



Partie

1

Génétique et évolution

Chapitre	1	Le brassage génétique et la diversité des génomes	28
Chapitre	2	Des mécanismes de diversification des êtres vivants	43
Chapitre	3	De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité	57
Chapitre	4	Un regard sur l'évolution de l'Homme	67
Chapitre	5	La vie fixée chez les plantes, résultat de l'évolution	84

Partie 1 Génétique et évolution

Les objectifs généraux de cette partie

Dans le programme officiel, le thème 1, intitulé « La Terre dans l'Univers, la vie, l'évolution du vivant » regroupe toute la partie « Génétique et évolution » et la partie « Géologie ». Il représente la moitié de l'horaire annuel. Du fait de cette ampleur et de la nature très différente des sujets abordés, les auteurs ont naturellement choisi de scinder ce grand thème en deux parties. D'après les textes officiels du programme, on peut estimer que 25 % environ de l'horaire annuel peut être consacré à chaque partie.

Cette première grande partie du programme, « Génétique et évolution », regroupe elle-même cinq thèmes qui peuvent *a priori* paraître assez différents. C'est pourquoi il est essentiel de bien comprendre le fil conducteur de cette partie afin de ne pas considérer chaque thématique pour elle-même, mais lui donner le sens qu'il convient : chacun des cinq thèmes contribue en effet à construire les notions relatives à cette partie du programme. Il faut donc, dans une certaine mesure, rompre avec l'optique qui était celle de l'ancien programme de Terminale S. Ainsi, la génétique n'est pas abordée pour elle-même, l'évolution n'est pas considérée comme un thème en tant que tel. Dans la continuité de ce qui a été abordé en classes de Seconde et de Première, il s'agit désormais de comprendre comment divers mécanismes, génétiques ou non, assurent une biodiversité qui n'est pas figée.

- Le 1^{er} thème, « Le brassage génétique et la diversité des génomes », sera bien évidemment consacré à l'étude classique des mécanismes de diversification génétique liés à la reproduction sexuée (méiose et ses deux brassages, fécondation). Cependant, il conviendra de bien faire comprendre qu'on a là, à côté des phénomènes de diversification génétique que sont les mutations, un moteur de l'évolution des espèces puisque la reproduction sexuée propose, à chaque génération, des combinaisons génétiques nouvelles, inédites.

- Le 2^e thème, « Des mécanismes de diversification des êtres vivants » est totalement nouveau dans l'enseignement secondaire. Il prolonge et vient compléter l'étude précédente. L'objectif est ici de ne pas réduire les mécanismes de diversification des êtres vivants à la seule reproduction sexuée. D'autres mécanismes de diversification génétique existent et il existe également des mécanismes de diversification des êtres vivants qui ne sont pas génétiques.

- Le 3^e thème, « De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité », complète ce qui a été abordé en classe de Seconde mais s'appuie sur les deux chapitres précédents. On explique en effet que la diversité des populations change au cours du temps, sous l'effet de la sélection naturelle et de la dérive génétique.

- Le 4^e thème, « Un regard sur l'évolution de l'Homme », ne doit pas être considéré comme un chapitre destiné à traiter spécifiquement de l'évolution humaine en la considérant comme un cas à part. Bien au contraire, en réinvestissant les acquis des années et des chapitres précédents, on s'intéresse à l'évolution de notre espèce, *Homo sapiens*, et l'on montre qu'elle peut être étudiée comme toute autre espèce en inscrivant son histoire dans celle, plus générale, des primates.

- Le 5^e thème, « La vie fixée chez les plantes, résultat de l'évolution » réintroduit une part non négligeable de botanique dans l'enseignement des SVT au lycée. Là encore, il faut

bien saisir la cohérence de ce chapitre avec les précédents. La plante sera étudiée comme une « forme de vie » bien différente de la vie animale, notamment parce qu'elle est fixée. L'organisation générale d'une plante ainsi que la diversité des structures particulières possédées par les plantes, remarquablement adaptées aux contraintes de leur milieu, apparaissent alors comme autant de « réussites » évolutives qui n'ont rien à envier aux espèces animales actuelles.

Cette partie du programme s'appuie sur de nombreux acquis, tant du collège que du lycée, qu'il conviendra de mobiliser, sans pour autant les surestimer. Les pages 8 à 12 proposent une sélection non exhaustive de ces acquis. Ces pages permettent de retrouver rapidement quelques notions essentielles. Elles peuvent être utilisées de diverses manières : on peut envisager de les parcourir avant d'aborder un chapitre afin de mobiliser les acquis nécessaires ou bien orienter ponctuellement les élèves vers tel ou tel document, en fonction des besoins. Le déroulement de la mitose, le mécanisme de duplication de l'ADN, l'existence des mutations et des familles de gènes viennent à l'appui du chapitre 1 notamment.

L'existence d'une biodiversité et une première approche des mécanismes de son évolution ont été abordés au collège et en classe de Seconde. Ces acquis seront particulièrement utiles pour les chapitres 2 et 3.

L'organisation générale d'une plante a été vue au collège, ainsi que la formation des fruits et des graines, en lien avec le peuplement des milieux. Ces acquis seront réinvestis au cours du chapitre 5.

Dans le manuel, les cinq chapitres de cette partie correspondent exactement aux cinq thèmes du programme.

Chacun de ces chapitres permet de mettre en œuvre une démarche d'investigation : la première page de chaque chapitre propose quelques documents motivants, permettant de poser les problématiques à résoudre. Les activités pratiques proposées doivent alors être comprises comme autant d'éléments de réponse à ces problématiques.

Pour chaque page d'Activités pratiques, une question suffisamment précise est posée, ainsi que quelques pistes d'exploitation. Cependant, pour chaque double page, les auteurs ont tenu à respecter la liberté pédagogique du professeur : on peut tout aussi bien, en fonction de chaque situation, choisir d'exploiter les documents et activités proposés comme une « tâche complexe », laissant alors aux élèves une autonomie dans la mise en œuvre d'une démarche de résolution ou bien au contraire utiliser les ressources proposées de façon plus guidée.

À la fin de chaque chapitre, une double page « Des clés pour... » propose certains approfondissements ou élargissements culturels (histoire des sciences, histoire des arts). Quelques informations sur les métiers et les parcours de formation, en lien avec les thématiques de chaque chapitre, sont également proposées.

En plus de l'acquisition de **connaissances** et de la pratique du raisonnement scientifique, cette partie du programme permet de développer différentes **capacités** :

- Disséquer (criquet, fleurs) ;
- Réaliser des préparations microscopiques (testicules de criquet, racine, tige, stomates, etc.) ;
- Observer au microscope ;
- Observer à la loupe binoculaire ;
- Utiliser des logiciels (Anagène, Phylogène, etc.) ;
- Modéliser (sélection naturelle, dérive génétique) ;
- Communiquer (schémas, dessins, photographies, etc.).

Une correspondance entre le programme officiel et les chapitres du manuel

Connaissances	Les chapitres du manuel
<p>Le brassage génétique et sa contribution à la diversité génétique</p> <p>La méiose est la succession de deux divisions cellulaires précédée comme toute division d'un doublement de la quantité d'ADN (réplication). Dans son schéma général, elle produit quatre cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde.</p> <p>Au cours de la méiose, des échanges de fragments de chromatides (<i>crossing-over</i> ou enjambement) se produisent entre chromosomes homologues d'une même paire.</p> <p>Les chromosomes ainsi remaniés subissent un brassage interchromosomique résultant de la migration aléatoire des chromosomes homologues lors de la 1^{re} division de méiose. Une diversité potentiellement infinie de gamètes est ainsi produite.</p> <p>Des anomalies peuvent survenir. Un <i>crossing-over</i> inégal aboutit parfois à une duplication de gène. Un mouvement anormal de chromosomes produit une cellule présentant un nombre inhabituel de chromosomes. Ces mécanismes, souvent sources de troubles, sont aussi parfois sources de diversification du vivant (par exemple à l'origine des familles multigéniques).</p> <p>Au cours de la fécondation, un gamète mâle et un gamète femelle s'unissent : leur fusion conduit à un zygote. La diversité génétique potentielle des zygotes est immense. Chaque zygote contient une combinaison unique et nouvelle d'allèles. Seule une fraction de ces zygotes est viable et se développe.</p>	<p>chapitre 1</p> <p>Le brassage génétique et la diversité des génomes (pages 12 à 37)</p> <p>Act. 1 Reproduction sexuée et stabilité du caryotype</p> <p>Act. 2 Le déroulement de la méiose</p> <p>Act. 3 Le passage de la diploïdie à l'haploïdie</p> <p>Act. 4 Le brassage interchromosomique</p> <p>Act. 5 Le brassage intrachromosomique</p> <p>Act. 6 La fécondation, autre source de diversité génétique</p> <p>Act. 7 Des accidents au cours de la méiose</p>
<p>Diversification génétique et diversification des êtres vivants</p> <p>D'autres mécanismes de diversification des génomes existent : hybridations suivies de polyploïdisation, transfert par voie virale, etc.</p> <p>S'agissant des gènes impliqués dans le développement, des formes vivantes très différentes peuvent résulter de variations dans la chronologie et l'intensité d'expression de gènes communs, plus que d'une différence génétique.</p> <p>Une diversification des êtres vivants est aussi possible sans modification des génomes : associations (dont symbioses) par exemple. Chez les vertébrés, le développement de comportements nouveaux, transmis d'une génération à l'autre par voie non génétique, est aussi source de diversité : chants d'oiseaux, utilisation d'outils, etc.</p>	<p>chapitre 2</p> <p>Des mécanismes de diversification des êtres vivants (pages 38 à 61)</p> <p>Act. 1 Un mécanisme de diversification des génomes</p> <p>Act. 2 Les transferts « horizontaux » de gènes</p> <p>Act. 3 Gènes du développement et plan d'organisation</p> <p>Act. 4 Gènes du développement et morphologie</p> <p>Act. 5 Symbioses et diversité des êtres vivants</p> <p>Act. 6 Une transmission culturelle des comportements</p>
<p>De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité</p> <p>Sous l'effet de la pression du milieu, de la concurrence entre êtres vivants et du hasard, la diversité des populations change au cours des générations.</p> <p>L'évolution est la transformation des populations qui résulte de ces différences de survie et du nombre de descendants.</p> <p>La diversité du vivant est en partie décrite comme une diversité d'espèces.</p>	<p>chapitre 3</p> <p>De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité (pages 62 à 81)</p> <p>Act. 1 Mécanismes évolutifs et biodiversité</p> <p>Act. 2 Comprendre l'histoire d'une population</p> <p>Act. 3 L'espèce : des définitions et des critères</p> <p>Act. 4 Des exemples de spéciation</p>

<p>La définition de l'espèce est délicate et peut reposer sur des critères variés qui permettent d'apprécier le caractère plus ou moins distinct de deux populations (critères phénotypiques, interfécondité, etc.). Le concept d'espèce s'est modifié au cours de l'histoire de la biologie. Une espèce peut être considérée comme une population d'individus suffisamment isolés génétiquement des autres populations. Une population d'individus identifiée comme constituant une espèce n'est définie que durant un laps de temps fini.</p> <p>On dit qu'une espèce disparaît si l'ensemble des individus concernés disparaît ou cesse d'être isolé génétiquement. Une espèce supplémentaire est définie si un nouvel ensemble s'individualise.</p>	
<p>Un regard sur l'évolution de l'Homme</p> <p>D'un point de vue génétique, l'Homme et le chimpanzé, très proches, se distinguent surtout par la position et la chronologie d'expression de certains gènes. Le phénotype humain, comme celui des grands singes proches, s'acquiert au cours du développement pré et postnatal, sous l'effet de l'interaction entre l'expression de l'information génétique et l'environnement (dont la relation aux autres individus).</p> <p>Les premiers primates fossiles datent de – 65 à – 50 millions d'années. Ils sont variés et ne sont identiques ni à l'Homme actuel, ni aux autres singes actuels. La diversité des grands primates connue par les fossiles, qui a été grande, est aujourd'hui réduite. Homme et chimpanzé partagent un ancêtre commun récent. Aucun fossile ne peut être à coup sûr considéré comme un ancêtre de l'homme ou du chimpanzé.</p> <p>Le genre <i>Homo</i> regroupe l'Homme actuel et quelques fossiles qui se caractérisent notamment par une face réduite, un dimorphisme sexuel peu marqué sur le squelette, un style de bipédie avec trou occipital avancé et aptitude à la course à pied, une mandibule parabolique, etc. Production d'outils complexes et variété des pratiques culturelles sont associées au genre <i>Homo</i>, mais de façon non exclusive. La construction précise de l'arbre phylogénétique du genre <i>Homo</i> est controversée dans le détail.</p>	<p>chapitre 4</p> <p>Un regard sur l'évolution de l'Homme (pages 82 à 107)</p> <p>Act. 1 Une remarquable proximité génétique Act. 2 L'acquisition d'un phénotype humain ou simien Act. 3 La grande famille des primates Act. 4 La diversité des grands singes Act. 5 Les caractères dérivés propres aux humains Act. 6 Des caractères partagés par de nombreux fossiles Act. 7 Une phylogénie en discussion</p>
<p>Les relations entre organisation et mode de vie, résultat de l'évolution : l'exemple de la vie fixée chez les plantes</p> <p>Les caractéristiques de la plante sont en rapport avec la vie fixée à l'interface sol/air dans un milieu variable au cours du temps. Elle développe des surfaces d'échanges de grande dimension avec l'atmosphère (échanges de gaz, capture de la lumière) et avec le sol (échange d'eau et d'ions). Des systèmes conducteurs permettent les circulations de matières dans la plante, notamment entre systèmes aérien et souterrain.</p> <p>Elle possède des structures et des mécanismes de défense (contre les agressions du milieu, les prédateurs, les variations saisonnières).</p> <p>L'organisation florale, contrôlée par des gènes de développement, et le fonctionnement de la fleur permettent le rapprochement des gamètes entre plantes fixées.</p> <p>La pollinisation de nombreuses plantes repose sur une collaboration animal pollinisateur/plante produit d'une coévolution. À l'issue de la fécondation, la fleur se transforme en fruits contenant des graines.</p> <p>La dispersion des graines est nécessaire à la survie et à la dispersion de la descendance. Elle repose souvent sur une collaboration animal disséminateur/plante produit d'une coévolution.</p>	<p>chapitre 5</p> <p>La vie fixée chez les plantes, résultat de l'évolution (pages 108 à 135)</p> <p>Act. 1 Organisation et développement d'une plante Act. 2 La plante et ses échanges avec l'environnement Act. 3 Les circulations de matières dans la plante Act. 4 Les plantes se protègent contre les agressions Act. 5 La fleur, une organisation en couronnes Act. 6 Le contrôle génétique de la morphogenèse florale Act. 7 Pollinisation et coévolution Act. 8 Dispersion des graines et coévolution</p>

Le brassage génétique et la diversité des génomes

Activités pratiques

1

Reproduction sexuée et stabilité du caryotype (p. 14-15)

Connaissances

En classe de Terminale, on étudie les aspects génétiques de la sexualité en se limitant au cas des organismes pluricellulaires.

La description cytologique de la méiose s'appuie sur le seul cas de la production de gamètes chez les animaux diploïdes à cycle monogénétique.

1. Les intentions pédagogiques

L'objectif de cette première double page peut paraître simple. On aurait cependant tort de négliger cette première activité, tant la maîtrise des notions qu'elle recouvre est déterminante pour l'ensemble du chapitre. En effet, si les élèves ont à ce sujet des acquis non négligeables issus des classes antérieures (Troisième, Seconde et Première), il est indispensable de donner et de savoir utiliser le vocabulaire adéquat : cycle biologique, chromosomes homologues, couples d'allèles, fécondation, méiose, diploïde, haploïde. Tous les professeurs ont pu constater que bien des difficultés des élèves à propos du brassage génétique ont pour origine des confusions qui subsistent à propos de ces notions fondamentales.

Le **document 1** n'est pas nécessairement nouveau pour les élèves : un caryotype d'une cellule somatique humaine a déjà été vu au collège (classe de Troisième). Cependant, ce document permettra d'une part de définir le terme de diploïde, d'autre part de préciser ce que recouvre cette notion (homologie des chromosomes, gènes, couples d'allèles).

De la même façon, le **document 2** permet de définir l'haploïdie. Le choix de présenter un caryotype non classé a l'avantage de conduire l'élève à une analyse attentive du document proposé. Notons qu'il s'agit ici d'un spermatocyte II ; les chromosomes sont donc bichromatidiens mais il est inutile à ce stade de l'étude de mettre l'accent sur cet aspect. Il sera possible d'y revenir par la suite.

Le **document 3** permet, tout en généralisant, d'établir la notion de cycle biologique. À l'aide du **document 4**, on pourra alors situer et définir, d'un point de vue génétique, les événements que sont la fécondation et la méiose.

Remarque : le choix de restreindre l'étude aux animaux est volontaire et parfaitement conforme au programme puisque celui-ci stipule qu'on étudie « *le seul cas de la production de gamètes chez les animaux diploïdes à cycle monogénétique* ».

Il convient donc de bien respecter cette limite, d'autant que le programme de la classe de Terminale S est chargé. L'étude du cycle biologique d'un organisme haploïde n'est donc plus au programme. Même si cela nécessite de rompre avec des habitudes, il serait contre-productif de compliquer cette partie du programme.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : La technique de coloration est spécifique : elle utilise une sonde couplée à un colorant qui reconnaît une région d'un chromosome. On constate que les chromosomes sont groupés par paires qui apparaissent semblables. La technique de coloration montre que ces chromosomes sont constitués des mêmes régions génétiques, placées aux mêmes endroits.

Doc. 1 et 2 : Le caryotype de la cellule somatique humaine présentée par le document 1 montre la présence de 46 chromosomes qui ont regroupés en 23 paires de chromosomes homologues (en fait 22 paires + la paire de chromosomes sexuels XY). Cette cellule est donc diploïde ($2n = 46$).

Le caryotype (non classé) de la cellule à l'origine d'un spermatozoïde, présenté par le document 2, montre que cette cellule ne contient que 23 chromosomes, tous d'aspect différent. C'est donc une cellule haploïde ($n = 23$).

