions paléogéographiques montrent qu'entre l'Yprésien inférieur (premier étage de l'Éocène) et supérieur le Nord du Bassin de Paris est au niveau de la latitude 45°N (**ce qui est proche de son emplacement actuel**). On sait qu'à cette période l'Atlantique Nord est en cours d'ouverture (**document 7**) et que donc la côte ouest de la France correspond à la marge Atlantique, ce qui favorise la mise en place d'un climat plus humide. Au cœur du Basin de Paris, il y a une mer épicontinentale **comme il en existait déjà au Crétacé à cet endroit**. Cette mer est en liaison avec l'Atlantique par l'Ouest. Un haut fond (en Artois) sépare ce bassin d'un bassin plus septentrional localisé dans le Nord et en Belgique. Cette dépression épicontinentale est entourée par la bordure nord-est du Massif armoricain, la bordure nord du Massif central, par le sud du seuil de l'Artois et par les Ardennes à l'Est. Des fleuves venant du Sud et de l'Est apportent des sédiments arrachés à ces reliefs en cours d'altération (**soustractive**).

Sur les bordures de cette mer, des forêts tropicales de bord de mer se mettent en place. **Les mangroves sont constituées d'une végétation d'arbres, d'arbustes, de lianes et d'épiphytes qui poussent les pieds dans l'eau généralement salée ou saumâtre lorsque les apports d'eaux douces augmentent.** On en trouve actuellement en bordure des mers dans la ceinture intertropicale. Par actualisme, on peut déjà imaginer que le climat était beaucoup plus chaud que celui que l'on trouve actuellement à 45° de latitude Nord (c'est-à-dire celle de l'actuelle Gironde).

On observe qu'à l'Yprésien supérieur, la mangrove a régressé et que les dépôts dans ces zones deviennent exclusivement détritiques et grossiers (à grains de quartz).

On précise dans le **document 1** qu'à l'Yprésien inférieur, les dépôts argileux dominent et qu'à l'Yprésien supérieur ce sont les grains de quartz. Cette variation de la sédimentation renseigne sur l'évolution des événements tectoniques qui se déroulent au loin (dans le cas présent au sud et à l'est avec l'orogenèse pyrénéo-alpine) et qui vont provoquer un changement des apports sédimentaires. À l'Yprésien inférieur, ce sont des argiles issues notamment de la décalcification de la craie et des marnes du Crétacé. À l'Yprésien supérieur, les apports sédimentaires sont issus de la **reprise de l'altération des reliefs varisques** à cause du bombement lithosphérique lié à l'orogenèse pyrénéo-alpine.

Les photos du **document 2** montrent l'épaisseur des dépôts de l'Yprésien inférieur. La lignite noire montre une **accumulation de matière organique végétale non recyclée**. La matière organique a sédimenté avec de l'argile qui va s'opposer à sa décomposition, **la couleur noire indiquant un milieu anoxique**. **Le lignite est un combustible fossile, donc un piège à CO₂**. Aussi, à l'Yprésien, les conditions climatiques sont favorables à la mise en place d'une zone de piégeage de CO₂.

Des ambres sont présentes dans ces lignites et dans ces restes de sève élaborée fossilisés. On y trouve des organismes piégés comme ceux observés dans les photographies du **document 3** (fleurs d'angiospermes et insectes).

Dans le **tableau 4**, la liste des principaux organismes retrouvés dans le lignite ou dans l'ambre et leur préférendum climatique est donné. Ce document montre la vaste biodiversité dans ces mangroves. L'analyse des préférendums montre que, globalement, les espèces présentes préfèrent les climats chauds. On note que certaines sont plutôt liées à un climat aride tandis que d'autres ont besoin d'humidité. Ceci peut s'expliquer par la présence des fleuves qui permettent la présence de biotopes humides au sein d'une zone plus aride. Enfin, la présence de tortues, crocodiliens, lézards, iguanes et de nombreux insectes montre l'absence de gel, ce qui à nouveau confirme le climat chaud.

Le **document 5** montre l'évolution de la température des eaux océaniques. L'utilisation du thermomètre isotopique du $\delta^{18}\text{O}$ permet de montrer qu'au cours de l'Yprésien inférieur, la température de l'eau du fond de l'océan était supérieure à 15 °C. Ceci montre donc que le climat global était beaucoup plus chaud qu'actuellement.

2. Origine du climat chaud

Le **document 6** montre que les températures enregistrées entre 30 et 90 ° de latitude Nord sont globalement plus élevées qu'actuellement. Quel est le facteur qui réchauffe le climat notamment dans l'hémisphère Nord ?

Tout d'abord, on sait que les mangroves sont des marécages, c'est-à-dire un environnement anoxique (**documents 1 et 2**), producteur de méthane et permettant une forte évaporation d'eau. Ils produisent donc deux gaz à effet de serre.

Le **document 7** apporte un élément supplémentaire permettant d'expliquer le réchauffement du climat. On observe la mise en place d'un point chaud formant une LIP (Large Igneous Province) magmatique au large du Groenland. **Ce magmatisme lié à la remontée d'un panache mantellique chaud va induire la mise en place de trapps volcaniques importantes et conduire à l'ouverture de l'Atlantique Nord.**

Ce volcanisme, en partie sous-marin et en partie aérien, rejette abondamment du CO₂ dans l'atmosphère. Il peut être responsable de l'accroissement de l'effet de serre.

Un réchauffement brutal de l'eau des plateformes continentales et de l'air dans les régions des hautes latitudes peut par ailleurs induire la libération de méthane par les clathrates déstabilisés comme on l'a observé au début de l'Holocène. Ce phénomène amplifie l'effet de serre.

3. Origine du changement climatique à la fin de l'Yprésien

Le **document 5** montre que le climat chaud au début de l'Yprésien devient plus froid dès l'Yprésien supérieur puisque l'eau perd entre 5 et 10 °C. Le **document 8** montre les variations de la nature des roches altérées pendant le Cénozoïque grâce à l'utilisation du rapport isotopique $\delta^{87}\text{Sr}$ dans les carbonates. Pendant tout le Paléocène et l'Éocène, ce sont principalement les roches d'origine mantelliques (basaltes, gabbros, etc.) qui s'altèrent **puisque le rapport isotopique $\delta^{87}\text{Sr}$ est bas.**

Si l'on corrèle cette première information avec celle du **document 7**, on peut dire que les grandes quantités de roches basaltiques produites par le point chaud ont été progressivement altérées. **On sait que l'altération de ces roches (pyroxènes, feldspaths) piège du CO₂.** On peut donc déjà envisager cette première cause au changement climatique.

La seconde cause, observable dans le **document 8**, correspond à l'altération des roches continentales (**rapport isotopique du $\delta^{87}\text{Sr}$ élevé**). En effet, de la fin de l'Éocène à l'actuel, on observe la mise en place des ceintures orogéniques de la chaîne Alpine : Pyrénées, Alpes et surtout l'Himalaya dont la période d'exhumation est parfaitement corrélée avec la pente la plus forte du graphique. **L'altération des feldspaths des roches continentales piège du CO₂** d'où une diminution de l'effet de serre et un refroidissent le climat.

On observe enfin sur le **document 8** que les variations de la circulation océanique liées à l'ouverture de la mer de Tasmanie (entre l'Australie et l'Antarctique) et du passage de Drake (au niveau du Cap Horn entre l'Amérique du Sud et l'Antarctique) **favorise la mise en place d'un inlandsis en Antarctique.** Cet inlandsis, **par son fort albédo**, va contribuer au refroidissement du globe.

Les variations climatiques enregistrées à l'Yprésien sont le résultat de la modification du cycle du carbone entre les grands réservoirs (manteau/lithosphère/atmosphère). Les fluctuations enregistrées au niveau des sédiments sont liées à l'évolution géodynamique complexe et rapide de cette époque, qui va exhumer des roches avant de les altérer.

Correction des épreuves BAC

Corps humain et santé

1. Drogues et médicaments, des perturbateurs de l'activité neuronale (p. 514) Type 1

Analyse individuelle des documents

Doc 1. Il permet de rappeler la structure du récepteur au GABA et le site de fixation de 2 molécules vues en cours : le GABA, ligand naturel du récepteur qui se fixe sur la sous-unité β , et les benzodiazépines, ligand synthétique utilisé dans la pharmacopée. A noter que ces deux ligands se fixent sur la partie extracellulaire du récepteur. L'élève devra ainsi remobiliser ses connaissances de cours sur le récepteur au GABA, le GABA et les benzodiazépines pour répondre à la question posée.

Doc 2. Il s'appuie toujours sur le récepteur au GABA mais permet d'étudier l'effet d'une nouvelle molécule, l'éthanol. On utilise un dispositif d'enregistrement électrophysiologique analogue à celui présenté en cours et que l'élève devra réutiliser dans sa réponse. Dans l'expérience réalisée, on mesure le courant transmembranaire à travers un récepteur au GABA en présence de GABA et d'éthanol. L'éthanol constitue ici un modulateur de l'effet du GABA (comme pour les benzodiazépines). Plus la concentration en éthanol augmente, plus le courant transmembranaire à travers le récepteur au GABA augmente : l'éthanol potentialise l'action du GABA. Il a donc un effet similaire à celui des benzodiazépines. Le récepteur au GABA étant un récepteur-canal permettant de faire rentrer des ions Cl^- qui ont une action inhibitrice sur le neurone, la prise d'éthanol (comme la prise de benzodiazépines) a une action inhibitrice sur l'activité cérébrale.

Remarque : pour les premières concentrations en éthanol, les différences constatées ne sont pas significatives, elles le deviennent uniquement pour la condition 100 mM éthanol. Il est néanmoins possible de dégager une tendance et ce résultat pourra éveiller l'esprit critique de l'élève.

Doc 3. On utilise à nouveau un dispositif d'enregistrement électrophysiologique de manière à étudier 2 autres récepteurs-canaux neuronaux. On teste l'activité de ces canaux en présence et en absence de nicotine, un composé actif présent dans le tabac.

a. En absence de nicotine, le courant enregistré atteint un pic à 8 nA après 8 ms, alors qu'en présence de nicotine, il atteint seulement 3 nA en 8 ms. La présence de nicotine entraîne donc une diminution de l'amplitude du courant à travers le canal sodique voltage-dépendant. (NB : Le canal sodique voltage-dépendant est un des canaux impliqués dans la propagation des potentiels d'action neuronaux.)

b. En absence de nicotine, le courant enregistré atteint un pic à 6 nA après 10 ms, alors qu'en présence de nicotine, il atteint un pic à 10 nA après 15 ms. La nicotine provoque donc une augmentation de l'amplitude du courant à travers le canal cationique.