Doc. 3 : Les cellules somatiques du père, de la mère, du nouvel individu ainsi que la cellule-œuf sont diploïdes, alors que les gamètes (spermatozoïde et ovule) sont haploïdes. La fécondation se situe au niveau de la rencontre des gamètes pour former la cellule-œuf. La méiose précède la formation des gamètes.

Doc. 2 et 3 : Chez les animaux, la méiose se déroule dans les organes reproducteurs (testicules, ovaires) puisqu'elle aboutit à la formation de gamètes.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

La reproduction sexuée permet le maintien du caryotype d'une génération à l'autre, grâce à la méiose qui permet de former des gamètes haploïdes et à la fécondation qui réunit ces gamètes haploïdes pour former une cellule-œuf diploïde, ayant donc le même nombre de chromosomes que les cellules somatiques parentales.

Le déroulement de la méiose (p. 16-17)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La méiose est la succession de deux divisions cellulaires précédée comme toute division d'un doublement de la quantité d'ADN (réplication). Dans son schéma général, elle produit quatre cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde.</p> <p>La description cytologique de la méiose s'appuie sur le seul cas de la production de gamètes chez les animaux diploïdes à cycle monogénétique.</p>	<p>Ordonner et interpréter des observations microscopiques de cellules en méiose.</p>

1. Les intentions pédagogiques

Cette double page est entièrement consacrée à une étude pratique permettant d'observer des cellules en méiose. En effet, après avoir constaté que les gamètes sont des cellules haploïdes formées par un organisme dont les cellules sont diploïdes, il est logique de s'interroger sur les mécanismes de ce passage à l'haploïdie.

Le **document 1** montre la possibilité de faire de telles observations en prélevant des testicules de criquet. Cette activité s'inscrit dans la continuité de la double page précédente puisque l'on a vu que, chez les animaux, la méiose se situe au moment de la formation des gamètes, donc dans les organes reproducteurs. Le choix du criquet est guidé par la possibilité de réaliser ces observations en travaux pratiques de lycée. L'utilisation d'un objectif à immersion s'avère nécessaire. Conformément aux exigences du programme, on s'appuie ici uniquement sur des observations concernant la production de gamètes chez les animaux, ce qui exclut l'étude d'observations de la méiose chez les végétaux.

Le **document 2** présente des observations de qualité (obtenues cependant avec du matériel de lycée). Les images ont été classées dans l'ordre, de façon à ce que les élèves puissent utiliser cette planche comme référence pour situer leurs propres observations. Cependant, à ce stade, le schéma du déroulement de la méiose n'est pas fourni, de façon à laisser les élèves chercher et proposer un mécanisme expliquant le passage à l'haploïdie.

Le programme précise que la « *nomenclature des phases de la méiose n'est pas exigible* » : il s'agit du vocabulaire spécifique à la méiose (stades de la prophase : leptotène, zygotène, pachytène, diplotène, diacinèse), qui relève de l'enseignement supérieur. Les étapes de toute division cellulaire (prophase, métaphase, anaphase, télophase) sont en revanche des acquis de la classe de Première S et constituent un vocabulaire incontournable.

Remarques : chez le criquet mâle, l'unique chromosome sexuel apparaît souvent épais et très coloré car il reste très condensé. Il en est de même des chromosomes qui constituent les spermatides.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 et 2 : Les observations à réaliser sont délicates. Les documents du manuel pourront servir d'observations complémentaires ou de substitution.

Doc. 2 : La méiose est constituée de deux divisions successives. Comme le montre la photographie **g**, la méiose permet d'obtenir quatre cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde.

Les photographies **a** à **f** correspondent à la première division de la méiose.

Les photographies **f** à **h** correspondent à la deuxième division de la méiose.

Photographie **a** : les chromosomes commencent à se condenser et à s'individualiser. C'est le début de la prophase de première division de la méiose.

Photographie **b** : les chromosomes sont tous individualisés. C'est la fin de la prophase. On constate que les chromosomes sont regroupés par paires de chromosomes homologues. On compte ainsi 11 paires de chromosomes homologues (« bivalents ») + le chromosome sexuel X qui reste isolé.

Photographie **c** : les paires de chromosomes homologues sont alignées selon le plan équatorial de la cellule. C'est la métaphase.

Photographie **d** : chaque chromosome se sépare de son homologue et migre vers un pôle de la cellule. C'est l'anaphase. On compte 12 chromosomes au pôle supérieur (11 + X) et onze chromosomes au pôle inférieur.

Photographie **e** : la cellule contient deux lots haploïdes de chromosomes regroupés aux deux pôles de la cellule. C'est la fin de l'anaphase, le début de la télophase.

Photographie **f** : on obtient finalement deux cellules haploïdes dont les chromosomes sont restés condensés et bien individualisés. C'est la prophase de la deuxième division de la méiose.

Photographie **g** : chaque cellule se divise à son tour. Cette photographie montre les deux cellules en anaphase de deuxième division.

Photographie **h** : c'est la télophase de deuxième division. Chacune des quatre cellules obtenues contient un lot haploïde de chromosomes.

Doc. 2 : Les cellules obtenues en fin de méiose sont haploïdes. Selon les informations du document, le criquet mâle possède 22 autosomes et un chromosome X. Le partage aboutit donc à 11 chromosomes et 12 chromosomes dont le chromosome X (cas de la cellule de la photo **h**, qui contient 12 chromosomes simples, à une seule chromatide).

Doc. 1 et 2 : Voir page 18.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

La méiose est constituée de deux divisions successives. C'est la première division qui permet le passage à l'haploïdie : les chromosomes homologues se regroupent par paires, puis, au sein de chaque paire, chaque chromosome se sépare de son homologue. La deuxième division de la méiose s'apparente à une mitose classique.

3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique enrichi (version Premium) :** « La dissection des testicules de criquet » (Vidéo).
- **La méiose chez le criquet au cours de la spermatogenèse**
(Les SVT au lycée – Jean-Jacques Auclair)
<http://jean-jacques.auclair.pagesperso-orange.fr/travaux/meiose/meiose%20presentation.htm>
- **Dissection des testicules de criquet et observation microscopique de coupes**
(Site SVT de l'académie de Rennes) :
<http://espace-svt.ac-rennes.fr/applic/meiose/meiose.htm>

Le passage de la diploïdie à l'haploïdie (p. 18-19)

Connaissances	Capacités et attitudes
La méiose est la succession de deux divisions cellulaires précédée comme toute division d'un doublement de la quantité d'ADN (réplication). Dans son schéma général, elle produit quatre cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde.	Représenter schématiquement le déroulement de la méiose à partir d'une cellule diploïde.

1. Les intentions pédagogiques

La démarche proposée dans ce chapitre pour aborder la méiose est une démarche naturaliste, fondée sur l'observation de cellules en méiose. Il est cependant nécessaire de formaliser les observations réalisées en illustrant l'ensemble du phénomène par un schéma. C'est ce que propose le **document 1**. Ce schéma pourra d'ailleurs être directement confronté aux observations réalisées par les élèves et faciliter leur interprétation. Des couleurs différentes ont été utilisées pour représenter les différents chromosomes (mais des couleurs proches pour représenter les homologues) car chaque chromosome porte une information génétique qui lui est propre. Il est cependant possible de réaliser une telle schématisation en utilisant deux couleurs seulement, les chromosomes se distinguant par leur longueur et la position du centromère. En choisissant une cellule possédant six chromosomes au départ, on obtient des cellules haploïdes avec un nombre impair de chromosomes, ce qui évite toute confusion.

Le **document 2** montre que, comme toute division, la méiose est précédée d'une réplication de l'ADN. Ce graphique théorique (dans la pratique, une telle mesure est très délicate) sera bien évidemment mis en relation avec les observations cytologiques : nombre diploïde ou haploïde de chromosomes et état bichromatidien ou monochromatidien de ces chromosomes.

Le **document 3** permet de mettre l'accent sur l'étape déterminante pour le passage à l'haploïdie, c'est-à-dire l'appariement des chromosomes homologues (à noter que l'ensemble entouré en pointillés montre un bivalent avec chiasma).

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : La méiose est une succession de deux divisions. Lors de la première division, les chromosomes apparaissent appariés, chacun avec son homologue. Les deux chromosomes homologues de chaque paire vont se séparer et former deux lots de n chromosomes doubles (à deux chromatides), chacun étant isolé dans l'une des deux cellules filles. Le passage à l'haploïdie a donc lieu lors de cette division. Il n'y a pas d'interphase avant le début de la deuxième division car les chromosomes sont restés dupliqués. La seconde division est semblable à une mitose. Les deux chromatides de chacun des n chromosomes se disjoignent, formant des lots de n chromosomes simples (à une chromatide), qui se répartissent dans 2×2 cellules filles haploïdes.

Doc. 1 et 2 : La méiose est précédée d'une réplication de l'ADN, ce qui explique le doublement progressif de la quantité d'ADN ($2n$ chromosomes doubles dans la

cellule). Lors de la télophase de la première division, le partage des chromosomes et la formation des deux cellules-filles haploïdes conduit à la brusque division par deux de la quantité d'ADN : chaque cellule contient alors n chromosomes doubles (à deux chromatides). Il n'y a pas de réplication de l'ADN avant la deuxième division car les chromosomes sont restés dupliqués. La télophase de la deuxième division explique enfin la seconde division par deux, puisqu'elle correspond à la formation des quatre cellules contenant chacune n chromosomes simples (à une chromatide).

Doc. 1 à 3 : La prophase I de méiose diffère de celle d'une mitose du fait que chaque chromosome s'apparie à son homologue, formant n ensembles appelés bivalents. En mitose, chaque chromosome reste isolé. Cette étape est déterminante puisque cet appariement rend possible la formation de deux cellules possédant chacune un exemplaire de chaque paire d'homologues.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Le passage de la diploïdie à l'haploïdie s'effectue par l'appariement des chromosomes homologues, suivi de leur séparation. Chaque cellule hérite ainsi de l'un des deux chromosomes homologues de chaque paire.

Activités pratiques

4

Le brassage interchromosomique (p. 20-21)

Connaissances	Capacités et attitudes
Les chromosomes ainsi remaniés subissent un brassage interchromosomique résultant de la migration aléatoire des chromosomes homologues lors de la 1 ^{re} division de méiose. Une diversité potentiellement infinie de gamètes est ainsi produite.	Effectuer une analyse statistique simple d'un brassage interchromosomique (en analysant des produits de méiose). L'analyse des produits de méiose se limite aux diplontes par l'étude des descendants issus d'un croisement avec un homozygote récessif pour tous les loci étudiés : la génétique des haplontes n'est pas au programme.

1. Les intentions pédagogiques

Chronologiquement, au cours de la méiose, le brassage intrachromosomique intervient avant le brassage interchromosomique. Cependant, le brassage intrachromosomique est difficile à appréhender tant que l'on n'a pas vu l'existence d'un brassage interchromosomique. C'est la raison pour laquelle les auteurs ont choisi de commencer l'étude pratique par celle du brassage interchromosomique. Dans le bilan du chapitre cependant, l'ordre chronologique (brassage intrachromosomique suivi du brassage interchromosomique des chromosomes ainsi remaniés) est rétabli.

Le **document 1** explique en quoi consiste un croisement-test et précise les conventions d'écriture. L'intérêt du croisement-test doit être bien compris. C'est un outil d'analyse génétique : les résultats obtenus révèlent directement les résultats de la méiose chez l'hétérozygote.

Le **document 2** montre comment mener cette étude chez la drosophile. Il s'agit d'une capacité exigible à l'épreuve d'évaluation des capacités expérimentales. Volontairement, l'interprétation n'a pas été donnée pour en laisser l'initiative aux élèves. La réalisation d'une photographie et l'utilisation d'un logiciel comme Mesurim peut faciliter le comptage.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : Le génotype de l'individu hétérozygote est (a//G) et celui de l'individu récessif (a//a). L'individu hétérozygote produit donc des gamètes de génotypes (a/) et (G/) en égales proportions, alors que tous les gamètes de l'individu récessif sont de génotype (a/). L'échiquier de croisement montrant toutes les fécondations possibles ne contient donc que deux cases (équiprobables puisque les gamètes de l'hétérozygotes ont la même probabilité d'existence) :

	(a/)	(G/)
(/a)	(a//a) Souris blanche	(a//G) Souris grise

On s'attend donc à obtenir des souris blanches et des souris grises en proportions égales, ce qui correspond au résultat observé.

Doc. 2 : Le parent hétérozygote produit quatre types de gamètes en égales proportions, car les deux gènes gouvernant les caractères étudiés sont indépendants, c'est-à-dire localisés sur des chromosomes différents. La séparation des chromosomes constituant chacune de ces deux paires se fait de façon indépendante et aléatoire. En anaphase I, le chromosome porteur de l'allèle « ailes vestigiales » a donc autant de chances de migrer du même côté que l'allèle « corps ébène » que du côté de l'allèle « corps gris ». Et il en est de même pour l'allèle « ailes longues ». De ce fait, les quatre combinaisons obtenues (vg-eb, vg-eb⁺, vg⁺-eb ou vg⁺-eb⁺) sont équiprobables.

Doc. 2 : Comme indiqué précédemment, les 4 génotypes possibles pour les gamètes de l'hétérozygote sont équiprobables. L'individu homozygote ne produit quant à lui qu'un seul type de gamètes : comme il s'agit des allèles récessifs (vg-eb), ceux-ci ne peuvent pas faire écran à l'expression des allèles transmis par l'hétérozygote dans le phénotype des descendants.

Gamètes	(vg ⁺ / ; eb ⁺ /) 25 %	(vg/ ; eb ⁺ /) 25 %	(vg ⁺ / ; eb/) 25 %	(vg/ ; eb/) 25 %
(vg/ ; eb/) 100 %	(vg ⁺ /vg ; eb ⁺ /eb)	(vg/ ; eb ⁺ /eb)	(vg ⁺ /vg ; eb//eb)	vg//vg ; eb//eb)
Phénotypes des descendants	Ailes longues Corps gris	Ailes vestigiales Corps gris	Ailes longues Corps ébène	Ailes vestigiales Corps ébène
Proportion	25 %	25 %	25 %	25 %

Les proportions des descendants dépendent donc uniquement des proportions des gamètes du parent hétérozygote et en sont donc le reflet.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Au cours de la méiose, en anaphase I, la séparation des deux chromosomes homologues de chaque paire est indépendante pour chacune des paires. Ainsi, un chromosome d'une paire pourra être regroupé avec l'un ou l'autre des deux chromosomes homologues de chacune des autres paires. Pour 2n chromosomes, il y a ainsi 2ⁿ assortiments chromosomiques haploïdes différents possibles.

3. Ressources complémentaires

■ Croisements de drosophiles : plaques résultant d'un croisement-test :

- ebony [eb] et vestigial [vg] : Jeulin, Sordalab, Pierron.
- apterous [ap] et sepia [se] : Sordalab.

■ Logiciel Mesurim (site SVT de l'académie d'Amiens) :

<http://pedagogie.ac-amiens.fr/svt/info/logiciels/Mesurim2/Telecharge.htm>

Le brassage intrachromosomique (p. 22-23)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>Au cours de la méiose, des échanges de fragments de chromatides (<i>crossing-over</i> ou enjambement) se produisent entre chromosomes homologues d'une même paire. Une diversité potentiellement infinie de gamètes est ainsi produite.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Effectuer une analyse statistique simple d'un remaniement intrachromosomique (en analysant des produits de méiose). L'analyse des produits de méiose se limite aux diplontes par l'étude des descendants issus d'un croisement avec un homozygote récessif pour tous les loci étudiés : la génétique des haplontes n'est pas au programme. – Illustrer schématiquement le mécanisme du <i>crossing-over</i> et ses conséquences génétiques.

1. Les intentions pédagogiques

L'intérêt d'avoir d'abord étudié un exemple de brassage interchromosomique est de pouvoir fonder cette étude sur l'analyse statistique d'un résultat qui pose un nouveau problème. On initie alors une démarche d'investigation. Le **document 1** propose un tel résultat. Les élèves peuvent d'ailleurs réaliser une étude comparable à celle réalisée précédemment (comptage à l'aide d'une loupe binoculaire). Divers croisements avec brassage intrachromosomique sont proposés par les fournisseurs (*voir ci-dessous*).

Les auteurs ont volontairement proposé ici un résultat différent du croisement le plus souvent étudié (*black-vestigial*) pour mettre à la disposition des professeurs un autre exemple, prouvant de la sorte que ce type de résultat ne constitue pas un cas exceptionnel. La confrontation de plusieurs exemples de brassage intrachromosomique permet en outre de s'interroger sur la signification des pourcentages obtenus et de les mettre en relation avec la distance, plus ou moins grande, séparant les deux gènes.

Le **document 2** propose une démarche intéressante du point de vue du raisonnement scientifique : les résultats obtenus (document 1), appuyés par l'observation de cette photographie doit conduire les élèves à réfuter l'hypothèse avancée pourtant logiquement par Sutton.

L'observation du **document 3** permet alors de proposer un mécanisme explicatif. En lien avec la photographie du document 2, on insistera sur le fait qu'il ne s'agit pas d'un accident mais d'un phénomène général.

Le **document 4** pourra être utilisé pour interpréter les résultats du document 1. Si l'on peut comparer différents cas de brassages intrachromosomiques, ce document permettra d'expliquer la signification du pourcentage plus ou moins élevé de recombinaisons intrachromosomiques.

À l'issue de cette étude, on comprend que le brassage intrachromosomique, loin d'être accidentel, est un puissant mécanisme de diversification génétique des gamètes.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : Comme vu précédemment, on s'attend à ce qu'un croisement-test dans le cas d'individus différant par deux caractères donne quatre phénotypes différents également représentés (voir p. 21). Or ici, les quatre phénotypes ne sont pas équiprobables : deux phénotypes sont sur-représentés et deux autres sous-représentés.

Doc. 1 et 2 : Si l'hypothèse de Sutton était respectée, il ne devrait y avoir que des descendants à phénotypes parentaux, c'est-à-dire deux phénotypes seulement : des drosophiles à ailes vestigiales et yeux bruns et des drosophiles à ailes longues et yeux rouges. Ce n'est cependant pas le cas : les résultats du document 1 montrent que l'allèle portant sur la longueur des ailes ne reste pas toujours associé à l'allèle portant sur la couleur des yeux pourtant situé sur le même chromosome. La photographie du document 2 montre que les chromosomes étroitement accolés en prophase de première division de méiose sont entrecroisés. Il faut donc admettre qu'ils peuvent alors échanger des parties de leurs chromatides.

Doc. 1 à 4 : L'existence des drosophiles à phénotypes recombinés (minoritaires) ne peut s'expliquer que si l'hypothèse de Sutton est fautive. Les chromosomes n'ont pas gardé leur individualité. Un échange de portions de chromatides s'est produit entre les chromosomes homologues. Celui-ci, dû à un chiasma localisé entre les locus des deux gènes étudiés, a conduit à un échange d'allèles entre les deux chromosomes. De ce fait, l'allèle *vg* se retrouve associé à *br*⁺ et l'allèle *vg*⁺ est associé à *br*. Cette recombinaison produit deux gamètes avec des génotypes nouveaux, et il en résulte des individus à phénotypes recombinés.

Cependant, un tel *crossing-over* n'a pas systématiquement lieu entre les locus des deux gènes : les deux phénotypes recombinés sont minoritaires.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les gamètes produits par un même individu résultent d'un double brassage génétique. Au cours de la méiose, des échanges de fragments de chromatides se produisent entre chromosomes homologues d'une même paire, ce qui constitue de nouvelles associations d'allèles. Les chromosomes ainsi remaniés subissent ensuite un brassage interchromosomique résultant de la migration aléatoire des chromosomes homologues lors de la première division de méiose. La diversité des gamètes ainsi produite est potentiellement quasiment infinie.

3. Ressources complémentaires

- **Croisements de drosophiles : plaques résultant d'un croisement-test :**
 - brown [*bw*] et vestigial [*vg*] : Jeulin, Sordalab, Pierron
 - scarlet [*St*] – ebony [*Eb*] (distance courte) : Sordalab
 - sépia [*Se*] – ebony [*Eb*] (distance longue) : Sordalab
- **Logiciel Mesurim** (site SVT de l'académie d'Amiens) :
<http://pedagogie.ac-amiens.fr/svt/info/logiciels/Mesurim2/Telecharge.htm>
- **“On the morphology of the chromosome group in *Brachystola magna* (Walter S. Sutton)”**
(Article publié par Sutton, accompagné d'illustrations).
<http://www.esp.org/foundations/genetics/classical/wss-02.pdf>

La fécondation, autre source de diversité génétique (p. 24-25)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>Au cours de la fécondation, un gamète mâle et un gamète femelle s'unissent : leur fusion conduit à un zygote. La diversité génétique potentielle des zygotes est immense. Chaque zygote contient une combinaison unique et nouvelle d'allèles.</p> <p>La fécondation est abordée à partir d'un exemple choisi chez une espèce animale présentant un cycle monogénétique diplophasique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Observer et interpréter des observations microscopiques relatives à la fécondation. – Réaliser une analyse statistique simple des résultats d'une fécondation. – Décrire schématiquement un exemple de fécondation et ses conséquences génétiques.

1. Les intentions pédagogiques

L'étude de la méiose a été motivée par la recherche des mécanismes assurant le passage à l'haploïdie. Mais cette étude a permis de montrer que la méiose constitue en même temps un mécanisme extrêmement puissant de diversification du génome des gamètes.

Le rôle de la fécondation dans le rétablissement de la diploïdie est très facile à comprendre. L'objectif de cette double page se situe donc au-delà : il s'agit de montrer que la fécondation amplifie la diversification génétique réalisée par la méiose.

Le **document 1** permet, à l'aide de photographies, de comparer les modalités de la fécondation chez deux espèces très différentes (espèce humaine et oursin). Les diverses photographies, de grossissements différents mais comparables pour les deux espèces, permettent de montrer que le processus de fécondation est fondamentalement le même. Conformément au programme, l'accent est mis sur la fusion du matériel nucléaire et la réaction acrosomiale n'est pas détaillée. Le rôle de la membrane de fécondation peut néanmoins être mentionné, car il est simple à comprendre et déterminant pour le maintien du caryotype.

La réalisation de croisement-tests (activités précédentes), très utiles pour l'analyse génétique, ne permet pas de mettre en évidence le rôle de la fécondation en tant que processus de diversification. C'est pourquoi le **document 2** présente un exemple de résultat d'un croisement entre hybrides F1. L'analyse statistique des résultats obtenus en F2 montre que la fécondation réunit au hasard les gamètes des deux parents.

Cependant, l'étude d'un croisement portant sur deux couples d'allèles est très simplificatrice. Dans la réalité, le nombre de gènes est beaucoup plus important et le nombre d'allèles possibles par gènes également. De ce fait, les gamètes produits par l'un des parents sont en général tous génétiquement différents des gamètes produits par l'autre parent.

À l'issue de cette étude, le **document 3** fait le point sur le rôle de la reproduction sexuée dans les processus de diversification des génomes.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : Lors de la fécondation, un spermatozoïde parmi ceux qui entourent l'ovule parvient à traverser la paroi qui entoure celui-ci. Le noyau de ce spermatozoïde se

décondense pour former le pronucleus mâle. Celui-ci fusionne avec le pronucleus femelle (noyau de l'ovule). Le zygote est ainsi formé.

Sur le plan génétique, la fécondation est l'événement qui permet de rétablir la diploïdie en réunissant les chromosomes de deux cellules reproductrices haploïdes.

Doc. 2 :

Gamètes	(A/ ; U/)	(A/ ; p/)	(n/ ; U/)	(n/ ; p/)
(A/ ; U/)	(A//A ; U//U)	(A//A ; p//U)	(n//A ; U//U)	(n//A ; p//U)
(A/ ; p/)	(A//A ; U//p)	(A//A ; p//p)	(n//A ; U//p)	(n//A ; p//p)
(n/ ; U/)	(A//n ; U//U)	(A//A ; p//U)	(n//n ; U//U)	(n//n ; p//U)
(n/ ; p/)	(A//n ; U//p)	(A//n ; p//p)	(n//n ; U//p)	(n//n ; p//p)

Toutes les combinaisons d'allèles sont équiprobables puisque les génotypes des gamètes le sont aussi (les gènes sont sur des chromosomes distincts).

Chaque case du tableau correspond donc à une proportion théorique de 1/16 soit 6,25 %

On devrait donc obtenir en théorie :

- agouti / uni : 9/16 ou 56,25 %
- agouti / piebald : 3/16 ou 18,75 %
- noir / uni : 3/16 ou 18,75 %
- noir / piebald : 1/16 ou 6,25 %

Ceci correspond aux résultats expérimentaux :

agouti / uni : 134/233 = 57,5 %

agouti / piebald 41/233 = 17,5 %

noir / uni : 44/233 = 18,8 %

noir / piebald : 14/233 = 6 %

Doc. 3 : La fécondation amplifie le brassage réalisé à la méiose puisqu'elle correspond à une rencontre au hasard de très nombreux gamètes génétiquement différents. L'ordre de grandeur du nombre de descendants génétiquement différents d'un couple est donc celui de la diversité des gamètes élevée à la puissance 2 (si l'on considère que chaque parent produit la même diversité de gamètes).

Synthèse : réponse au problème à résoudre

La fécondation contribue à la diversité génétique des individus car elle établit l'équipement chromosomique diploïde de la cellule-œuf (première cellule d'un nouvel individu) en réunissant au hasard deux génomes haploïdes parmi la diversité des gamètes mâles et femelles produits par les parents.

3. Ressources complémentaires

■ Manuel numérique enrichi (version Premium) :

« La fusion des noyaux » (Vidéo).

Des accidents au cours de la méiose (p. 26-27)

Connaissances	Capacités et attitudes
Un <i>crossing-over</i> inégal aboutit parfois à une duplication de gène. Un mouvement anormal de chromosomes produit une cellule présentant un nombre inhabituel de chromosomes. Ces mécanismes, souvent sources de troubles, sont aussi parfois sources de diversification du vivant (par exemple à l'origine des familles multigéniques). Seule une fraction de ces zygotes est viable et se développe.	Illustrer schématiquement le mécanisme du <i>crossing-over</i> et ses conséquences génétiques. Illustrer schématiquement les mécanismes expliquant certaines anomalies chromosomiques.

1. Les intentions pédagogiques

La dernière double page de ce chapitre présente les causes et conséquences de certaines anomalies susceptibles d'intervenir au cours de la reproduction sexuée.

Le **document 1** apporte la réponse au problème posé en page d'ouverture du chapitre (page 12), à savoir l'origine d'un caryotype portant une trisomie 21. Les conséquences pour l'individu sont évoquées car il s'agit d'un problème de santé qui intéresse chacun. On trouvera pages 32-33 (« Des clés pour... aller plus loin ») des documents complémentaires sur le dépistage anténatal de telles anomalies. À ce stade de l'étude, on peut expliquer aux élèves que tous les zygotes ne sont pas viables, beaucoup d'anomalies du caryotype étant spontanément éliminées. Pour élargir l'étude, un autre cas, probablement moins connu des élèves, est présenté par le **document 2**. On comprend ainsi l'importance du bon déroulement de la méiose. Concernant le syndrome de Turner, il est important de souligner les progrès rendus possibles par une meilleure prise en charge des individus porteurs de cette anomalie. Le **document 3** se situe à une toute autre échelle. On envisage en effet les conséquences, pour l'espèce, d'un *crossing-over* anormal. Les élèves ont déjà vu, en classe de Première à propos des gènes des pigments rétiens, l'existence d'une famille multigénique. Le document de la page 9 permet de remobiliser cet acquis. Cependant, aucune explication n'avait été apportée quant à l'origine du mécanisme de duplication génique. Ce document explique le mécanisme en cause et apporte la preuve de la réalité du phénomène dans le cas d'un exemple ayant un impact évolutif : on pourra reprendre cet exemple au cours du chapitre 4 consacré à l'évolution humaine. On insistera sur le fait que le *crossing-over* inégal reste un événement exceptionnel, une anomalie pouvant se révéler bénéfique. Remarquons que le *crossing-over* peut aussi provoquer une perte de gènes, dont le rôle dans l'évolution des espèces n'est pas négligeable (voir doc. 4 page 85).

Le **document 4** donne un autre exemple de famille multigénique et montre comment l'histoire d'une famille de gènes peut être reconstituée. Une telle reconstitution peut facilement être réalisée avec le logiciel Phylogène.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : Si les deux chromatides d'un chromosome 21 se séparent correctement en anaphase II, mais migrent dans la même cellule, la cellule reproductrice comportera alors deux chromosomes 21 et la fécondation aboutira à une cellule-œuf portant une trisomie 21.

Doc. 1 et 2 : L'individu atteint du syndrome de Turner possède un seul chromosome X. L'anomalie provient d'une non-disjonction en anaphase I ou II, d'origine maternelle ou paternelle, comme pour la trisomie 21. En première division, les deux chromosomes sexuels ont pu migrer dans la même cellule-fille. La seconde cellule étant alors dépourvue de chromosome X, l'individu obtenu après fécondation avec un gamète de caryotype normal (ovule ou spermatozoïde comportant un chromosome X) contient alors un seul chromosome X.

Doc. 3 et 4 : L'accident chromosomique présenté permet la duplication d'un gène. Le gène de l'amylase est ainsi présent en plusieurs exemplaires chez un individu d'une population ayant un régime alimentaire riche en amidon. La production d'amylase est donc plus élevée, ce qui correspond au régime alimentaire de l'individu.

Un tel mécanisme enrichit ainsi le génome et permet l'apparition de gènes, qui, en accumulant des mutations, permettent la production de nouvelles protéines et la réalisation de nouvelles fonctions par les cellules.

Doc. 4 : Plus une duplication est ancienne et plus les duplicata, ayant accumulé des mutations, sont différents. Le gène ancestral s'est d'abord dupliqué une première fois, puis les deux duplicata se sont différenciés par mutation. Une seconde duplication a eu lieu plus tard, permettant à l'un des deux duplicata de donner les gènes alpha et zêta. Sur l'autre branche de l'arbre de parenté des globines, le second gène issu du gène ancestral s'est dupliqué lui aussi, et chacun des duplicata s'est dupliqué à son tour. On aboutit ainsi à quatre gènes assez ressemblants puisque de duplication récente.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Au cours de la méiose, il peut se produire différentes anomalies : mauvaise répartition des chromosomes au cours de l'anaphase, *crossing-over* inégal.

C'est ainsi que se produisent les anomalies du nombre de chromosomes, dont les conséquences sont en général graves : non viabilité du zygote, troubles importants pour les individus porteurs de telles anomalies.

Un *crossing-over* inégal a pour effet de doter certains individus de deux exemplaires d'un même gène et est ainsi à l'origine d'une famille multigénique. De tels accidents jouent un rôle important dans l'évolution des espèces.

3. Ressources complémentaires

■ Logiciel Phylogène :

<http://acces.ens-lyon.fr/evolution/logiciels/phylogene>

Pour la partie « **Maîtriser ses connaissances** » :

- la correction des exercices « **Pour s'entraîner** » figure à la fin du manuel de l'élève, pages 396 à 401 ;
- la correction de la partie « **Objectif BAC** » comporte seulement une correction des QCM ; en effet, les questions de synthèse sont des restitutions de connaissances où toute liberté est laissée à l'élève pour construire une réponse organisée.

7 Les anomalies chromosomiques

QCM

Les bonnes réponses sont : **1-c ; 2-d ; 3-a.**

8 Nouveaux gènes, nouvelles fonctions

Le document 3 montre que les trois hormones sont très ressemblantes :

- AVT / OT : 1 acide aminé différent ;
- OT / ADH : 2 acides aminés différents ;
- AVT / ADH : 1 acide aminé différent.

Le document 2 montre que les gènes codant ces hormones sont proches eux aussi :

- AVT / OT : 2 nucléotides différents ;
- OT / ADH : 5 nucléotides différents ;
- AVT / ADH : 4 différences pour 27 nucléotides.

On a donc ici trois gènes apparentés, il s'agit d'une famille multigénique.

Puisque trois gènes sont présents, il y a donc eu deux duplications géniques. La plus ancienne a conduit à l'obtention des gènes AVT et OT. Initialement identiques, les deux duplicata se sont différenciés par accumulation de mutations ponctuelles. La duplication a eu lieu il y a plus de 360 millions d'années, puisque les amphibiens possèdent ces deux hormones et que leurs plus anciens représentants ont cet âge.

Par le même raisonnement, ADH est issu d'une duplication plus récente (200 millions d'années), probablement à partir du gène AVT, puisque c'est entre ces deux gènes que le nombre de différences est le plus faible.

9 Un zygote particulier

La cellule-œuf contient trois pronucleus au lieu de deux et, selon le caryotype présenté, est triploïde (trois exemplaires de chacun des chromosomes). On peut penser que lors de la fécondation, deux spermatozoïdes ont pénétré simultanément dans l'ovule. Les trois pronucleus sont donc celui de l'ovule et ceux des deux spermatozoïdes. Chacun des pronucleus contenant un lot haploïde de chromosomes (n), il y a donc $3n$ chromosomes.

10 Le syndrome de Klinefelter

L'individu présenté a des troubles du phénotype sexuel. Son caryotype montre la présence de trois chromosomes sexuels XXY au lieu de deux (XX ou XY).

Lors de la méiose chez l'un des parents, une non disjonction s'est produite pour les chromosomes sexuels, conduisant à un gamète à 24 chromosomes dont deux chromosomes sexuels (X et Y si l'anomalie s'est produite chez le père, XX si c'était chez la mère). La fécondation avec un gamète normal (à 23 chromosomes dont un chromosome sexuel X ou Y selon le cas envisagé) aboutit à un caryotype à 47 chromosomes dont X, X et Y.

Origines possibles de cette anomalie :

- Non disjonction XX chez la mère (en première ou deuxième division de méiose) + fécondation avec spermatozoïde Y ;
- Non disjonction XY chez le père (nécessairement en 1^{re} division de méiose) + fécondation avec ovule (nécessairement X).

L'explication peut s'appuyer sur un schéma comme celui présenté par le document 1 page 26.

11 Des phénotypes diversifiés

Si l'hypothèse proposée est exacte, et en choisissant « n » pour noir et « b » pour blanc sale, on peut écrire ainsi les génotypes des individus :

Croisement 1 : « noir » (n/n) × (b/b) « blanc sale ».

Les individus étant de souche pure, ils sont homozygotes. Ils produisent des gamètes de génotype respectivement (n/) et (b/), donc les descendants ont tous pour génotype (n/b) et sont de phénotype « bleu andalou ».

Croisement 2 : « bleu andalou » (n/b) × (b/b) « blanc sale ».

Étant hétérozygote, le poulet bleu andalou produit des gamètes de génotypes (n/) et (b/) en égales proportions, et le parent blanc sale de génotype (b/). On obtient donc deux génotypes équiprobables pour les descendants : (n/b) « bleu andalou » et (b/b) « blanc sale », en égales proportions.

L'hypothèse formulée permet d'expliquer les résultats obtenus : elle peut donc être validée.

12 L'analyse statistique d'un croisement

Cet exercice peut compléter les Activités pratiques 4 et 5. On veillera à l'écriture correcte des génotypes et à la rigueur du raisonnement.

Des mécanismes de diversification des êtres vivants

Activités pratiques

1

Un mécanisme de diversification des génomes (p. 40-41)

Connaissances	Capacités et attitudes
D'autres mécanismes de diversification des génomes existent : hybridations suivies de polyploïdisation, transfert par voie virale, etc.	Étudier les modalités d'une modification du génome.

1. Les intentions pédagogiques

Le propos de cette double page est de présenter un premier mécanisme à l'origine d'une diversification des êtres vivants par diversification des génomes (en dehors des brassages chromosomiques lors de la méiose et de la fécondation, étudiés dans le chapitre précédent). Il s'agit ici d'envisager l'hybridation suivie de polyploïdisation à partir d'un exemple concret : l'espèce *Spartina anglica*. L'histoire de cette espèce, ainsi que certaines de ces caractéristiques, sont donc présentées. Il s'agit ensuite de généraliser en montrant des mécanismes possibles à l'origine d'une espèce polyploïde et en soulignant l'importance évolutive de la polyploïdisation.