En conclusion, on peut voir que la nicotine a des effets opposés sur deux types de canaux neuronaux différents : (1) une action inhibitrice dans le cas du canal sodique voltage-dépendant, (2) une action activatrice dans le cas du canal cationique étudié.

Éléments de réponse

La propagation du message nerveux est assurée par les neurones via notamment des canaux assurant la genèse du potentiel d'action (canaux voltage-dépendants, comme le canal Na^+ voltage-dépendant) ou assurant la réception du message codé par les neurotransmetteurs (canaux ligand-dépendants, comme le canal au GABA). Étudier la transmission du message nerveux revient donc à étudier ces canaux et l'effet des drogues et médicaments sur ceux-ci.

1. Méthodologie employée. Pour étudier le fonctionnement des canaux et l'effet de molécules, on utilise un dispositif d'enregistrement électrophysiologique qui permet d'obtenir des courbes similaires à celles présentées dans le **doc 3**. L'élève doit expliquer cette méthode d'après son cours, avec ou sans l'aide d'un schéma similaire à celui du **doc 2 p. 486**.
2. Les drogues et médicaments sont des molécules capables de se fixer sur les récepteurs-canaux neuronaux : l'élève peut présenter des exemples comme les benzodiazépines qui se fixent sur le récepteur au GABA et la nicotine qui se fixe sur le récepteur sodique voltage-dépendant ou sur le récepteur nicotinique à l'acétylcholine de la cellule musculaire. Il peut aussi choisir d'autres exemples du cours.
3. Les drogues et les médicaments ont le même mode d'action sur les canaux neuronaux : **doc 1** et **doc 2**, comparaison de l'effet des benzodiazépines (cf cours) et de l'éthanol sur le récepteur au GABA (neurotransmetteur inhibiteur du système nerveux). Ils potentialisent l'action d'un neurotransmetteur (= augmentent son effet). Il peut s'agir de modulateurs qui se fixent sur un site différent de celui du ligand principal/naturel du canal et potentialisent ou réduisent son effet ; ou de molécules se fixant sur le même site que le ligand principal/naturel du récepteur, on parle alors d'agoniste (effet positif) ou d'antagoniste (effet négatif).
4. Les drogues et médicaments peuvent soit augmenter soit diminuer les courants transmembranaires associés aux canaux. Une même substance peut avoir des effets opposés en fonction du canal considéré (**doc 3**). L'élève pourra enrichir sa réponse des exemples vus en cours aux **chapitres 15, 16, 19 et 20**.

2. La spécialisation cellulaire (p. 515) Type 1

Analyse individuelle des documents

Doc 1. La microscopie électronique à balayage est utilisée pour observer la morphologie externe en trois dimensions de neurones en culture *in vitro*. Il s'agit d'une méthode d'étude que l'élève pourra réexpliquer et utiliser dans sa réponse pour présenter la démarche expérimentale.

On observe des structures globuleuses en trois dimensions qui pourraient correspondre aux corps cellulaires des neurones et des structures filamenteuses beaucoup plus fines 5, 10 ou 20 fois plus longues que le corps cellulaire. Ces structures filamenteuses sont rattachées au corps cellulaire et leur diamètre est variable. Il pourrait s'agir des axones et dendrites des neurones. Pour compléter sa réponse, l'élève peut proposer un schéma d'interprétation des structures décrites en s'appuyant sur ses connaissances.

Doc 2. On utilise la technique d'électrophysiologie pour étudier le fonctionnement d'un type de cellules particulier, les cellules à activité électrique, dites cellules excitables. L'élève pourra réexpliquer et utiliser cette méthode dans sa réponse pour présenter la démarche expérimentale.

Haut. On enregistre le potentiel de membrane d'une cellule neuronale au cours du temps. A $t = 0$ ms, le potentiel de membrane de la cellule est de -70 mV ; après stimulation, à $t = 2$ ms, on observe une dépolarisation très brève jusqu'à -30 mV, suivie d'une repolarisation et d'une hyperpolarisation jusqu'à -80 mV. Le potentiel de membrane retrouve sa valeur initiale de -70 mV au bout de 4 ms. Il s'agit d'un potentiel d'action neuronal pour lequel on reconnaît les différentes phases. L'élève pourra reproduire cette figure dans sa réponse et la légendrer d'après ses connaissances.

Bas. On enregistre le potentiel de membrane d'une cellule musculaire squelettique innervée au cours du temps. A $t = 0$ ms, le potentiel de membrane de la cellule est de -80 mV ; après stimulation, à $t = 17$ ms, on observe une dépolarisation très brève jusqu'à -30 mV, suivie d'une repolarisation très rapide (2 ms) et d'une repolarisation plus lente jusqu'à -85 mV. (Attention l'échelle est différente de la première figure.) Il s'agit d'un potentiel d'action musculaire (sans hyperpolarisation) pour lequel on reconnaît les différentes phases. L'élève pourra reproduire cette figure dans sa réponse et la légendrer d'après ses connaissances.

Ces deux enregistrements permettent de mettre en évidence la fonction d'excitabilité de la cellule neuronale et de la cellule musculaire avec à la fois des points communs (potentiel d'action) mais également des différences (forme du potentiel d'action, valeurs du potentiel de membrane, durée de chaque phase).