Le **document 1** présente donc le cas précis de l'espèce *Spartina anglica*. Les observations de terrain réalisées par des scientifiques permettent de retracer son histoire. Des analyses d'ADN de trois espèces de spartine apportent des arguments concrets en faveur du scénario historique présenté.

Le **document 2** présente un mécanisme possible de formation d'une espèce polyploïde. Un autre mécanisme est présenté par l'exercice 8 page 59.

Le **document 3** illustre l'idée actuelle que l'on a de l'importance évolutive des phénomènes de polyploïdisation chez les êtres vivants. On peut parfois penser que la polyploïdisation est importante uniquement chez les végétaux ; ce document montre l'importance de ces mécanismes également dans les autres lignées.

Il est également possible de compléter cette approche avec le document « Des clés pour... aller plus loin », page 57.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 et 2 : Le croisement entre un individu de l'espèce *Spartina maritima* et un individu de l'espèce *Spartina alterniflora* est possible, bien qu'il s'agisse de deux espèces différentes. De fait, les individus hybrides issus de tels croisements sont stériles mais

peuvent se reproduire via une reproduction asexuée. Ainsi, les individus de l'espèce *S. townsendii* sont bien stériles puisque la méiose est rendue impossible par la présence de chaque chromosome en un unique exemplaire.

Une succession d'événements comme ceux décrits par le document 2 permet d'expliquer l'apparition, à partir de *Spartina townsendii*, de l'espèce fertile *Spartina anglica*. Une non séparation lors d'une mitose incomplète aboutit à rétablir des paires de chromosomes homologues. Les méioses redeviennent alors possibles.

Ainsi *Spartina anglica* possède $2n = 122$ chromosomes.

Doc. 1 : La seconde partie du document 1 montre un gel d'électrophorèse de fragments d'ADN des espèces *Spartina alterniflora*, *Spartina maritima* et *Spartina anglica*. Il apparaît que cette dernière possède des fragments d'ADN identiques aux deux premières espèces : elle possède bien à la fois le génome de *S. alterniflora* et de *S. maritima*.

Doc. 3 : Les événements de polyploïdisation connus sont très nombreux dans les lignées végétales. Un événement est actuellement connu dans la lignée des Mycètes et quelques événements dans les lignées animales. Il apparaît clairement que les événements de polyploïdisation ont été nombreux dans l'histoire évolutive des êtres vivants. Il s'agit donc d'événements qui ont joué un rôle important dans la diversification et l'évolution des êtres vivants.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Un individu est dit polyploïde s'il possède plus de deux jeux complets de chromosomes. Ainsi, par la combinaison d'au moins deux génomes existants, de nouvelles espèces apparaissent. Elles présentent des combinaisons de génomes originales et donc des caractéristiques nouvelles propres. De la diversification a donc été générée.

Les transferts horizontaux de gènes (p. 42-43)

Connaissances	Capacités et attitudes
D'autres mécanismes de diversification des génomes existent : hybridations suivies de polyploïdisation, transfert par voie virale, etc.	Étudier les modalités d'une modification du génome.

1. Les intentions pédagogiques

Cette double page présente un deuxième mécanisme de diversification des êtres vivants, cette fois-ci hors reproduction sexuée. Il s'agit de transferts de gènes dit horizontaux, c'est-à-dire entre individus de la même espèce ou non.

Le **document 1** présente des données *a priori* contradictoires et qui impliquent d'imaginer de nouveaux mécanismes biologiques. En effet, les élèves connaissent les arbres de parentés et ceux-ci peuvent représenter pour eux une « vérité » sur l'histoire phylogénétique d'un groupe d'êtres vivants. Ici, deux arbres de parenté différents sont obtenus, en utilisant les mêmes êtres vivants mais des séquences d'ADN différentes. Comment cela est-il possible ? Ces données méritent d'être présentées de manière brute aux élèves afin que le questionnement vienne d'eux-mêmes. Le processus biologique permettant d'expliquer cette apparente contradiction est le transfert horizontal de gènes : on comprend alors pourquoi certains gènes n'ont pas la même histoire que les êtres vivants qui les portent.

Le **document 2** propose d'illustrer comment concrètement ces transferts horizontaux sont possibles. Deux modalités sont proposées : les transferts dans une cellule d'ADN libre dans le milieu et les transferts par voie virale. Un autre type de transfert peut avoir lieu de manière spécifique entre bactéries, il n'est pas présenté ici mais a une importance tout particulièrement dans la dynamique des résistances aux antibiotiques. Cette approche peut être complétée par l'exemple du placenta de certains mammifères : voir « Des clés pour... aller plus loin », page 57.

Le **document 3** illustre une conséquence conceptuelle de la prise en compte des transferts horizontaux dans l'histoire évolutive des êtres vivants. Les arbres évolutifs deviennent des réseaux, traduisant ainsi la complexité réelle de ces histoires.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 et 2 : Un des arguments les plus forts en faveur de l'existence de transferts horizontaux de gènes est l'obtention d'arbres de parenté contradictoires. Des études génétiques (par exemple la recherche de séquences typiquement virales dans le génome humain) permettent également de les mettre en évidence.

Doc. 1 et 2 : Deux mécanismes de transferts horizontaux de gènes sont illustrés ici : le transfert d'ADN libre dans le milieu et le transfert par voie virale. Ces deux mécanismes concernent aussi bien les eucaryotes que les procaryotes.

Doc. 3 : Une meilleure connaissance des mécanismes évolutifs nous permet de prendre conscience que toute l'histoire des êtres vivants ne se résume pas à leur histoire généa-

logique *via* la reproduction sexuée ; d'autres mécanismes peuvent intervenir (comme les transferts horizontaux) et complexifier la représentation que nous avons de l'histoire du vivant.

Doc. 1 à 3 : Si un gène appartenant à un individu peut être transféré à un autre individu (de la même espèce ou non), intégré à son génome et transmis de manière stable à ses descendants, alors on peut affirmer que de la diversification est possible sans mutation et hors reproduction sexuée.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Un gène peut être transféré d'un individu à un autre, que ce dernier appartienne à la même espèce ou non. Nous connaissons actuellement plusieurs mécanismes expliquant de tels transferts, comme les transferts par voie virale. L'individu receveur subit donc une modification de son génome et son phénotype peut en être modifié.

L'importance de ces transferts semble variable puisque le génome humain contiendrait 10 % de séquences d'origine virale et le génome du maïs 50 %. Ces pourcentages, loin d'être anecdotiques, sont cependant une approche quantitative ; l'approche qualitative de l'importance évolutive des transferts horizontaux est beaucoup plus complexe.

3. Ressources complémentaires

- **Un gène d'origine rétrovirale essentiel pour la formation du placenta**
CNRS – Institut des Sciences Biologiques – UMR 8122 :
<http://www.cnrs.fr/insb/recherche/parutions/articles09/t-heidmann.htm>
- **Virus et hommes, un destin commun ?**
Par Patrick Forterre, La Recherche n° 459 – Janvier 2012

Gènes du développement et plan d'organisation (p. 44-45)

Connaissances	Capacités et attitudes
S'agissant des gènes impliqués dans le développement, des formes vivantes très différentes peuvent résulter de variations dans la chronologie et l'intensité d'expression de gènes communs, plus que d'une différence génétique.	Comparer des gènes du développement pour en identifier les homologies de séquences. Interpréter un changement évolutif en termes de modification du développement.

1. Les intentions pédagogiques

L'idée principale de cette double page est qu'un même ensemble de gènes responsables de la mise en place du plan d'organisation est présent chez de très nombreux êtres vivants. Pourtant, ces gènes contrôlent la mise en place de plans d'organisation différents. Il s'agit encore une fois d'une contradiction apparente.

Les **documents 1 et 2** mettent en évidence l'existence de cet ensemble de gènes communs, que l'on peut appeler les gènes architectes ou du développement. Les gènes homéotiques (que l'on peut définir comme les gènes qui déterminent la mise en place des organes) appartiennent à ce grand groupe de gènes.

Le **document 2** explique comment des gènes s'exprimant dans des territoires différents sont à l'origine de plans d'organisation différents. Il s'agit ici de deux gènes homéotiques *hox-c6* et *hox-c8*, dont l'étendue d'expression conditionne le nombre de vertèbres thoraciques et la présence de membres antérieurs.

Le **document 3** présente comment des chronologies d'expression différentes engendrent des plans d'organisation différents. Ainsi, les gènes *Abd-A* et *Ubx* ne s'expriment que chez l'adulte et impliquent l'absence d'appendices sur l'abdomen contrairement à ce qui se passe chez la chenille.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents :

Doc. 1 : Ce document s'intéresse à l'ensemble des êtres vivants présentant une symétrie bilatérale et appelés bilatériens. Il existe des bilatériens avec des plans d'organisation très différents (par exemple une drosophile, un poisson zèbre et une souris). Néanmoins, ces êtres vivants partagent de nombreux gènes (dont les gènes homéotiques) impliqués dans la mise en place des plans d'organisation.

Ainsi se construit la notion de gènes communs permettant la mise en place de plans d'organisation différents.

L'illustration permet d'aborder quelques notions sur les gènes homéotiques : ceux-ci conservent une organisation commune sur les chromosomes et leur position sur le chromosome est corrélée à leur région d'expression dans l'axe antéro-postérieur.

Les couleurs communes indiquent que les gènes sont issus d'un même gène ancestral. Ainsi, au cours de l'évolution, des outils communs sont conservés même si leur utilisation varie.

Doc. 2 : Il s'agit de comparer des séquences de plusieurs gènes homéotiques appartenant à l'espèce humaine puis de comparer un gène architecte impliqué dans la formation de l'œil chez la drosophile, la souris et l'Homme.

Ainsi, le nombre de différences entre deux gènes architectes appartenant à l'Homme est du même ordre que le nombre de différences entre deux gènes architectes appartenant aux espèces présentées.

On interprète ces similitudes de séquences comme étant la preuve d'une origine commune de ces gènes. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que les espèces présentées ont hérité ces gènes d'un ancêtre commun : on dit que ces séquences sont homologues.

Doc. 3 : On compare les zones d'expression de deux gènes (hox-c8 et hox-c6) chez le poulet et chez le python. On remarque que chez les poulets, les membres se développent en avant et en arrière des zones d'expression. Chez le python, ces zones d'expression se chevauchent beaucoup plus et sont très étendues en particulier vers l'avant. Cette extension de la zone d'expression explique l'inhibition du développement des pattes antérieures. (L'absence des membres postérieurs implique d'autres mécanismes.)

Doc. 4 : Chez les insectes, l'expression du gène Dll induit le développement d'appendices. En revanche, l'expression de certains gènes homéotiques (Abd-A et Ubx) inhibe l'expression de Dll. Ainsi, la zone d'expression de Abd-A et de Ubx conditionne la zone d'expression de Dll et les zones de développement d'appendices.

Chez la chenille, où Abd-A et Ubx ne s'expriment pas, des appendices sont présents sur la tête, le thorax et l'abdomen (d'où la présence des fausses pattes). En revanche, chez l'adulte, l'expression de Abd-A et Ubx au niveau de l'abdomen inhibe l'expression de Dll et le développement des pattes. L'adulte porte des appendices uniquement sur la tête et le thorax.

Doc. 3 et 4 : Les gènes du développement jouent un rôle très important en modulant l'expression d'autres gènes. Ainsi, dans le document 3, l'expression des gènes hox-c8 et hox-c6 inhibe l'expression de gènes impliqués dans le développement des pattes. Dans le document 4, le gène Dll déclenche l'expression d'autres gènes impliqués dans le développement d'appendices alors que l'expression de Abd-A et Ubx inhibe l'expression de ces mêmes gènes.

Doc. 1 à 4 : Il apparaît donc que les gènes architectes peuvent être vus comme des « outils » existant pour certains depuis longtemps. Par exemple, les gènes homéotiques existaient déjà chez l'ancêtre commun à la drosophile et à la souris. Cet ensemble commun de gènes permet néanmoins la mise en place de plans d'organisation différents (organisation du corps, nombre de pattes, présence ou non d'appendices...). Ainsi, il nous apparaît, *a posteriori*, que l'évolution a utilisé une « boîte à outils » mais de différentes façons, à la manière d'un « bricoleur ». Ces différents outils sont des gènes impliqués dans la régulation de l'expression d'autres gènes.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

La plupart des animaux, même éloignés phylogénétiquement, partagent des familles de gènes architectes. Ces gènes, impliqués dans la régulation de l'expression d'autres gènes, permettent la construction de plans d'organisation différents.

Ces gènes dérivent de gènes ancestraux communs et présentent de fortes homologies de séquences.

3. Ressources complémentaires

- Ces gènes qui façonnent la forme des animaux – Futura-sciences :
http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/genetique/d/ces-genes-qui-faconnent-la-forme-des-animaux_555/c3/221/p6/
- Comment les pattes viennent au serpent – Essai sur l'étonnante plasticité du vivant, Dominique Lambert, René Rezsöhazi – Éditions Flammarion

Gènes du développement et morphologie (p. 46-47)

Connaissances	Capacités et attitudes
S'agissant des gènes impliqués dans le développement, des formes vivantes très différentes peuvent résulter de variations dans la chronologie et l'intensité d'expression de gènes communs, plus que d'une différence génétique.	Interpréter un changement évolutif en termes de modification du développement.

1. Les intentions pédagogiques

Des changements évolutifs ont souvent été observés soit sur le terrain soit dans les données fossiles (par exemple des modifications morphologiques graduelles au cours du temps). Il s'agit dans cette double page d'apporter un éclairage nouveau sur ces données : ces changements évolutifs connus et observés peuvent en fait s'expliquer par des expressions différentielles de gènes du développement.

Ainsi, des variations dans l'intensité d'expression de certains gènes du développement peuvent expliquer des variations morphologiques. L'exemple des pinsons de Darwin, présenté dans le **document 1**, illustre cela. Leur histoire évolutive est décrite depuis longtemps mais des données moléculaires récentes apportent une dimension supplémentaire.

Des variations cette fois-ci dans la chronologie de l'expression de gènes du développement peuvent également expliquer des variations morphologiques. C'est ce que montrent les exemples présentés dans le **document 2**.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents :

Doc. 1 : En 1835, Charles Darwin établit une relation entre la forme du bec des pinsons des îles Galápagos et leurs régimes alimentaires.

En 2004, une équipe de chercheurs de l'université de Harvard établit une relation entre la forme du bec des pinsons des îles Galápagos et la chronologie, l'intensité et les zones d'expression du gène Bmp4.

Bmp4 s'exprime dans l'extrémité supérieure du bec chez tous les pinsons du genre *Geospiza* mais de manière plus précoce chez certaines espèces (par exemple chez *G. fortis*) et tardive chez d'autres (par exemple chez *G. scandens*). L'intensité d'expression est plus forte chez certains pinsons (par exemple chez *G. magnirostris*) que chez d'autres (par exemple *G. conirostris*). Il apparaît donc que plus l'intensité d'expression de Bmp4 est précoce et intense, plus le bec est large et fort.

Ces chercheurs ont donc fait l'hypothèse que cette relation observée était en fait une relation de causalité : l'expression plus importante de Bmp4 serait responsable d'une morphologie de bec large. Pour tester cette hypothèse, ils ont construit des poulets transgéniques sur-exprimant ou sous-exprimant le gène Bmp4. Ils ont observé en résultat ce qu'ils avaient proposé en hypothèse à savoir qu'un poulet sur-exprimant Bmp4 (photographie b) a un bec plus large qu'un poulet non modifié (photographie a) tandis qu'un poulet sous-exprimant Bmp4 (photographie c) a un bec plus mince qu'un poulet non modifié.

Doc. 1 : Le gène *Bmp4* est exprimé chez le poulet car il s'agit d'un gène du développement (gène architecte) que l'on trouve chez de nombreux êtres vivants. Il n'est donc pas étonnant que ce gène, présent chez les pinsons, fonctionne également chez le poulet.

Doc. 2 : De l'embryon à l'âge adulte, le développement d'un organisme peut être divisé en stades successifs. Nous nous intéressons ici à la succession des stades et à leurs durées relatives.

En comparaison avec le cerf élaphe, le cerf de Crète a la première phase de son développement beaucoup plus longue et la seconde phase qui a disparu. Le cerf de Crète, bien qu'adulte, présente donc les caractères juvéniles du cerf élaphe (par exemple la petite taille).

La comparaison de minuscules oursins du genre *Hagenawia* montre des différences morphologiques (en particulier sur la longueur du rostre). Ces différences s'expliquent par des variations des durées des trois principaux stades de développement.

Ainsi, les gènes du développement responsables de la mise en place des organismes s'expriment avec des chronologies et des durées précises pour une espèce donnée. Des différences morphologiques entre individus ou espèces peuvent être dues à des variations dans la chronologie d'expression de ces gènes.

Doc. 1 et 2 : Le document 1 montre que des variations morphologiques peuvent s'expliquer par des variations d'intensité d'expression des gènes du développement. Le document 2 montre que des variations morphologiques peuvent s'expliquer par des variations de chronologie d'expression des gènes du développement. Ainsi, des variations d'expression des gènes du développement peuvent être à l'origine d'une diversification des êtres vivants.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Comme les autres gènes, les gènes du développement s'expriment à un moment donné, dans certaines cellules, avec une certaine intensité et pendant un temps donné. Des variations de ces caractéristiques d'expression auront des incidences sur le développement des parties d'organismes touchés par ces gènes et modifieront les caractéristiques morphologiques des individus. Ainsi, des variations d'expression des gènes du développement peuvent être à l'origine d'une diversification des êtres vivants.

Symbioses et diversité des êtres vivants (p. 48-49)

Connaissances	Capacités et attitudes
Une diversification des êtres vivants est aussi possible sans modification des génomes : associations (dont symbioses) par exemple.	Une diversification des êtres vivants est aussi possible sans modification des génomes : associations (dont symbioses) par exemple.

1. Les intentions pédagogiques

Le propos de cette double page est d'illustrer comment des associations entre êtres vivants peuvent générer de la diversité, bien que les génomes de ces êtres vivants ne soient pas modifiés. Nous nous intéressons à des exemples de symbioses, à savoir des associations durables et à bénéfice réciproque entre plusieurs êtres vivants. Ces associations ne sont pas de simples juxtapositions, dans la mesure où des propriétés nouvelles propres à l'association peuvent apparaître.

Le **document 1** est une approche expérimentale des conséquences morphologiques d'une association très courante et très importante sur le plan écologique : les mycorhizes.

Le **document 2** élargit les perspectives et montre que les modifications provoquées par des associations entre êtres vivants peuvent engendrer la production de nouvelles molécules, la production de nouvelles structures ou la production de nouveaux comportements. Il s'agit d'illustrer la diversité des conséquences biologiques de ces associations entre êtres vivants.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents :

Doc. 1 à 4 : Les mycorhizes sont des associations entre des champignons et des racines de végétaux ; cette association est à bénéfice réciproque puisque les champignons bénéficient des matières organiques élaborées par le végétal et que celui-ci voit sa capacité d'absorption d'eau et d'éléments minéraux augmentée par la surface développée par les mycéliums des champignons.

Dans les trois autres cas, l'association entre les deux êtres vivants apporte un bénéfice réciproque (meilleure protection, meilleure nutrition).

Doc. 1 : Un dispositif expérimental simple permet de mettre en évidence l'effet de la présence des champignons sur la croissance d'un végétal. Ici, des plants de basilic sont divisés en deux lots, un lot planté dans une terre stérilisée et enrichie en champignon à mycorhizes et un lot planté dans une terre stérilisée. La taille des plants de basilic est mesurée. Plus le temps de croissance augmente et plus la différence entre les plants mycorhizés et les plants non mycorhizés augmente ; les plants mycorhizés ont une croissance plus importante. Des observations des racines à la loupe ou au microscope permettent de visualiser le mycélium en association avec les racines.

Doc. 4 : Ce document étudie le comportement d'anémones en symbiose avec des algues ou non. Les anémones sont des animaux de mer qui, bien qu'adhérant à un support, possèdent la capacité de se déplacer.

Des anémones, symbiotiques ou non, sont placées dans un aquarium dont une moitié est éclairée et l'autre non. Au début de l'expérience, 50 % des anémones sont à la lumière et 50 % sont à l'obscurité. On observe le déplacement des animaux. Au bout de 14 jours, les anémones non symbiotiques sont toujours réparties à part égale entre la partie éclairée et la partie à l'obscurité. En revanche, environ 98 % des anémones symbiotiques sont du côté de la lumière. Il apparaît bien que l'association de l'algue aux anémones modifie leur comportement.

Doc. 1 à 4 : Les associations entre êtres vivants peuvent :

- Modifier la croissance des partenaires ; c'est le cas des plants de basilic et des champignons à mycorhizes.
- Entraîner la production de nouvelles molécules ; c'est le cas des substances lichéniques produites par des champignons associés à des algues dans des lichens. Le champignon ne produit ces substances qu'en présence de l'algue.
- Entraîner la production de nouvelles structures ; c'est le cas des champignons qui vivent en symbiose avec des fourmis. Ces dernières taillent le champignon. Ce faisant, elles favorisent sa croissance et provoquent l'apparition de nouvelles structures : des boules riches en éléments nutritifs pour les fourmis.
- Entraîner la production de nouveaux comportements ; ainsi, les anémones en symbiose avec des algues se déplacent vers des sources de lumière alors que ce comportement n'existe pas chez les anémones non symbiotiques.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Des associations entre êtres vivants peuvent permettre à ceux-ci de modifier leur croissance (cas des mycorhizes), de produire de nouvelles molécules (cas des champignons des lichens), de produire de nouvelles structures (cas des champignons en symbiose avec des fourmis), de produire de nouveaux comportements (cas des anémones en symbiose avec des algues). Par ces associations, de la diversité phénotypique est créée alors que les génomes des êtres vivants impliqués ne sont pas modifiés.

Une transmission culturelle des comportements (p. 50-51)

Connaissances	Capacités et attitudes
Chez les vertébrés, le développement de comportements nouveaux, transmis d'une génération à l'autre par voie non génétique, est aussi source de diversité : chants d'oiseaux, utilisation d'outils, etc.	Étudier un exemple de diversification du vivant sans modification du génome.

1. Les intentions pédagogiques

Le propos de cette double page est d'illustrer le fait que des caractéristiques nouvelles peuvent apparaître et être transmises de génération en génération par voie non génétique : c'est une autre source de diversification des êtres vivants.

Le **document 1** permet d'aborder la diversité des comportements de chant chez les pinsons d'une même espèce. Le chant d'un oiseau peut se décrire par un motif répété dans le temps ; on constate que le chant de chaque individu est caractérisé par un motif propre. Le **document 2** est une approche expérimentale mettant en évidence l'apprentissage du chant par imitation des adultes.

Le **document 3** évoque la diversité, parfois insoupçonnée, des comportements connus chez les chimpanzés ; certains comportements sont spécifiques à des populations bien précises, ce qui montre bien que la transmission de comportements est « culturelle ». On trouvera, page 56 (« Des clés pour... aller plus loin »), des données récentes sur cette question.

Le **document 4** présente les résultats d'une expérience qui démontre la transmission culturelle d'un nouveau comportement.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents :

Doc. 1 et 2 : Le chant d'un oiseau peut être enregistré et visualisé sur un graphique présentant la fréquence (en kHz) en fonction du temps. Le chant d'un oiseau se compose d'un ou plusieurs motifs qui se répètent de manière régulière dans le temps. Les graphiques des documents 1 et 2, qui représentent les chants de plusieurs oiseaux, permettent d'affirmer que, aussi bien chez l'espèce *Geospiza fortis* (document 1) que chez le Diamant mandarin, les individus adultes présentent des chants qui leur sont propres. Ainsi, il existe, au sein d'une même espèce, une variabilité du chant des oiseaux.

Doc. 2 : La comparaison entre l'enregistrement **a** et l'enregistrement **c** montre la diversité des chants des adultes. La comparaison entre l'enregistrement **b** et l'enregistrement **c** montre la maturation du chant : ainsi le chant d'un jeune est composé de plus de motifs et ceux-ci sont moins bien définis. La comparaison entre l'enregistrement **c** et l'enregistrement **d** montre qu'une structure de chant typique d'un adulte ne peut s'acquérir qu'en présence d'un autre adulte ; en absence d'adulte, le chant est déstructuré. Ainsi, l'acquisition définitive du chant se fait bien par apprentissage en écoutant le chant d'un autre adulte.

Doc. 2 à 4 : Les oiseaux et les chimpanzés apprennent par imitation : dans le premier cas, il s'agit d'une imitation utilisant l'audition et dans le second cas, l'apprentissage est basé sur l'observation.

Doc. 4 : Le comportement étudié dans cette expérience est la capacité à pousser une baguette de bois dans un outil afin d'obtenir de la nourriture. Les individus « experts » sont ceux à qui les chercheurs ont appris à se servir de l'outil : ce comportement nouveau mis en œuvre par les « experts » peut ensuite être observé par les chimpanzés du groupe 1, mais pas ceux du groupe 2.

Aucun individu du groupe 2 n'arrive à utiliser l'objet. Cela montre que l'acquisition d'une telle aptitude n'est pas spontanée.

Douze individus sur les seize du groupe 1 maîtrisent très bien l'outil pendant la période d'expérimentation, mais ils ne sont plus que huit, deux mois plus tard. Lors de la période d'expérimentation, tous les individus du groupe 1 parviennent à utiliser l'outil au moins une fois ; par contre, deux mois plus tard, cinq individus n'arrivent plus du tout à l'utiliser (dont des individus qui y arrivaient très bien deux mois avant, comme les individus 4 et 10).

Cette expérience montre que les chimpanzés apprennent par imitation visuelle ; ils voient les gestes de leurs congénères, en comprennent les conséquences et sont capables de les copier. En revanche, cet apprentissage, ici lié à sept jours d'observation, n'est pas définitif.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Dans l'expérience présentée dans le document 2, un individu élevé isolé de ses congénères présente un chant déstructuré. Cela prouve bien que l'acquisition d'un chant adulte structuré n'est pas uniquement dépendant de l'information génétique de cet individu. C'est bien un mécanisme d'apprentissage par imitation d'autres individus possédant un chant structuré qui permet l'acquisition d'un tel chant. De même, chez les chimpanzés, l'observation des individus experts est nécessaire (mais non suffisante) pour l'acquisition du savoir-faire indispensable au maniement de l'outil. Ces deux exemples illustrent bien que des comportements nouveaux peuvent être transmis par voire culturelle.

Pour la partie « **Maîtriser ses connaissances** » :

- la correction des exercices « **Pour s'entraîner** » figure à la fin du manuel de l'élève, pages 396 à 401 ;
- la correction de la partie « **Objectif BAC** » comporte seulement une correction des QCM ; en effet, les questions de synthèse sont des restitutions de connaissances où toute liberté est laissée à l'élève pour construire une réponse organisée.

5 Les coraux

QCM

Les bonnes réponses sont : **1-a** ; **2-a**.

8 Un autre mécanisme à l'origine d'une espèce polyploïde

Le mécanisme décrit permet d'expliquer comment un génome où $2n = 4$ et un génome où $2n = 6$ peuvent être combinés en un seul génome où $2n = 4 + 6 = 10$.

Avec le même mécanisme un génome où $2n = 10$ et un génome où $2n = 16$ donneront un génome où $2n = 26$ or c'est exactement le nombre de chromosomes d'*Arabidopsis suecica*.

Dans le mécanisme présenté page 41, une hybridation est suivie d'un doublement des chromosomes dû à une mitose anormale. Dans celui présenté ici, ce sont des méioses anormales, c'est-à-dire sans réduction du nombre de chromosomes, qui entraînent la production d'un polyploïde.

9 La transmission du chant chez les pinsons

QCM. Les bonnes réponses sont : 1-c ; 2-c (en effet, la transmission du chant apparaît passer par la voie du mâle mais cette transmission peut être génétique ou culturelle).

10 Un gène du développement

La mise en place des yeux est contrôlée par des gènes du développement.

Chez la drosophile, le gène « eyeless » joue un rôle très important dans la mise en place des yeux composés. L'introduction en divers endroits du gène « eyeless » dans un asticot de drosophile provoque le développement d'yeux ectopiques.

Chez la souris, le gène « Pax6 » joue un rôle très important dans la mise en place des yeux de la souris.

Les organisations des yeux des drosophiles et des souris sont très différentes. Pourtant l'introduction en divers endroits d'un asticot de drosophile du gène de souris Pax6 provoque le développement d'yeux ectopiques de la même manière que si la manipulation est réalisée avec le gène eyeless : les yeux ectopiques formés sont des yeux de drosophiles (et non de souris). Le gène « Pax6 » ne produit pas directement l'œil mais induit la mise en place d'un œil.

Cette expérience illustre le fait que des êtres vivants même très éloignés phylogénétiquement et ayant des plans d'organisation différents partagent des familles de gènes homologues, impliqués dans le développement.

11 Un transfert horizontal de gène

Il s'agit de savoir si une cellule eucaryote (ici une levure) peut intégrer une portion d'ADN libre dans le milieu (ici une portion d'ADN d'origine bactérienne).

Une construction artificielle permet de savoir si le transfert a eu lieu ou non en utilisant un marqueur facilement détectable : la couleur des colonies de levure. Ainsi, la levure de départ est blanche ; si elle intègre la portion d'ADN libre, elle devient rouge.

Résultats de l'expérience : les colonies de levures qui se développent sont rouges.

Interprétation : Les levures placées dans un milieu contenant une portion d'ADN d'origine bactérienne l'ont intégrée et exprime l'information qu'elle porte. Cette expression modifie entre autre la couleur des levures qui, de blanches, deviennent rouges.

Analyse critique : le protocole contient des étapes qui ne peuvent se produire dans la nature. Comment ces transferts de matériel génétique libre dans le milieu vers une cellule se produisent-ils dans la nature ?

De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité

Activités pratiques

1

Mécanismes évolutifs et biodiversité (p. 64-65)

Connaissances	Capacités et attitudes
L'évolution est la transformation des populations qui résulte de ces différences de survie et du nombre de descendants.	Analyser une situation concrète, à partir d'arguments variés (données génétiques, paléontologiques, biologiques, arbres phylogénétiques, etc.).

1. Les intentions pédagogiques

Les mécanismes évolutifs que sont la sélection naturelle et la dérive génétique ont été abordés dans les classes antérieures. Néanmoins, il paraît utile, voire nécessaire, de rappeler et de préciser les caractéristiques et les conséquences de ces processus fondamentaux.

À partir d'un exemple classique, la phalène du bouleau, le **document 1** permet de faire le lien entre survie et reproduction différentielle. Cette notion est importante car c'est là l'origine d'une variation de la fréquence des différentes formes en fonction des conditions de l'environnement.

Le **document 2** propose une définition de la sélection naturelle, mécanisme « automatique et aveugle » :

- automatique, car il y a nécessairement sélection naturelle dès lors que les trois conditions rappelées dans ce document sont réunies ;
- aveugle, car ce mécanisme est non finaliste, sans intention vis-à-vis du résultat produit.

Les organismes vivants, des plus simples aux plus complexes, constituent des ensembles de matière organisés de façon parfois étonnamment fonctionnelle : on s'émerveille souvent devant une « nature bien faite ». En effet, la probabilité pour que de tels systèmes aient pu apparaître par le seul jeu du hasard est infinitésimale. La sélection naturelle constitue le mécanisme proposé par Darwin pour rendre compte de cette improbabilité.

Pour comprendre comment le mécanisme de la sélection naturelle résout ce problème, on peut prendre une image. Un serrurier doit fabriquer, dans le noir, une clef adaptée à une serrure. Produire par chance la bonne clef est hautement improbable (il faudrait plusieurs milliards de tentatives). Mais, si le serrurier peut procéder par légères modifications, en ne gardant à chaque fois que les modifications favorables, alors il finira par fabriquer une clef de forme satisfaisante. La sélection naturelle fonctionne selon ce principe. Parmi un ensemble de modifications aléatoires, elle accumule seulement celles qui se trouvent améliorer le fonctionnement de l'organisme, produisant finalement

une organisation qu'il aurait été improbable de produire d'emblée. Une conséquence de ce mécanisme est que la sélection naturelle provoque l'adaptation, mais en aucun cas l'optimalité.

Le **document 3** propose une approche globale de l'importance du hasard, en soulignant notamment les effets de la dérive génétique.

Une simulation de l'évolution de la fréquence d'un allèle, sous l'effet de la sélection naturelle ou par dérive génétique, peut être réalisée en s'appuyant sur un logiciel tel que « Evolution allélique » (voir ci-dessous les ressources complémentaires).

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents :

Doc. 1 : La fréquence des phalènes du bouleau de couleur claire ou foncée varie en fonction des caractéristiques l'environnement. Dans les régions où les arbres sont couverts de lichens clairs, les phalènes claires sont moins repérées par les prédateurs ; elles ont alors une durée de vie plus longue et une descendance plus importante. En conséquence, leur fréquence augmente, alors que la fréquence des formes foncées diminue (pour les raisons inverses).

Dans les régions où les arbres présentent une écorce foncée, les phalènes foncées sont moins repérées par les prédateurs ; elles ont une durée de vie plus longue et par conséquent une descendance plus importante. Leur fréquence augmente, alors que celle des formes claires diminue.

Ainsi, en fonction des caractéristiques de l'environnement, la survie et la reproduction des deux formes de phalène n'est pas la même : cela se traduit par des différences de la fréquence de ces deux formes.

Doc. 2 : La sélection naturelle est un mécanisme qui se produit si les trois conditions citées sont réunies. C'est le cas dans l'exemple théorique présenté par ce document.

- Il existe une variation entre les individus de la population : les fleurs peuvent être bleues ou jaunes.
- Ces variations sont hérissables (au moins en partie) : les fleurs bleues donnent en principe des fleurs bleues, et les fleurs jaunes donnent en principe des fleurs jaunes.
- Ces variations sont corrélées à une variation du succès reproducteur : les fleurs jaunes ont une descendance plus abondante que les fleurs bleues. On dit que les fleurs jaunes ont un avantage sélectif.

En conséquence, la fréquence des fleurs jaunes évolue : c'est ce qu'on appelle la sélection naturelle.

Il en est de même pour l'exemple des phalènes :

- Il existe une variation entre les individus : les phalènes peuvent être claires ou sombres.
- Ces variations sont hérissables : la couleur des phalènes est déterminée génétiquement.
- Ces variations sont corrélées à une variation du succès reproducteur : en fonction des conditions environnementales, les phalènes des deux formes ont une survie et une reproduction différentielles.

En conséquence, l'abondance relative des deux formes de phalène évolue sous l'effet de la sélection naturelle.

L'origine de la variation est totalement déconnectée des conditions de l'environnement dans lesquelles s'exprime cette variation : dans le cas des phalènes, ce n'est pas la présence ou l'absence de lichen sur les arbres qui est la cause de l'apparition de la mutation responsable de la variété foncée.

Doc. 3 : Les effets du hasard sont présentés dans leur diversité et de manière hiérarchisée. La dérive génétique est replacée dans ce contexte comme l'un des effets possibles du hasard et est définie de la même manière que dans les classes précédentes. On retrouve un résultat déjà évoqué en classe de Seconde : plus une population est petite, plus l'effet de la dérive génétique est important.

D'autres phénomènes aléatoires peuvent avoir un impact sur l'évolution des êtres vivants ; c'est le cas des perturbations majeures imprévisibles comme les incendies, les inondations, les éruptions volcaniques ou, plus rarement, les conséquences d'un impact météoritique.

Doc. 3 : Lors d'une crise biologique, de nombreux groupes d'êtres vivants disparaissent. Ils laissent ainsi des niches écologiques libres ; celles-ci peuvent alors être occupées par des êtres vivants ayant survécu à la crise biologique. C'est ainsi que la disparition des dinosaures a libéré des niches écologiques qui ont ensuite été occupées par des mammifères. La disparition des dinosaures a donc permis l'essor des mammifères.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Une population est un ensemble d'organismes vivant au même endroit, au même moment, et pouvant se reproduire entre eux. Dans une population, tous les individus ne sont pas identiques ; on peut ainsi décrire une population par la fréquence des différentes formes qui la constituent. Au cours des générations, les fréquences des différentes formes peuvent changer : les populations évoluent. Ces fréquences changent sous l'effet de la sélection naturelle et du hasard.