Doc 3. La microscopie électronique à transmission permet d'observer la structure et l'organisation interne des cellules. Il s'agit d'une méthode d'étude que l'élève pourra réexpliquer et utiliser dans sa réponse pour présenter la démarche expérimentale.

On observe plusieurs cellules sur le champ proposé. Leur noyau est assez volumineux (30 à 50% de la surface observée) et elles contiennent de très nombreuses vésicules (en noir sur les images) dont la taille varie du simple au double et plutôt localisées sur la périphérie des cellules. On observe également d'autres structures cellulaires qui pourraient correspondre à des mitochondries et du réticulum endoplasmique (à droite de l'image). Pour compléter sa réponse, l'élève peut proposer un schéma d'interprétation des structures décrites en s'appuyant sur ses connaissances.

S'agissant d'une cellule sécrétrice d'hormone, on peut penser que c'est une cellule métaboliquement très active (transcription, traduction, activité enzymatique) qui utilise l'énergie produite par les mitochondries pour synthétiser des hormones qui seront sécrétées à l'extérieur de la cellule. Ces hormones seront produites puis stockées au sein de vésicules qui seront exocytées au niveau de la membrane plasmique de la cellule.

Remarque : Il est à noter que la taille des structures visibles dépend de la manière dont la coupe microscopique a été réalisée. Par exemple, pour une structure sphérique, si la coupe n'a pas été réalisée dans le plan diamétral, elle sera plus petite qu'en réalité. L'estimation et la comparaison de la taille des structures doit donc être réalisée avec prudence.

Éléments de réponse

Les organismes pluricellulaires possèdent de très nombreux types cellulaires différents qu'il est possible de caractériser.

1. Méthodologie et démarche expérimentale. Pour caractériser une cellule, on peut étudier sa structure et sa fonction qui sont liées et témoignent de la spécialisation cellulaire. Pour caractériser la structure d'une cellule, on peut utiliser (1) la microscopie optique qui permet d'appréhender la forme globale d'une cellule et ses liens avec les cellules voisines au sein du tissu ; (2) la microscopie électronique à balayage qui permet d'appréhender plus finement la forme de la cellule avec une vision en trois dimensions ; (3) la microscopie électronique à transmission qui permet de visualiser avec précision la structure et l'organisation interne de la cellule avec ses différents compartiments intracellulaire (leur taille, leur forme, leurs relations). Cette étude structurale peut-être réalisée directement sur des tissus prélevés sur les organismes (**doc 3**) ou à partir de cellules cultivées *in vitro* (**doc 1**).

Cette étude structurale peut être accompagnée d'une étude fonctionnelle : (1) sécrétion d'une hormone en réponse à un stimulus chimique ou électrique (cf par exemple **chapitre 19**) ; (2) émission d'un potentiel d'action en réponse à stimulus chimique ou électrique (**doc 2**), etc. L'élève pourra utiliser plusieurs exemples vus en cours. Le **doc 2** présente spécifiquement l'étude du fonctionnement de cellules excitables utilisant l'électrophysiologie.

2. La spécialisation cellulaire repose sur la relation structure-fonction : les cellules spécialisées présentent une structure adaptée à la réalisation de leur fonction.

Cellule sécrétrice d'hormone : Présentation de la structure d'après le **doc 3** et de la fonction d'après les connaissances au programme (cellule sécrétrice d'adrénaline ou d'ACTH). Il s'agit d'une cellule présentant une importante activité métabolique (mitochondries, gros noyau), synthétisant des hormones (peptidiques dans les exemples proposés) transitant via les organites (réticulum endoplasmique) et stockées dans des vésicules de sécrétion (visibles en noir sur le **doc 3**). L'exocytose de ces vésicules sera sous contrôle d'un stimulus extérieur hormonal (fixation d'un ligand sur un récepteur, par exemple CRH et ACTH) ou électrique (système nerveux sympathique et adrénaline). Il s'agit d'une cellule spécialisée dans la sécrétion d'hormones dans la circulation sanguine en réponse à un stimulus.

Cellule neuronale : Présentation de la structure d'après le **doc 1** complétée par des connaissances vues en cours et soutenue par un schéma et de la fonction d'après le **doc 2** complétée des connaissances. Il s'agit d'une cellule présentant une morphologie particulière avec un corps cellulaire central, des dendrites rayonnantes et un unique axone. Elle est connectée aux cellules voisines par l'intermédiaire de synapses. Les signaux externes sont perçus par des récepteurs situés sur la membrane plasmique des dendrites ou du corps cellulaire, et intégrés au niveau du corps cellulaire (sommation spatiale et temporelle) permettant de générer (ou non) un potentiel d'action neuronal. Ces potentiels d'action, codés en fréquence, sont transmis le long de l'axone jusqu'au bouton synaptique où ils provoquent l'exocytose de neurotransmetteurs. Il s'agit d'une cellule spécialisée dans l'intégration et la conduction ultra-rapide d'un message nerveux électrique.

Cellule musculaire : Présentation de la structure d'après les connaissances (un schéma sera apprécié) et une partie de la fonction d'après le **doc 2** complété des connaissances pour aller jusqu'à la contraction. Il s'agit d'une cellule présentant une organisation interne particulière : Elle possède plusieurs noyaux (cellule plurinucléée) et un cytosquelette organisé en sarcomères. Ces sarcomères constitués de filaments d'actine et de myosine sont impliqués dans la contraction, leur mouvement relatif (cycle actine-myosine) permet de diminuer la longueur du sarcomère et de proche en proche de diminuer la longueur de la cellule. Le déclenchement de la contraction est permis par un stimulus nerveux qui permet la genèse d'un potentiel d'action musculaire, lui-même responsable de la libération de Ca^{2+} permettant les interactions entre la myosine et l'actine. L'utilisation d'énergie sous forme d'ATP permet le pivotement de la tête de myosine sur l'actine et le raccourcissement du sarcomère sous forme de cycles itératifs.

3. Entraînement et masse musculaire (pp. 516-517) Type 2

QUESTION En utilisant les documents proposés et les connaissances utiles, montrez quel est l'effet de l'entraînement sur la masse musculaire. Vous veillerez à expliquer les mécanismes biologiques en jeu et vous ferez ressortir les différents facteurs pouvant influencer la masse musculaire.

Analyse individuelle des documents

Doc 1. Cellules musculaires et cellules satellites.

Cette photographie permet d'analyser les cellules composant un tissu musculaire (en coupe transversale) en utilisant la microscopie à fluorescence et des marqueurs spécifiques. On observe :

- Une fibre musculaire de type I en vert, à contraction lente et métabolisme aérobie ;
- Trois fibres musculaires de type II en rouge, à contraction rapide et métabolisme anaérobie ;
- Les noyaux de ces différentes fibres (cellules pluripluripotentes) sont délocalisés sur le pourtour des cellules, la majorité du cytosol est occupée par les sarcomères.
- Deux cellules satellites situées entre les fibres musculaires et associées soit aux fibres de type I soit aux fibres de type II.

Doc 2. Effet de l'exercice sur le nombre de cellules satellites.

1. On compare le nombre de cellules satellites par rapport au nombre de cellules musculaires avant et 24h ou 72h après un effort aigu ([doc 2a haut](#)). Le nombre de cellules satellites associées aux cellules de type I par rapport au nombre de cellules musculaires n'est pas significativement modifié (les barres d'erreur se chevauchent). Le nombre de cellules satellites associées aux cellules de type II par rapport au nombre de cellules musculaires augmente d'un facteur 1,4 dès 24h après l'effort. L'effort aigu favorise donc l'augmentation du nombre de cellules satellites associées aux cellules de type II, celles permettant la réalisation d'efforts intenses et brefs.

Deux hypothèses peuvent être formulées pour l'expliquer : la migration ou la prolifération. Le [doc 2b](#) permet de trancher entre ces 2 hypothèses. On compare le pourcentage de cellules satellites en division avant et 24h ou 72h après l'effort aigu. 24h après l'effort, le pourcentage de cellules satellites en division est plus élevé d'un facteur 1,2 (même si non significatif) et 72h après l'effort, il est significativement plus élevé d'un facteur 1,5. L'effort aigu stimule donc la prolifération des cellules satellites associées aux fibres musculaires de type II.

2. On compare le nombre de cellules satellites par rapport au nombre de cellules musculaires avant et après un entraînement sur le long terme ([doc 2a bas](#)). Le nombre de cellules satellites associées aux cellules de type I et de type II par rapport au nombre de cellules musculaires augmente légèrement même si cette augmentation n'est pas significative (les barres d'erreur se chevauchent). L'entraînement favoriserait l'augmentation du nombre de cellules satellites associées aux cellules musculaires de type I et II.

Doc 3. L'augmentation du volume musculaire.

Lors d'un effort physique intense, les cellules musculaires peuvent subir de micro-déchirures. Les cellules satellites associées à ces fibres et situées juste à proximité ([doc 1](#) et [doc 3](#)) peuvent (1) se multiplier ([doc 2](#)) et (2) migrer vers la zone endommagée. Elles viennent se positionner au niveau de la zone lésée et leurs cytoplasmes fusionnent. Elles synthétisent alors les constituants essentiels d'une cellule musculaire (mitochondries, protéines constituant les sarcomères). Cette lésion de la fibre musculaire et sa réparation consécutive permettent d'augmenter sa longueur et son volume.

Doc 4. Effet de l'entraînement sur le volume du biceps.

On compare le volume du biceps d'hommes et de femmes soumis ou non à un entraînement musculaire sur le long terme. On constate qu'avec l'entraînement, le volume du biceps augmente d'environ 15-18% chez un homme et 10-12% chez une femme. L'entraînement favorise donc l'augmentation du volume musculaire. On peut supposer que le mécanisme cellulaire responsable serait celui évoqué dans le [doc 3](#).

Doc 5. Masse soulevée et taille du biceps.

On évalue la puissance musculaire (force développée et vitesse de réalisation) en fonction de la taille du muscle. La taille est estimée par la surface de la section transversale (c'est-à-dire en première approximation, le diamètre du muscle). Plus la taille du biceps est élevée, plus la puissance musculaire développée est élevée. Il y a une relation de proportionnalité entre les deux variables (coefficients directeur de $0,5 \text{ kg.cm}^{-2}$). L'augmentation de la taille (longueur et volume) du muscle permet d'augmenter la puissance développée.

Doc 6. Entraînement physique et apports nutritifs.