3. Ressources complémentaires

- **Le mélanisme industriel chez la phalène du bouleau (Université de Tours) :**
http://genet.univ-tours.fr/gen001700_fichiers/htm/ch8a/gen12ch8aec1.htm
- **Logiciel « Evolution allélique » (Philippe Cosentino) :**
<http://www.ac-nice.fr/svt/productions/fiche.php?numero=52>

Comprendre l'histoire d'une population (p. 66-67)

Connaissances	Capacités et attitudes
Sous l'effet de la pression du milieu, de la concurrence entre êtres vivants et du hasard, la diversité des populations change au cours des générations.	Analyser une situation concrète, à partir d'arguments variés (données génétiques, paléontologiques, biologiques, arbres phylogénétiques, etc.).

1. Les intentions pédagogiques

Dans la double page précédente, une approche relativement générale nous apprend que les populations évoluent sous l'effet de la sélection naturelle et de la dérive génétique. Pour comprendre et interpréter l'histoire d'une population, il est nécessaire de connaître au préalable ces « forces motrices » de l'évolution des populations.

Cette double page présente un exemple très concret qu'il va être possible d'interpréter. Le cas étudié concerne les populations d'éléphants en Afrique. Dans chaque population existent des individus possédant des défenses et des individus n'en possédant pas. Les individus nés sans défenses sont porteurs d'une mutation inhibant leur croissance. Seules les fréquences des femelles sans défenses sont étudiées car les données concernant les mâles sont plus complexes donc non présentées.

Le **document 1** fait état de différentes variations de la fréquence de ces populations d'éléphants. Il s'agit ici d'identifier les raisons de ces variations et de comprendre dans quelle mesure, sélection naturelle et dérive génétique expliquent les variations constatées.

Le **document 2** montre l'effet d'une sélection naturelle, due à la pression de sélection exercée par le commerce de l'ivoire.

Le **document 3** montre l'impact que peut avoir la dérive génétique dans certaines populations.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents :

Doc. 1 : Le document 1 nous apprend que dans les populations d'éléphants, il existe des individus avec défenses alors que d'autres individus en sont dépourvus et que ce caractère est déterminé génétiquement.

Dans une population sauvage d'Afrique (en Ouganda en 1930), seuls 2 % des individus femelles sont sans défenses. En effet, la sélection naturelle favorise les individus pourvus de défenses puisque celles-ci servent à la recherche de nourriture, à la protection des petits et à la victoire dans les combats.

Doc. 2 : En Zambie, entre 1969 et 1989, le nombre total d'éléphants a diminué (de 35 000 à 6 000) et le pourcentage d'éléphants femelles sans défenses a très nettement augmenté (de 10 à 37 %). En effet, pendant cette période, les populations ont été décimées par des braconniers à la recherche de l'ivoire des défenses. Ainsi, la sélection naturelle est dans ce cas défavorable aux individus à défenses (ceux-ci sont tués et se reproduisent donc moins) et la fréquence des individus sans défenses augmente.

Entre 1989 et 1993, les tendances s'inversent : le nombre d'éléphants augmente et le pourcentage d'éléphants femelles sans défenses diminue. En effet, en 1989, la Zambie a signé un traité interdisant le commerce de l'ivoire et a créé des réserves afin de protéger les éléphants. Leurs conditions de vie redeviennent similaires à celles décrites dans le document 1 pour des populations sauvages. La sélection naturelle est à nouveau favorable aux individus à défenses et leur fréquence augmente (le pourcentage d'individus sans défenses diminue).

Doc. 3 : En Afrique du Sud, la population d'Addo contient un pourcentage particulièrement élevé de femelles sans défenses (98 %).

Entre 1900 et 1931, le nombre d'éléphants a très fortement diminué et le pourcentage de femelles sans défenses a augmenté. On retrouve la même tendance que celle observée entre 1969 et 1989 en Zambie. Pour la population d'Addo, la cause est différente car, entre 1919 et 1920, un chasseur professionnel a réduit la population à 11 individus. Parmi ces 11 individus, 50 % des femelles étaient sans défenses. Ces 11 individus sont à l'origine de la population d'Addo actuelle qui vit dans le parc, construit pour les protéger. Il y a donc eu un fort effet fondateur à l'origine de cette population. Elle compte aujourd'hui 400 individus et 98 % de femelles sans défenses. Dans les conditions de vie régnant dans ce parc, la sélection naturelle n'explique pas ce très fort pourcentage. Celui-ci est simplement dû à l'effet de la dérive génétique s'exerçant sur une population réduite.

La seconde partie de ce document montre les fréquences de différents allèles pour deux locus (ces portions d'ADN ne sont pas codantes) dans trois populations. La diversité génétique est ici représentée par le nombre d'allèles présents dans une population. Dans la population sauvage du parc Kruger, chaque locus présente cinq allèles. Dans la population Addo, il n'existe qu'un seul allèle pour le locus LA 5 et deux allèles pour le locus LA 4. Ainsi, la population d'Addo a la diversité génétique la plus faible (et une diversité génétique très faible dans l'absolu). On retrouve ici un des effets de la dérive génétique, à savoir une perte de diversité génétique.

Doc. 3 : Les politiques de conservation des espèces reposent sur les connaissances biologiques et écologiques que nous avons des espèces. Pour protéger une espèce, il est nécessaire de suivre l'évolution du nombre d'individus mais également de suivre la diversité génétique, puisqu'une faible diversité génétique peut être un signe de danger pour une population.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Dans certaines populations, les femelles avec défenses sont avantagées (pour chercher la nourriture ou défendre les petits) ; la sélection naturelle prédit alors que leur fréquence doit être élevée. C'est le cas en Ouganda.

Dans d'autres populations, les femelles sans défenses sont avantagées (car non chassées par les braconniers) ; la sélection naturelle prédit alors que leur fréquence doit être plus élevée que dans les populations sauvages. C'est le cas en Zambie.

Dans d'autres populations, dont le nombre d'individus a été brutalement réduit, la fréquence des types d'individus devient aléatoire, mais s'accompagne d'une perte de diversité génétique. Dans le cas de la population d'Addo, les individus sans défenses étaient surreprésentés dans la population des survivants. La dérive génétique explique alors la fréquence très élevée des femelles sans défenses dans cette population.

L'espèce : des définitions et des critères (p. 68-69)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La diversité du vivant est en partie décrite comme une diversité d'espèces. La définition de l'espèce est délicate et peut reposer sur des critères variés qui permettent d'apprécier le caractère plus ou moins distinct de deux populations (critères phénotypiques, interfécondité, etc.). Le concept d'espèce s'est modifié au cours de l'histoire de la biologie. Une espèce peut être considérée comme une population d'individus suffisamment isolés génétiquement des autres populations. Une population d'individus identifiée comme constituant une espèce n'est définie que durant un laps de temps fini. On dit qu'une espèce disparaît si l'ensemble des individus concernés disparaît ou cesse d'être isolé génétiquement.</p> <p>Une espèce supplémentaire est définie si un nouvel ensemble s'individualise.</p>	<p>Analyser des informations relatives à la définition des limites d'une espèce vivante. Analyser des exemples d'hybrides interspécifiques fertiles ou non.</p>

1. Les intentions pédagogiques

Depuis longtemps, la notion d'espèce et sa définition ont été l'objet de controverses, de débats et colloques scientifiques. Cette double page propose de faire le point, en apportant un éclairage historique. En effet, nourrie par cette histoire épistémologique riche, la définition de l'espèce a évolué au cours de l'histoire de la biologie. Le **document 1** présente un aperçu des grandes étapes de l'évolution de la pensée scientifique à ce sujet.

Aujourd'hui, un consensus se dégage autour d'une définition théorique de la notion d'espèce, définition qui s'appuie sur la théorie darwinienne de l'évolution : c'est ce que montre le **document 2**.

Puisqu'elle est très théorique, la définition de l'espèce nécessite de déterminer des critères afin de la rendre pratique et opérationnelle. Le **document 3** montre comment on peut déterminer si des individus appartiennent ou non à une même espèce et comment on peut tenter de délimiter une espèce. Ce document sera l'occasion d'exercer un esprit critique, en montrant les obstacles et les limites d'une telle démarche.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents :

Doc. 1 : En biologie, le concept d'espèce permet de recenser les êtres vivants. Mais au cours de l'histoire de la biologie, ce concept s'est modifié et a répondu à différentes définitions.

Doc. 1 et 2 : Le concept pré-darwinien de l'espèce propose que cette entité regroupe tous les êtres vivants qui se ressemblent, se reproduisent et produisent des descendants qui leur ressemblent. La variation est considérée comme une anomalie.

Le concept post-darwinien de l'espèce repose sur la notion de parenté et de variabilité au cours du temps. Ce concept peut inclure la ressemblance mais pas nécessairement.

Cette évolution du concept d'espèce converge actuellement vers une définition théorique consensuelle. Une espèce est à présent définie comme un rameau indépendant du réseau généalogique des êtres vivants. Son existence est temporaire.

Doc. 3 : La définition théorique de l'espèce n'est pas opérationnelle. Comment savoir concrètement si deux individus ou deux populations d'individus appartiennent ou non à la même espèce ? Il convient pratiquement de déterminer des critères permettant de tester des hypothèses d'appartenance à une même espèce.

Doc. 3 : Ces critères peuvent être d'ordre phénétique ou morphologique. Ainsi, deux individus qui se ressemblent appartiennent à la même espèce et deux individus qui ne se ressemblent pas n'appartiennent pas à la même espèce. On perçoit toute la subjectivité de tels critères. Par exemple, le mâle et la femelle de l'espèce *Orgyia recens* ne se ressemblent pas du tout et pourtant ils appartiennent bien à la même espèce. Les fourmis *Formica lugubris* et *Formica paralugubris* se ressemblent et étaient considérées comme appartenant à la même espèce jusqu'à ce qu'en 1996, des données moléculaires prouvent qu'il existait deux sous-ensembles ne se mélangeant pas ; ces deux sous-ensembles constituent désormais les deux espèces distinctes citées.

Ces critères peuvent être d'ordre biologique. Ainsi, si deux individus peuvent se reproduire et engendrer une descendance féconde dans des conditions naturelles, alors ils appartiennent à la même espèce. Cependant, *Aythya ferina* et *Aythya fuligula* appartiennent à deux espèces différentes (comme leurs noms l'indiquent) bien qu'ils puissent se reproduire entre eux. Cependant, étant donné les exigences écologiques de ces deux oiseaux, les hybrides sont très rares.

Chaque critère utilisé est plus ou moins pertinent dans un contexte donné, mais présente aussi des limites. Des individus peuvent être morphologiquement différents mais interféconds donc appartenir à une même espèce. Le critère d'interfécondité a aussi ses limites : dans le monde végétal notamment, les hybrides sont fréquents.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Une espèce est un rameau généalogique d'individus indépendant des autres rameaux du réseau des êtres vivants. Tous les critères permettant de prouver cette indépendance peuvent être utilisés pour définir une espèce ; il peut s'agir de critères utilisant des données morphologiques, moléculaires, biologiques, etc.

Des exemples de spéciation (p. 70-71)

Connaissances	Capacités et attitudes
Une espèce supplémentaire est définie si un nouvel ensemble s'individualise.	Analyser des exemples de spéciation dans des contextes et selon des mécanismes variés à partir de documents fournis.

1. Les intentions pédagogiques

La spéciation est l'apparition d'une ou de plusieurs espèces à partir d'une espèce ancestrale. Cela nécessite un isolement reproducteur entre deux sous-populations de l'espèce ancestrale. Il s'agit donc de comprendre les situations dans lesquelles un isolement reproducteur peut apparaître.

Les modalités de spéciation sont diverses et pas toujours bien élucidées mais différents scénarios sont bien établis. On peut distinguer la spéciation où les deux sous-populations à l'origine des nouvelles espèces sont séparées géographiquement (spéciation allopatrique) et la spéciation se produisant sur un même lieu géographique (spéciation sympatrique). Les cas connus et bien compris de spéciation sympatrique impliquent des séparations écologiques.

Le **document 1** présente un exemple, simple à comprendre, de spéciation allopatrique. Le **document 2** présente un exemple plus complexe mais très bien documenté de spéciation sympatrique.

Remarque : les qualificatifs « allopatrique » et « sympatrique », même s'ils correspondent aux deux situations présentées ici, ne font pas partie du vocabulaire exigible. À travers ces processus de spéciation, l'objectif est avant tout de donner l'idée d'une conception dynamique de la notion d'espèce.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents :

Doc. 1 : Ce document présente un exemple de spéciation avec isolement géographique. L'espèce ancestrale Z aurait été scindée en deux sous-populations lors d'un épisode de glaciation. Chaque sous-population évolue de manière indépendante sous l'effet de la sélection naturelle et de la dérive génétique. À la fin de la période de glaciation, lorsque les aires de répartition sont à nouveau entrées en contact, les individus des deux sous-ensembles avaient divergé de telle sorte qu'ils ne pouvaient plus se reproduire : on a alors affaire à deux espèces distinctes. Les fortes ressemblances morphologiques toujours constatées peuvent être interprétées comme le signe d'un ancêtre commun relativement récent.

Doc. 2 : Une espèce ancestrale a colonisée le lac Apoyo, il y a environ 23 000 ans. Les individus de cette espèce ancestrale avaient un régime alimentaire varié. De fait, les individus de cette espèce ancestrale présentaient des variations morphologiques, en particulier concernant la forme de leur mâchoire.

Lors de la colonisation du lac, les individus hybrides présentant une morphologie de la mâchoire intermédiaire se trouvent contre-sélectionnés car ils ne sont ni adaptés à se nourrir près du rivage ni adaptés à se nourrir en eau profonde. Au contraire, les indi-

vidus qui présentaient un type bien marqué sont avantagés par la sélection naturelle. Ces individus ont tendance à se reproduire avec les individus du même type qu'eux, ce qui conduit à un isolement reproducteur entre deux sous-populations. Ainsi, au sein de la population ancestrale, en un même lieu géographique, deux sous-populations se sont individualisées et ont divergé jusqu'à former deux nouvelles espèces.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Pour qu'il y ait spéciation, il faut que le réseau généalogique (décrit dans la définition théorique de l'espèce) se scinde en deux sous-réseaux indépendants. Il faut donc que se mette en place un isolement reproducteur.

Deux sous-populations isolées sur le plan géographique peuvent diverger et devenir isolées sur le plan reproducteur sous l'effet de la sélection naturelle et/ou de la dérive génétique.

Deux sous-populations non isolées sur le plan géographique mais isolées sur le plan écologique peuvent diverger et devenir deux nouvelles espèces sous l'effet de la sélection naturelle.

EXERCICES

p. 78 à 81

Pour la partie « **Maîtriser ses connaissances** » :

- la correction des exercices « **Pour s'entraîner** » figure à la fin du manuel de l'élève, pages 396 à 401 ;
- la correction de la partie « **Objectif BAC** » comporte seulement une correction des QCM ; en effet, les questions de synthèse sont des restitutions de connaissances où toute liberté est laissée à l'élève pour construire une réponse organisée.

7 La spéciation

Les bonnes réponses sont : **1-c** ; **2-a**.

8 Des chants et des espèces

Si on utilise des critères morphologiques, alors l'ensemble des individus ressemblant à l'individu photographié sera identifiés comme appartenant à l'espèce *Chrysoperla plorabunda*.

Considérons à présent le caractère « chant ». Le chant des mâles attire les femelles en période de reproduction et l'on sait que chaque femelle ne répond qu'à un type de chant donné (on peut faire l'hypothèse que le type de vibration produit par un mâle et la capacité d'une femelle à décoder un chant sont des caractéristiques codées génétiquement). Alors, chaque chant est en fait un indicateur d'unité de reproduction. Il faut alors considérer qu'à chaque chant correspond en fait une espèce, bien délimitée sur le plan reproducteur des autres espèces caractérisées par d'autres chants. Selon le graphique, il y aurait donc non pas une mais trois espèces distinctes.

On voit bien que les critères pertinents sont les critères les plus fins permettant d'identifier des ensembles de reproduction ou des isolements reproducteurs. Si la morphologie est un critère relativement facile d'accès, ce n'est pas toujours l'information la plus pertinente.

9 Les moustiques résistent

On peut identifier deux types d'individus : les individus porteurs de la mutation Ester3, défavorisés en absence d'insecticides mais favorisés en leur présence et les individus non porteurs de la mutation Ester3, favorisés en absence d'insecticides mais défavorisés en leur présence.

Ainsi, on s'attend à ce que les individus résistants soient plus fréquents en présence des insecticides. Or, ces produits ont été épandus le long du littoral donc près de la mer. On s'attend donc à ce que les individus résistants soient plus fréquents vers la mer et moins fréquents lorsque l'on s'éloigne de la mer. C'est en effet ce que montre le graphique : à 50 km de la mer, la fréquence des formes résistantes devient même nulle.

D'autre part, les formes résistantes sont avantagées sur le littoral : on s'attend donc à ce que leur fréquence augmente au cours du temps en fonction de la durée du traitement par les insecticides. Encore une fois, c'est bien ce que montre le graphique.

10 La spéciation chez les palmiers

Une espèce ancestrale a colonisé l'île Lord Howe peu après la formation de celle-ci. On peut imaginer que les individus de cette espèce poussaient sur tous les terrains. Néanmoins, des variations morphologiques sont apparues : certaines favorisant les palmiers poussant sur sols calcaires, d'autres favorisant les palmiers poussant sur sol volcaniques (en effet, les pH de ces deux types de sol sont très différents et ont des conséquences entre autres sur l'absorption racinaire).

Par hasard, dans une des deux sous-populations est apparu un décalage de maturité sexuelle. Ce décalage permet aux individus de chaque sous-population de se reproduire entre eux et évite la production d'hybrides. Or les hybrides sont moins performants car ils ne poussent bien ni sur les sols calcaires ni sur les sols volcaniques. Le caractère responsable du décalage de maturité sexuelle a donc été sélectionné par la sélection naturelle.