La contraction musculaire est permise par les sarcomères qui sont des structures protéiques complexes permettant le raccourcissement du muscle. Le suivi du métabolisme protéique est donc un indicateur important de la capacité de contraction musculaire. Le métabolisme protéique du muscle peut être décomposé en 2 parties, la synthèse et la dégradation des protéines, la balance protéique nette représente la moyenne des deux.

(1) L'entraînement physique favorise la synthèse de protéines musculaire (mais aussi leur dégradation), la balance nette est légèrement positive.

(2) Un régime riche en protéines ou riche en glucides favorise la synthèse protéique musculaire et non leur dégradation, la balance nette est positive.

(3) Un régime riche en protéines en condition d'entraînement favorise fortement la synthèse de protéines musculaires. Il y a donc un effet augmenté par rapport à chaque facteur pris indépendamment.

(4) Un régime riche en glucides en condition d'entraînement évite la dégradation des protéines musculaires, favorisant donc une balance protéique nette positive. Il y a également un effet augmenté par rapport à chaque facteur pris indépendamment.

(5) Un régime riche en glucides et en protéines en condition d'entraînement cumule tous les effets positifs vus précédemment, il y a une très forte augmentation de la balance protéique nette, c'est-à-dire de la synthèse protéique musculaire.

L'entraînement permet donc une augmentation de la balance protéique musculaire nette, essentielle à la réalisation de sa fonction. Cependant l'effet de l'entraînement est fortement augmenté en présence d'une alimentation riche en glucides et en protéines.

Remarque : On peut rappeler ici que le muscle est constitué d'un cytosquelette très développé comprenant des protéines (actine et myosine) permettant la contraction. Pour avoir une capacité de contraction augmentée, il faut plus de sarcomères.

Éléments de réponse

L'entraînement permet d'augmenter le volume et donc la masse musculaire (doc 4). Cette augmentation du volume et de la taille du muscle permet alors de développer une puissance musculaire plus importante et donc de réaliser des efforts plus conséquents comme porter une charge plus lourde (doc 5).

1. Quels sont les mécanismes biologiques permettant l'augmentation de la masse musculaire ?

Les muscles sont composés de fibres musculaires de type I et de type II ainsi que de cellules dites satellites associées à ces fibres (doc 1). Lors d'un effort physique aigu, on observe une prolifération des cellules satellites associées aux fibres de type II (doc 2) ; cet effet semble moins marqué lors d'un entraînement sur le long terme, néanmoins une tendance à l'augmentation est tout de même détectable (doc 2). Lors d'un effort physique intense, les fibres musculaires peuvent subir de micro-déchirures. Ces micro-déchirures sont réparées par l'intervention des cellules satellites qui (1) prolifèrent, (2) migrent au niveau de la zone lésée, (3) fusionnent entre-elles et (4) synthétisent les constituants nécessaires (notamment des protéines – doc 6) en se différenciant (doc 3). La taille et donc le volume de muscle s'en trouvent augmentés tout comme sa masse.

2. Quels sont les facteurs influençant la masse musculaire ?

Le premier facteur influençant la masse musculaire est l'entraînement physique (démonstration ci-dessus) qu'il soit sur le long terme (entraînement) ou sur le court terme (effort aigu) (doc 2).

L'entraînement n'est pas le seul facteur favorisant la masse musculaire, un apport alimentaire riche en protéines et en glucides favorise la synthèse protéique musculaire (nécessaire aux sarcomères) et donc l'augmentation de sa masse (doc 6).

Les divers documents présentés suggèrent même que c'est l'effet combiné de l'entraînement et d'une alimentation riche en protéines et en glucides qui optimise l'augmentation de la masse musculaire (doc 3, 4, 6).

Remarque : ici on ne détaille pas précisément le lien entre masse, volume, taille, longueur du muscle. Il est admis que si le muscle augmente de volume, alors sa masse augmente. De même, si le volume du muscle augmente, sa longueur ou sa surface en section transversale augmente. Par ailleurs, si la masse musculaire est reliée au volume du muscle, elle est aussi liée à la quantité de constituants présents dans chaque cellule, une augmentation de la balance protéique nette musculaire, augmente donc également la masse musculaire.

4. Le métabolisme énergétique de la cellule musculaire (pp. 518-519) Type 2

QUESTION En utilisant les documents et les connaissances utiles, montrez comment un muscle en activité assure son approvisionnement en ATP. Un schéma présentant les différentes voies métaboliques impliquées est attendu.

Analyse individuelle des documents

Doc 1. La créatine phosphate.

C'est une des sources d'ATP pendant l'effort physique via la réaction créatine-phosphate → Créatine. Elle est régénérée au repos via la réaction inverse créatine → créatine-phosphate grâce à l'ATP produite dans la mitochondrie. Elle constitue une réserve limitée utilisable seulement pendant les 10 premières secondes de l'effort.

Doc 2. Le cycle de Cori.

Les cellules musculaires striées squelettiques peuvent fonctionner selon deux modes pour produire de l'ATP : (1) le métabolisme aérobie impliquant la mitochondrie et l'utilisation d' O_2 et (2) le métabolisme anaérobie produisant du lactate. Le lactate produit peut être utilisé pour régénérer du glucose. Pour cela, il est transporté depuis la cellule musculaire jusqu'aux cellules du foie par le sang. Dans l'hépatocyte, le lactate emprunte la voie de la néoglucogenèse qui permet de synthétiser un glucose

à partir de 2 molécules de lactate. Puis le glucose néoformé est transporté par le sang jusqu'aux cellules musculaires en activité (qui l'utiliseront pour la glycolyse). Cette voie métabolique est couteuse en énergie car pour 2 molécules d'ATP générées au niveau de la cellule musculaire, 6 molécules d'ATP sont utilisées pour régénérer le glucose au niveau des hépatocytes.

Doc 3. Plus l'effort physique est intense (i.e. plus les muscles se contractent), plus l'utilisation d'ATP est importante. Pour suivre les voies métaboliques en jeu lors d'efforts d'intensité croissante, on peut suivre la lactatémie. La lactatémie correspond à la concentration en lactate dans le sang et est donc le reflet de la synthèse d'ATP utilisant la voie anaérobie.

Au début de l'effort, les métabolismes anaérobie et aérobie semblent fonctionner en parallèle et la contribution de chacun reste proportionnelle au fur et à mesure de l'augmentation de l'intensité de l'effort jusqu'au seuil de lactate. Au-delà de ce seuil, la lactatémie augmente plus fortement, suggérant (1) une production de lactate plus importante et donc un métabolisme anaérobie qui devient prépondérant et (2) une voie de régénération de glucose à partir de lactate (cycle de Cori présenté en **doc 2**) saturé qui ne parvient pas à régénérer l'ensemble du lactate produit.

Enfin, on remarque que ce seuil de lactate est atteint pour des puissances d'exercices plus élevées chez le sujet entraîné (260 W) que chez le sujet non entraîné (160 W). Cela signifie que le sujet entraîné possède un métabolisme aérobie plus efficace, qui est capable de subvenir aux besoins musculaires jusqu'à une intensité plus importante que le sujet non entraîné.

Doc 4. On suit la seconde voie métabolique importante à l'origine de l'ATP musculaire, la voie aérobie, en fonction de la puissance de l'exercice. Pour suivre cette voie aérobie, qui utilise de l' O_2 , on mesure la consommation d' O_2 par kg de muscle. Au repos, l'intensité de la respiration est mesurée à 0,38 mmol d' $O_2 \cdot kg^{-1}$ de muscle. Lors d'un exercice de faible puissance, elle est augmentée d'un facteur 1,3 et lors d'un effort de puissance importante, elle est augmentée d'un facteur 2,3. Il y a donc une augmentation du métabolisme aérobie avec la puissance de l'exercice.

Remarques :

- On ne sait pas si cette augmentation est proportionnelle.
- Ce document est à rapprocher du document précédent (**doc 3**) permettant de suivre le métabolisme anaérobie lactique en fonction de la puissance de l'effort.

Doc 5. Effets de l'entraînement sur le métabolisme mitochondrial des cellules musculaires.

(1) L'entraînement n'augmente pas le taux maximal de production d'ATP par unité de masse mitochondriale. De plus, selon une première étude, l'efficacité de la respiration n'est pas modifiée par l'entraînement. Cela signifie que le métabolisme aérobie de chaque mitochondrie n'est pas augmenté et donc que l'efficacité de la voie métabolique (activité des enzymes, protéines, ...) n'est pas modifiée : la voie métabolique aérobie de synthèse d'ATP est identique chez un sujet entraîné et un sujet non entraîné.

Cependant, une seconde étude rapporte une efficacité de la respiration (quantité d'ATP produite pour le transfert de 2 électrons dans la chaîne respiratoire mitochondriale) augmentée par l'entraînement. Ces résultats suggèreraient une modification des acteurs de la voie aérobie stimulée par l'entraînement.

Des résultats contradictoires sont proposés par les deux études, ils doivent donc être exposés ainsi sans parti pris par l'élève.

(2) En revanche, il est avéré que l'entraînement augmente le taux maximal de production d'ATP par unité de masse musculaire, ce qui suggère que le nombre de mitochondries par unité de masse musculaire augmente avec l'entraînement (NB : le document ne permet pas formellement de le démontrer, mais il s'agit de l'hypothèse la plus probable – et juste – d'après d'autres données).

(3) Le rapport créatine-phosphate/créatine est plus faible chez le sujet entraîné que chez le sujet non entraîné. La créatine-phosphate est une voie qui permet de régénérer rapidement de l'ATP au tout début de l'effort (**doc 1**). Plus le taux de créatine-phosphate est faible, plus les autres voies de synthèse d'ATP sont stimulées dont la voie de régénération aérobie.

Doc 6. On suit les différentes voies de renouvellement de l'ATP au cours de l'exercice musculaire. Au cours du temps, on peut distinguer différentes phases :