Le résultat observable aujourd'hui est l'existence de deux espèces sœurs à maturité sexuelle décalée dans le temps, l'une vivant sur sol calcaire et l'autre sur sol volcanique. C'est un exemple de spéciation sympatrique impliquant un isolement reproducteur lié à des facteurs écologiques et favorisé par la sélection naturelle.

11 Importance relative de la sélection naturelle et de la dérive génétique

L'intérêt de cet exercice est d'étudier l'importance relative de la sélection naturelle et de la dérive génétique. En effet, il peut y avoir à la fois sélection naturelle et dérive génétique.

Les principales conclusions sont :

- La dérive génétique a un effet d'autant plus fort que la population est petite.
- Plus la taille de la population est grande et plus l'effet de la sélection naturelle est déterminant.
- Plus la pression de sélection en faveur d'un allèle est forte et moins la dérive génétique aura d'effet.

Un regard sur l'évolution de l'Homme

Activités pratiques

1

Une remarquable proximité génétique (p. 84-85)

Connaissances	Capacités et attitudes
D'un point de vue génétique, l'Homme et le Chimpanzé, très proches, se distinguent surtout par la position et la chronologie d'expression de certains gènes.	Comparer les génotypes de différents primates.

1. Les intentions pédagogiques

Conformément au programme et à la logique de cette première partie, ce chapitre débute par des aspects génétiques. Il s'agit de montrer que l'Homme et les grands singes actuels, le Chimpanzé en particulier, sont génétiquement très proches. Ceci constituera bien entendu un argument très fort en faveur d'une origine commune récente, ce qui sera développé au cours des activités suivantes. Il ne s'agit cependant que d'une première approche, qui reste globale. La diversité des grands singes sera en effet approfondie et précisée au cours des Activités pratiques 4.

Le **document 1** propose une comparaison de caryotypes. Soulignons qu'il s'agit là d'un document scientifique de qualité qui permet aux élèves d'aiguiser leurs sens de l'observation. Une étude de détail n'est pas possible, mais on peut néanmoins comparer le nombre de chromosomes et leur aspect (longueur, position du centromère). La proximité des chromosomes de l'Homme et des grands singes apparaît alors de façon très frappante. On constate d'ores et déjà que c'est avec le Chimpanzé que les similitudes sont les plus étroites.

Le **document 2** permet de faire une étude plus précise et explique en quoi consistent les événements de remaniements chromosomiques (inversion, translocation, fusion) qui expliquent les différences entre les caryotypes des grands singes. On peut alors établir un lien entre le nombre de remaniements et la proximité génétique des deux espèces. D'ailleurs, les chercheurs spécialisés sur cette question ont pu établir un arbre phylogénétique complet des primates fondé sur les événements de remaniements chromosomiques.

Le **document 3** montre comment faire une étude plus précise : il s'agit d'effectuer une comparaison par « blocs », avec un degré de définition choisi, entre les chromosomes de deux espèces. On peut alors montrer l'existence de « synthénies », c'est-à-dire de blocs conservés. L'existence de remaniements, par exemple ici une série inversée, apparaît très clairement.

Le **document 4** propose des informations précises, chiffrées, issues de la comparaison du séquençage du génome de l'Homme et du Chimpanzé. La très grande similitude des séquences nucléotidiques a donc pu être chiffrée. L'activité suivante montrera

comment ces relativement faibles différences génétiques peuvent suffire à expliquer les différences phénotypiques entre les deux espèces. Néanmoins, il peut être intéressant d'aller un peu plus loin et de relever l'importance des duplications géniques dont l'origine a été expliquée au cours du chapitre 1.

Remarque : dans ce chapitre, les auteurs ont choisi, exceptionnellement, d'écrire le mot Homme avec une majuscule pour désigner l'espèce (les deux sexes confondus) afin de lever toute ambiguïté avec la désignation du seul sexe masculin. Pour ne pas introduire de hiérarchie entre les espèces, l'emploi de la majuscule a, dans ce chapitre, également été choisi pour désigner les autres espèces.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 à 4 : Le document 1 montre que les caryotypes de l'Homme et des grands singes sont très proches : 46 chromosomes pour l'espèce humaine, 48 chromosomes pour les trois autres espèces. Une étude comparée révèle de grandes similitudes entre les chromosomes : même taille, même position du centromère. Il existe néanmoins des différences.

Le document 2 précise en quoi consistent ces différences en prenant l'exemple du chromosome 2. On constate ainsi que le chromosome 2 humain correspond à la fusion de deux chromosomes du Chimpanzé (nommés IIp et IIq). Les chromosomes IIp de l'Orang-outan et du Gorille sont identiques. Leur chromosome IIq diffère par l'inversion d'une portion de chromosome. Les chromosomes IIq du Gorille et du Chimpanzé sont identiques. Leur chromosome IIp diffère par l'inversion d'une portion de chromosome.

Ainsi, pour ce chromosome, il y a trois différences entre l'Homme et l'Orang-outan, deux différences entre l'Homme et le Gorille, une seule entre l'Homme et le Chimpanzé.

Le document 3 confirme, à propos du chromosome 12 cette fois, que les différences entre les chromosomes des deux espèces s'expliquent par quelques remaniements, par exemple l'inversion de certains blocs.

Le document 4 apporte des informations chiffrées : les génomes de l'Homme et du Chimpanzé sont très proches. Les différences s'expliquent par des mutations ponctuelles mais aussi par des duplications de gènes (et des pertes de séquences génétiques). L'arbre illustré ici confirme que, parmi les espèces étudiées, c'est avec le Chimpanzé que la proximité génétique est la plus étroite.

Ces études confirment donc que l'Homme et le Chimpanzé partagent une très grande partie de leur génome. Ceci s'explique si l'on considère que ces deux espèces sont étroitement apparentées et ont hérité leur génome d'un ancêtre commun récent. Après divergence entre les deux lignées, des différences génétiques, en nombre relativement limité, se sont accumulées.

Doc. 4 : La comparaison des génomes de l'Homme et du Chimpanzé pose différentes questions. Par exemple :

- De quand date la divergence entre les deux lignées (c'est-à-dire l'ancêtre commun de ces deux espèces) ?
- Comment des différences génétiques, qui apparaissent limitées, peuvent-elles expliquer les différences phénotypiques qui existent entre les deux espèces ?
- Dans quelle mesure les différences génétiques qui existent entre les deux espèces ont-elles eu une importance sélective ?

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Entre le génome de l'Homme et celui des grands singes, il existe des différences d'organisation et de contenu. Il s'agit de divers remaniements chromosomiques (translocation, fusion), de phénomènes de duplications géniques (gains de gènes), de pertes de séquences génétiques et de mutations ponctuelles. Ces différences sont cependant quantitativement limitées et l'étude comparative révèle une grande similitude entre ces génomes. C'est avec le Chimpanzé que la similitude des génomes est la plus étroite.

3. Ressources complémentaires

- **Banque de données en ligne Cinteny (comparaison des chromosomes de différentes espèces) :**
<http://cinteny.cchmc.org/>
- **Exploration des synthénies avec le logiciel Circos (visualisation circulaire) :**
<http://circos.ca/guide/genomic/>

Activités pratiques

2

L'acquisition d'un phénotype humain ou simien (p. 86-87)

Connaissances

Le phénotype humain, comme celui des grands singes proches, s'acquiert au cours du développement pré et postnatal, sous l'effet de l'interaction entre l'expression de l'information génétique et l'environnement (dont la relation aux autres individus).

1. Les intentions pédagogiques

L'étude proposée ici ne revêt pas de caractères particuliers : on applique à l'exemple Homme/Singe des connaissances acquises antérieurement (classe de Première S à propos des relations génotype/phénotype, chapitre précédent à propos du rôle des gènes du développement dans les mécanismes de diversification des êtres vivants).

Le **document 1** interprète les différences phénotypiques Homme/Chimpanzé en termes d'hétérochronies : plus que les différences génétiques elles-mêmes, des différences dans la chronologie et dans l'intensité de l'expression de mêmes gènes peuvent en effet se traduire par des différences phénotypiques. Remarquons que l'on trouve ici exactement les mêmes phénomènes que ceux exposés pages 46-47.

La photographie qui accompagne ce document n'est pas choisie au hasard : outre sa dimension affective (on ne manquera pas de faire remarquer cette similitude comportementale entre les deux espèces), cette photographie permet de constater certaines différences morphologiques entre le jeune Chimpanzé et l'adulte : la face est moins projetée en avant, les bourrelets sus-orbitaires sont moins marqués.

Le **document 2** précise l'importance des gènes qui contrôlent la chronologie du développement. Il serait tentant d'identifier quelques gènes dont l'évolution récente suffirait à expliquer les différences entre Homme et Chimpanzé. Cependant, il convient d'éviter toute conclusion hâtive et simpliste sur le rôle de tel ou tel gène.

Le **document 3** s'intéresse à une spécificité incontestablement humaine : la capacité à communiquer par un langage articulé. Cet exemple est particulièrement intéressant car il illustre bien les nécessaires interactions entre l'expression de l'information génétique et l'environnement, notamment les relations entre individus. Là encore, il convient de ne pas céder au simplisme : si le gène FoxP2 apparaît incontestablement impliqué dans la maîtrise du langage, il serait excessif d'en faire « le gène du langage ». Ce gène est en effet exprimé dans bien d'autres organes que le cerveau et ses rôles sont donc multiples.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : On constate en effet de fortes ressemblances entre le phénotype humain et celui du jeune Chimpanzé. Chez le Chimpanzé, les étapes du développement se suivent relativement rapidement alors que chez l'Homme, les premières phases du développement se prolongent. Ainsi, par exemple, la face reste plane, le trou occipital reste centré, la phase de multiplication des neurones dure plus longtemps. On peut donc considérer que le phénotype humain est celui d'un primate dont les premières étapes du développement sont plus durables. C'est la raison pour laquelle le phénotype humain, même adulte, ressemble à celui d'un singe immature.

Doc. 1 et 2 : Le phénotype de chaque espèce s'acquiert au cours du développement pré et postnatal. Pour chaque espèce, ce développement est relativement stéréotypé : il existe donc un contrôle, génétique notamment, qui détermine la durée d'expression de chacune des étapes. Par exemple, on comprend bien que si la durée de la phase de multiplication des neurones pendant la période embryonnaire est plus longue, le nombre de neurones dont sera doté le système nerveux sera plus important. De même, la protéine codée par le gène ASPM détermine la durée de la phase de multiplication des cellules souches du cortex cérébral. Différentes mutations de ce gène se caractérisent donc par un cortex cérébral plus ou moins important. Un tel gène a donc pu jouer un rôle important dans l'histoire évolutive de notre espèce.

Doc. 1 à 3 : Les différences phénotypiques entre Homme et Chimpanzé peuvent s'expliquer par des différences génétiques. Cependant, aucun gène n'est formellement identifié comme suffisant pour expliquer telle ou telle différence. Les gènes en cause sont souvent impliqués dans différentes fonctions. Il apparaît que la chronologie et l'intensité d'expression de mêmes gènes revêt une grande importance. Enfin, ces différences phénotypiques ne sont pas que génétiques : une fonction complexe comme le langage articulé repose sur des bases génétiques mais aussi sur des interactions avec l'environnement et notamment la relation avec les autres individus.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'établissement d'un phénotype humain, bien différent de celui des autres grands singes, repose sur des différences génétiques mais aussi sur des différences dans la chronologie et l'intensité d'expression de mêmes gènes, en interaction avec l'environnement et notamment la relation aux autres individus.

La grande famille des primates (p. 88-89)

Connaissances	Capacités et attitudes
Les premiers primates fossiles datent de – 65 à – 50 millions d'années. Ils sont variés et ne sont identiques ni à l'Homme actuel ni aux autres singes actuels.	Positionner quelques espèces de primates actuels ou fossiles, dans un arbre phylogénétique, à partir de l'étude de caractères ou de leurs productions.

1. Les intentions pédagogiques

Les activités de cette double page ont plusieurs objectifs.

Du point de vue des connaissances et de la place de cette étude dans la démarche du chapitre, il s'agit de montrer que l'histoire de l'Homme s'intègre dans celle, beaucoup plus générale, des primates.

Du point de vue méthodologique, on approfondit les principes d'établissement, de lecture et d'utilisation d'un arbre phylogénétique basé sur la comparaison de caractères anatomiques.

Le **document 1** présente le groupe des primates et les principaux caractères qui, au sein des mammifères, permettent de définir le sous-groupe des primates. C'est l'occasion de définir ce qu'on appelle état ancestral et état dérivé d'un caractère. En raisonnant à partir des données fournies, il sera facile de montrer que l'Homme est un primate mais aussi que ce groupe est aujourd'hui encore diversifié.

Le **document 2** permet de montrer l'intérêt de l'étude des espèces fossiles. On pourra situer l'origine des primates dans le temps. L'origine précise des premiers primates est encore mal connue : on la situe vers – 65 Ma, même si les plus anciens fossiles avérés datent de – 55 Ma (*Purgatorius*, daté de – 65 Ma et longtemps considéré comme le plus ancien primate connu, est aujourd'hui plutôt classé dans le groupe des dermoptères). L'important est simplement de donner un repère temporel que l'on pourra mettre ensuite en relation avec l'évolution beaucoup plus récente du genre *Homo*.

Les auteurs ont choisi de présenter *Darwinius masillae* : même s'il n'est pas le plus ancien, le remarquable état de conservation de ce fossile permet d'identifier les informations nécessaires pour replacer cette espèce dans le groupe des primates. On trouvera de nombreux articles consacrés à ce spécimen, pour deux raisons. Découvert en 1983 par des collectionneurs, ce fossile a d'abord été séparé en deux pour être vendu. Sa reconstitution et son étude scientifique n'ont pu être réalisées que très récemment (2009). L'histoire de ce fossile a ainsi fait l'objet d'une couverture médiatique importante. Par ailleurs, ce fossile a été présenté par certains media, à tort, comme un « chaînon manquant » dans l'histoire de l'évolution humaine et un « ancêtre » de notre espèce. Une belle occasion est donc donnée, en s'appuyant sur cet exemple, pour montrer au contraire aux élèves qu'un fossile n'est pas un ancêtre commun et resituer ce fossile certes remarquable à la place qui est la sienne. Le concept même de « chaînon manquant » pourra alors être remis en cause.

La comparaison de quelques primates est, dans chapitre, une opportunité pour montrer l'intérêt de l'établissement et de l'utilisation d'un arbre phylogénétique. C'est ce que propose l'activité illustrée par le **document 3**. Les élèves ont des acquis à ce sujet (classe de Troisième et de Seconde), mais c'est à cette occasion que l'on familiarisera

vraiment les élèves avec cette méthodologie. Différentes activités pratiques peuvent être construites avec le logiciel Phylogène. Le document présenté dans ce manuel a d'abord pour intérêt de montrer comment un tel arbre est construit et quelle est sa signification : état dérivé d'un caractère, innovation évolutive, ancêtre commun, etc.

Cependant, les espèces présentées n'ont volontairement pas été placées dans cet arbre : il appartiendra aux élèves de le faire (activité suggérée par le programme). On pourra aussi replacer l'espèce fossile présentée par le document 2. Remarquons enfin que le choix des caractères a été fait de façon à rester simple et à éviter toute conception anthropocentrique : ainsi l'Homme n'apparaîtra pas ici comme l'espèce « la plus évoluée » (les lémuriens ont aussi des caractères dérivés que les Hommes n'ont pas). On se situe bien dans un processus de diversification du vivant.

Cet arbre pourra être enrichi et servir de support pour placer différentes espèces rencontrées ultérieurement au cours du chapitre.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : L'Homme est un mammifère. Cependant, il se distingue de beaucoup de mammifères par différents caractères qu'il partage avec d'autres espèces et qui définissent le groupe des primates : yeux à orbites larges orientés vers l'avant, excellente vision (couleur et relief), main et pied possédant des ongles (et non des griffes), pouce de la main plus court et opposable aux autres doigts rendant la main préhensile.

Doc. 2 et 3 : *Darwinius masillae* est incontestablement un primate, comme le montre le caractère opposable du premier orteil. Il partage avec les lémuriens la possession d'un peigne dentaire et ne peut donc pas être un ancêtre de l'Homme et des grands singes (qui ne possèdent pas cette innovation). Cependant, il possède des caractères que les lémuriens n'ont pas, comme l'absence de griffes.

Sur l'arbre phylogénétique des Primates du document 3, la place occupée par *Darwinius masillae* serait l'extrémité d'un petit rameau, aujourd'hui éteint, que l'on peut raccorder à celui des lémuriens. Ce n'est donc absolument pas un « chaînon manquant » dans l'histoire évolutive de l'Homme.

Doc. 3 : L'application de la méthode consiste à raisonner sur la possession des états dérivés des caractères (innovations évolutives). Elle conduit ainsi à placer le Babouin et le Macaque dans le groupe des cercopithèques, le Chimpanzé et l'Homme dans le groupe des hominoïdes, le Propitèque dans le groupe des lémuriens et l'Atèle dans le groupe des platyrrhiniens.

À première vue, le Macaque et l'Atèle pourraient être considérés comme des singes proches, tous deux assez éloignés de l'Homme : cette apparence est scientifiquement erronée. En effet, le Macaque et l'Homme ont des narines rapprochées, caractère que l'Atèle n'a pas. Ce caractère est une innovation que le Macaque et l'Homme ont donc héritée d'un ancêtre commun qui n'est pas ancêtre de l'Atèle. Ainsi, contrairement aux apparences, un Macaque est, du point de vue évolutif, plus proche de l'Homme que de l'Atèle.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'Homme est incontestablement un primate, comme l'attestent notamment les caractéristiques de sa vision et le caractère opposable du pouce de la main. Dans ce groupe, il partage des caractères avec d'autres espèces de singes (absence de truffe, remplacée par un nez). Parmi les singes, l'Homme appartient, avec d'autres espèces, au groupe

des hominoïdes, caractérisé par différentes innovations évolutives : narines rapprochées, absence de queue (réduite au coccyx).