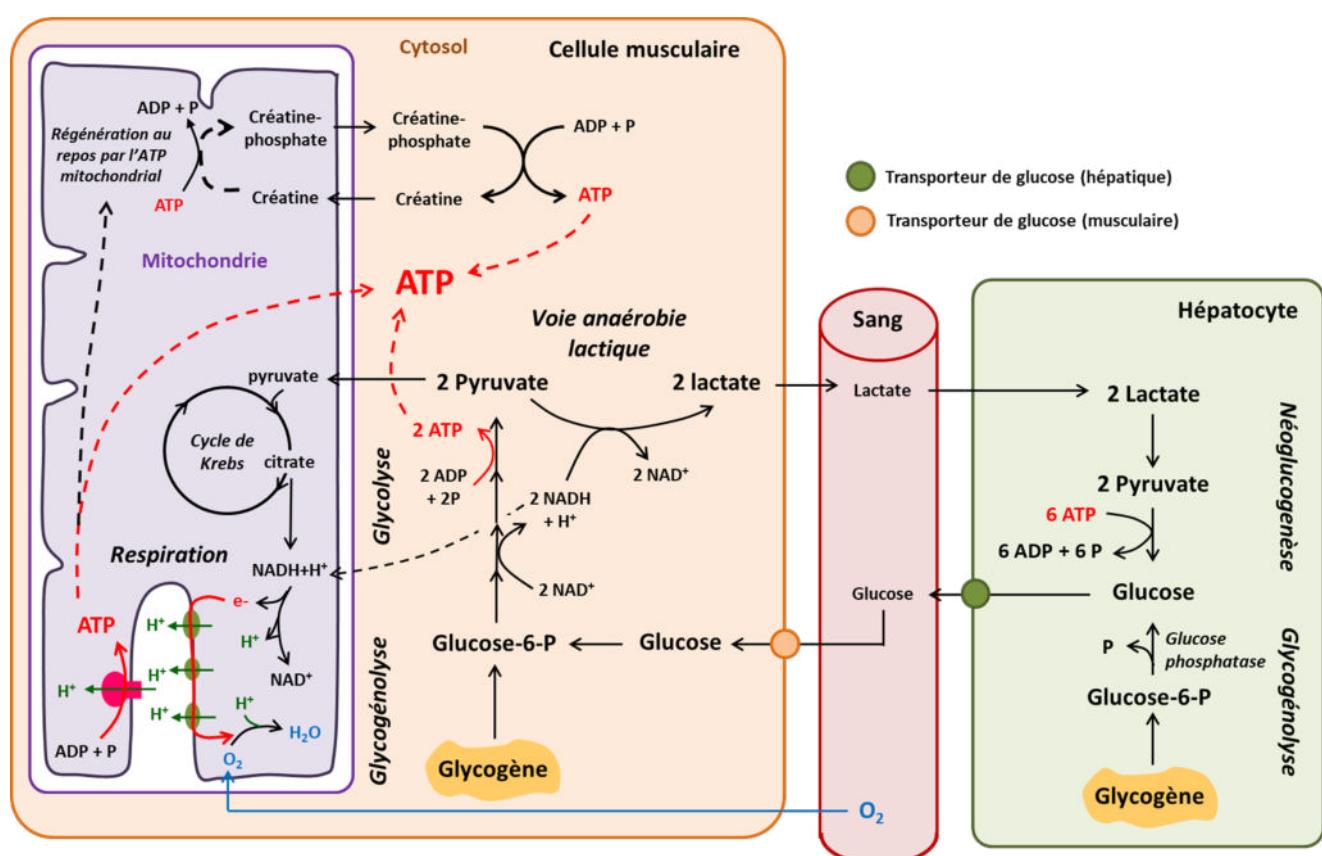
(1) De 0 à 10s, la majorité de l'ATP est produit à partir de la créatine-phosphate (et un peu par fermentation lactique).

(2) À partir de 10s et jusqu'à 50s, c'est la fermentation lactique qui est la voie majeure de renouvellement de l'ATP. La synthèse dépendante de la créatine-phosphate chute très fortement et le renouvellement aérobie augmente.

(3) À partir de 50s et jusqu'à la fin de l'effort, la respiration aérobie est la voie majeure de renouvellement de l'ATP.

Éléments de réponse

Un muscle en activité utilise de l'ATP pour réaliser la contraction musculaire. Les stocks d'ATP de la cellule musculaire au début de l'effort sont très faibles, elle renouvelle donc son ATP selon plusieurs voies métaboliques présentées dans le schéma ci-dessous.



L'importance de ces différentes voies varie (1) au cours du temps pendant un exercice, (2) en fonction de la puissance de l'exercice et (3) avec l'entraînement.

(1) Au cours du temps pendant un exercice musculaire, c'est en premier lieu la voie de la créatine-phosphate puis celle de la fermentation anaérobique lactique et enfin la respiration aérobie mitochondriale qui sont les voies majeures d'approvisionnement en ATP (**doc 6**).

(2) Pour un exercice de faible intensité jusqu'à une intensité modérée, les voies aérobie et anaérobie (avec régénération du glucose à partir de lactate via le cycle de Cori) contribuent à l'approvisionnement en ATP (**doc 3 et 4**). Leur contribution respective reste proportionnelle jusqu'à un seuil d'intensité appelé seuil de lactate (**doc 3**). A partir du seuil de lactate, la lactatémie augmente fortement suggérant une contribution plus importante de la voie de régénération anaérobique par rapport à la voie aérobie avec dépassement de la capacité de régénération du cycle de Cori (**doc 3**).

(3) Avec l'entraînement, la capacité de production d'ATP par voie aérobie mitochondriale est fortement augmentée (augmentation du nombre de mitochondries par unité de masse musculaire, augmentation potentielle de l'efficacité de la voie métabolique respiratoire – controversé) par rapport aux autres voies métaboliques (voie de la créatine-phosphate et voie anaérobie lactique) (**doc 6**). Ainsi, le seuil de lactate est plus élevé chez le sujet entraîné que chez le sujet non entraîné (**doc 3**).