3. Ressources complémentaires

- **Ida, un ancêtre pour tous les singes ! (Hominides.com)**
<http://www.hominides.com/html/actualites/ida-ancetre-entre-lemurien-singe-homme-0201.php>
- **Logiciel Phylogène (IFE-ACCES-INRP)**
<http://accres.ens-lyon.fr/evolution/logiciels/phylogene>
- **Film « Espèces d'espèces »**
Réalisé par Denis van Waerebeke avec la collaboration de Vincent Gaullier, avec le concours de Ex nihilo, France 5, Arte, CNRS et du MNHN – DVD LCJ Editions.

Activités pratiques

4

La diversité des grands singes (p. 90-91)

Connaissances	Capacités et attitudes
La diversité des grands primates connue par les fossiles, qui a été grande, est aujourd'hui réduite.	Positionner quelques espèces de primates actuels ou fossiles, dans un arbre phylogénétique, à partir de l'étude de caractères ou de leurs productions.

1. Les intentions pédagogiques

Dans ce chapitre, l'étude se focalise autour du genre *Homo*, non pas pour en faire un cas exceptionnel, mais bien au contraire pour montrer que son histoire évolutive peut être appréhendée comme celle de toute autre espèce. À ce stade, nous avons vu que l'histoire évolutive de l'espèce humaine s'enracine, au sein des mammifères, dans celle des primates.

Une première approche phylogénétique du groupe des primates a permis de dégager le groupe des singes hominoïdes dans lequel l'Homme a pu être placé. C'est donc à ce groupe que l'on s'intéresse plus particulièrement maintenant.

Remarque : les expressions « grands primates » (utilisée dans le programme) et « grands singes » (couramment utilisée dans la littérature) n'ont pas de valeur phylogénétique. Selon les auteurs, l'expression « grands singes » équivaut, du point de vue de la systématique, à la superfamille des hominoïdes (qui comporte les Gibbons) ou au groupe des hominoïdés (groupe frère des Gibbons) rassemblant pongidés et hominidés. Il est inutile et sans intérêt d'entrer dans cette discussion au niveau d'une classe de Terminale.

Le **document 1** fait le point sur la diversité actuelle des « grands singes ». Celle-ci apparaît très faible et le contraste est saisissant entre les quatre espèces de singes et l'Homme actuel. Ce document devra être rapproché de l'étude du **document 2** qu'il est possible de compléter par d'autres recherches documentaires. En effet, deux exemples de grands primates fossiles ont été ici choisis parmi bien d'autres possibles : l'objectif

de ce document est d'illustrer que d'autres espèces d'hominoïdes ont existé. La diversité des grands primates, faible aujourd'hui, a été plus importante dans le passé. Ainsi, on comprend que de nombreuses espèces, aujourd'hui disparues, s'intègrent dans les lignées évolutives correspondant aux différentes espèces actuelles. Le choix d'un *Proconsul* est justifié car ce genre regroupe plusieurs espèces bien connues : l'étude du squelette représenté ici permet d'apparenter facilement cette espèce fossile avec les espèces actuelles (absence de queue). La présentation de Toumaï dans ce contexte est intéressante : il ne s'agit pas, comme dans l'ancien programme de Terminale S, de montrer que Toumaï est probablement le plus ancien fossile actuel de la lignée humaine. L'objectif est ici différent : montrer qu'il a pu exister, dans un passé que l'on peut situer temporellement proche de la divergence supposée Homme/Chimpanzé, des espèces apparentées aux grands primates mais qui diffèrent des singes et de l'Homme actuels.

Le **document 3** montre les possibilités et les limites des méthodes permettant de préciser les relations de parenté au sein de ce groupe. En effet, établir, au sein des hominoïdes, une phylogénie par comparaison de caractères anatomiques est extrêmement difficile et affaire de spécialistes. En revanche, la comparaison moléculaire permet facilement d'obtenir des résultats précis, quantifiables. Cependant, cette méthode ne s'applique pas aux espèces fossiles (sauf exception, pour quelques espèces récentes). Cette approche peut facilement être complétée par l'étude d'autres molécules (ADN ou protéines) et les différents arbres obtenus seront alors confrontés (voir exercice 10 page 107). La proximité génétique entre l'Homme et le Chimpanzé sera confirmée et la place des autres espèces sera ainsi précisée.

Le **document 4** permet de comprendre que d'autres critères peuvent être utilisés pour étudier les parentés au sein de ce groupe. Ainsi, l'observation des comportements confirme notre étroite parenté avec le Chimpanzé. Les observations récentes conduisent d'ailleurs à réviser d'anciennes conceptions qui faisaient de l'Homme la seule espèce actuelle à pouvoir utiliser des outils ou à posséder une « culture ». Il apparaît au contraire aujourd'hui que ces aptitudes existent aussi, à des degrés et selon des modalités diverses, chez les autres grands primates. On comprendra alors que ces aptitudes pourront également s'exprimer chez les autres espèces aujourd'hui disparues du genre *Homo*.

Cette double page pourra être complétée par la page « Des clés pour... aller plus loin », page 102, qui présente de façon plus détaillée deux espèces de primates (Lémur fauve et Chimpanzé bonobo).

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 à 4 : Le document 1 rappelle que l'Homme appartient au groupe des Hominoïdes, groupe de singes caractérisés par des narines rapprochées et par l'absence de queue (réduite au coccyx). Aujourd'hui, ce groupe rassemble l'Homme et quelques espèces endémiques de certaines régions et dont les effectifs sont réduits. De ce point de vue, l'Homme fait exception, puisqu'il occupe toute la planète et que la population mondiale humaine connaît au contraire une croissance exponentielle.

Le document 2 montre que diverses espèces aujourd'hui disparues et que l'on connaît grâce à la découverte de fossiles, appartiennent à ce groupe. C'est le cas des singes *Proconsul*, apparentés aux grands singes actuels. Le crâne de Toumaï prouve qu'il a existé d'autres espèces, différentes des espèces actuelles : si le crâne de Toumaï fait penser à celui des gorilles, d'autres caractéristiques montrent des caractères parta-

gés exclusivement avec l'espèce humaine. La position du trou occipital par exemple montre que Toumaï était probablement bipède.

Le document 3 révèle une parenté étroite entre les six espèces étudiées : la séquence d'acides aminés de cette protéine révèle en effet une identité supérieure à 93 % pour les six espèces, argument en faveur d'une origine commune. Le pourcentage de mutations pouvant être relié à la distance qui sépare les différentes espèces, cette étude confirme que les Chimpanzés sont les espèces les plus proches de l'Homme. Vient ensuite le Gorille, l'Orang-outan et le Gibbon. Enfin, le document 4 montre que beaucoup d'aptitudes, que l'on croyait exclusivement humaines, comme l'utilisation d'outils et la transmission culturelle de leur fabrication, existent aussi, à un degré moindre, chez les Chimpanzés.

Doc. 1 à 4 : L'étude des espèces fossiles montre que la diversité des grands primates a été par le passé plus importante que celle que l'on connaît aujourd'hui. L'étude des squelettes ou des restes osseux permet de les situer plus ou moins précisément par rapport aux espèces actuelles : par exemple, certains caractères montrent que Toumaï et l'Homme partagent des caractères que les autres singes actuels n'ont pas : ils ont donc probablement un ancêtre commun exclusif et sont donc plus étroitement apparentés.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Parmi les primates, l'Homme est plus étroitement apparentés avec les quelques espèces de grands singes hominoïdes (Chimpanzés, Gorilles, Orang-outans). Cependant, la diversité de ce groupe, aujourd'hui réduite, a été beaucoup plus importante par le passé. Il a existé d'autres espèces d'hominoïdes, différentes des singes actuels et de l'Homme actuel : leur étude permet de mieux comprendre l'histoire évolutive de ce groupe de primates.

3. Ressources complémentaires

■ « Les grands singes » (Hominides.com)

http://www.hominides.com/html/dossiers/grands_singes.php

Les caractères dérivés propres aux humains (p. 92-93)

Connaissances

Homme et Chimpanzé partagent un ancêtre commun récent. Aucun fossile ne peut être à coup sûr considéré comme un ancêtre de l'Homme ou du chimpanzé. Le genre *Homo* regroupe l'Homme actuel et quelques fossiles qui se caractérisent notamment par une face réduite, un dimorphisme sexuel peu marqué sur le squelette, un style de bipédie avec trou occipital avancé et aptitude à la course à pied, une mandibule parabolique, etc.

1. Les intentions pédagogiques

Avant de s'intéresser à l'histoire évolutive de la lignée humaine, il est indispensable, d'un simple point de vue méthodologique, de dresser une liste suffisamment complète et précise des caractères dérivés propres à l'espèce humaine. En effet, tout fossile qui présentera au moins l'un des caractères dérivés propres aux humains pourra être considéré comme appartenant à la lignée humaine.

Une telle liste peut être déduite de la comparaison des caractéristiques de l'Homme actuel et l'espèce animale actuelle la plus proche de l'Homme, à savoir le Chimpanzé. Cette double page propose donc des documents comparables : photographies du squelette entier, photographies du crâne et de la mandibule, schémas des membres inférieurs, ensemble de données anatomiques. L'élève peut ainsi extraire de ces documents toutes les informations nécessaires.

Il faut souligner la qualité des deux photographies des squelettes entiers et surtout le parti pris du montage des squelettes. En effet, ceux-ci sont présentés dans la position anatomique correspondant au mode de locomotion propre à chaque espèce : course pour l'Homme, marche quadrupède de type « knuckle-walking » (c'est-à-dire marche sur les phalanges des membres antérieurs, doigts repliés) pour le Chimpanzé.

La mesure de l'angle facial s'appuie sur le repérage de quatre points : trou auditif et point le plus bas de l'orbite oculaire pour une première droite, point le plus proéminent du maxillaire supérieur et point de rencontre des sutures des os nasaux et frontal (départ du nez) pour la deuxième droite.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 et 2 : La comparaison amène à l'idée d'une encéphalisation très importante dans le cas de l'espèce humaine. Pour une masse de l'organisme légèrement supérieure seulement, le volume cérébral humain est plus de trois fois plus important. Ceci est à mettre en relation avec la forme de la boîte crânienne chez l'Homme, plus arrondie et qui « comble » notamment l'espace frontal situé au-dessus des orbites.

L'angle facial de l'Homme est presque droit : ce paramètre est indicateur d'une face plane alors que l'angle facial aigu du Chimpanzé indique un fort prognathisme (mâchoire projetée en avant).

Les deux espèces ont la même formule dentaire : 2 incisives, 1 canine, 2 prémolaires, 3 molaires (y compris les « dents de sagesse ») par demi-mâchoire, soit 32 dents.

Il existe cependant des différences : chez le Chimpanzé, les canines sont fortement développées en crocs (surtout chez le mâle). Par ailleurs, les 32 dents sont insérées sur une mâchoire de forme parabolique chez l'Homme tandis que cette forme est en U chez le Chimpanzé.

La position du trou occipital est à mettre en relation avec la station habituelle de chaque espèce. Chez l'Homme, le trou occipital est centré et situé horizontalement à la base du crâne de telle sorte que le crâne repose en équilibre au sommet de la colonne vertébrale quand l'Homme est en position debout. Chez le Chimpanzé, le trou occipital est situé à l'arrière du crâne : ceci est à mettre en relation avec une posture en appui sur quatre pattes, la colonne vertébrale étant à l'horizontale.

Doc. 1 et 2 : Le Chimpanzé est capable d'une marche bipède. Dans la nature, les Chimpanzés n'utilisent cependant qu'occasionnellement ce mode de locomotion (5 à 20 % du temps environ lorsqu'ils se déplacent au sol). En effet, même s'ils ont cette capacité, leur anatomie n'est pas favorable à la marche bipède : la courbure générale de la colonne vertébrale ne favorise pas la station debout mais tend à déséquilibrer l'animal vers l'avant, la position du trou occipital oblige à un effort important pour redresser la tête. Par ailleurs, la forme du bassin et la position du fémur obligent à un déplacement en « roulant des hanches » à chaque pas de façon à maintenir le centre de gravité du corps au-dessus du pied qui est au sol.

L'Homme possède au contraire une anatomie adaptée à la station debout ainsi qu'à la marche et la course bipèdes : la colonne vertébrale présente plusieurs courbures et cambrures, ce qui facilite le maintien de la posture debout. La position du trou occipital permet à la tête d'être alors en équilibre au sommet de la colonne vertébrale. La forme du bassin (court et large), la position des fémurs (légèrement obliques et convergents) sont telles qu'à chaque pas, le corps se trouve naturellement en équilibre au-dessus du pied qui est au sol. La forme du pied assure par ailleurs une très bonne propulsion.

Doc. 1 et 2 : Plusieurs caractères anatomiques distinguent l'Homme du Chimpanzé. Si une espèce fossile possède au moins un caractère propre à l'espèce humaine, cela signifie qu'elle a hérité cette innovation d'un ancêtre qu'elle partage avec l'Homme mais qui n'est pas ancêtre du Chimpanzé.

Ainsi, si une espèce fossile possède au moins l'un des caractères dérivés propres à l'espèce humaine, on peut affirmer que cette espèce appartient à la lignée humaine.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Divers caractères anatomiques, notamment des caractères crâniens marquant une encéphalisation, des caractères du squelette liés à la bipédie permanente ou encore des caractères liés au régime alimentaire, sont propres à la lignée humaine : crâne volumineux et arrondi, absence de bourrelets sus-orbitaires, face plane, trou occipital centré, colonne vertébrale avec plusieurs courbures et cambrures, bassin court et large, fémurs convergents, membres inférieurs plus longs que les membres supérieurs, pieds non préhensiles, mâchoire parabolique, absence de crocs.

3. Ressources complémentaires

- Logiciel « Lignée humaine » (Pierre Perez, site de l'académie de Toulouse) : <http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/lycee/perez/evolution/ligsomm.htm>

Des caractères partagés par de nombreux fossiles (p. 94-95)

Connaissances	Capacités et attitudes
Le genre <i>Homo</i> regroupe l'Homme actuel et quelques fossiles qui se caractérisent notamment par une face réduite, un dimorphisme sexuel peu marqué sur le squelette, un style de bipédie avec trou occipital avancé et aptitude à la course à pied, une mandibule parabolique, etc. Production d'outils complexes et variété des pratiques culturelles sont associées au genre <i>Homo</i> , mais de façon non exclusive. La construction précise de l'arbre phylogénétique du genre <i>Homo</i> est controversée dans le détail.	Positionner quelques espèces de primates actuels ou fossiles, dans un arbre phylogénétique, à partir de l'étude de caractères ou de leurs productions.

1. Les intentions pédagogiques

Les documents présentés sur cette double page n'ont pas pour objet de reconstituer avec précision les étapes de l'histoire évolutive de la lignée humaine. Il s'agit simplement de montrer, à travers quelques exemples judicieusement choisis, qu'il a effectivement existé de nombreuses espèces fossiles, différentes des singes et de l'Homme actuels, mais que l'on peut sans ambiguïté situer dans la lignée humaine. À travers ces exemples, que l'on situe dans le temps, on constate que les différentes innovations évolutives qui séparent aujourd'hui Homme et Chimpanzé sont apparues progressivement et que la lignée humaine est en fait peuplée d'une mosaïque d'homininés dont il ne reste aujourd'hui qu'une seule espèce.

Le **document 1** présente quelques données, classiques, sur les Australopithèques. En effet, il n'est pas envisageable de faire l'impasse sur ce groupe dont l'importance n'est plus à démontrer. On se focalisera cependant sur quelques idées essentielles : le squelette de Lucy vient confirmer ce que le crâne de Toumaï avait laissé supposer, la bipédie est une acquisition ancienne et il a probablement existé plusieurs styles de bipédies. Les Australopithèques sont un groupe très diversifié chez lesquels le processus d'encéphalisation n'est qu'amorcé, leur faciès restant très simiesque.

La photographie de crâne d'*Australopithecus africanus* est celle du spécimen surnommé « Mrs Ples » découvert en 1947 dans les carrières de Sterkfontein en Afrique du Sud (n° inventaire STS5). On trouvera sur le **site ressources Bordas**, un article très intéressant publié par le site « Les Homininés » par deux professeurs du lycée de l'Escaut à Valenciennes. Cet article compare notamment ce crâne à celui de diverses espèces : Toumaï, Gorille, Chimpanzé, Homme actuel.

Le **document 2** permet de définir le genre *Homo* : celui-ci sera associé à un développement cérébral important et à l'utilisation systématique d'outils élaborés. La comparaison des deux exemples présentés ici avec ceux des Australopithèques de la page précédente permet de saisir les différences essentielles qui distinguent ces deux groupes. On verra cependant au cours de l'activité suivante que cette distinction n'est parfois pas toujours aussi évidente.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : Les caractères crâniens des Australopithèques semblent à première vue les rapprocher des Chimpanzés. Cependant, certains caractères du squelette montrent incontestablement que ces espèces sont bipèdes :

- le trou occipital est centré, ce qui traduit une station verticale ;
- le bassin est court et large ;
- l'articulation des fémurs avec le bassin est telle que les fémurs sont convergents.

Même si la bipédie des Australopithèques diffère de celle des hommes actuels, on peut penser que ces caractères anatomiques dérivés, communs aux Australopithèques et aux Hommes, ont été hérité d'un ancêtre commun qui n'est pas ancêtre des Chimpanzés. Les Australopithèques appartiennent donc incontestablement à la lignée humaine.

Doc. 1 et 2 : Les différences essentielles entre le genre *Australopithecus* et le genre *Homo* sont de plusieurs natures.

Si les deux groupes sont bipèdes, le style de bipédie est différent : marche « chaloupée » chez les Australopithèques, bipédie plus accomplie et même aptitude à la course dans le genre *Homo* (comme en témoigne par exemple la longueur des membres inférieurs).

Les espèces appartenant au genre *Homo* possèdent un crâne qui traduit un processus d'encéphalisation important, se manifestant par un volume cérébral sensiblement plus élevé et par une réduction nette du prognathisme.

Le développement cérébral des espèces appartenant au genre *Homo* est à mettre en relation avec l'utilisation systématique d'outils en pierre taillée. À ce jour, aucune activité de ce type n'est connue chez les Australopithèques.

Plusieurs caractères attestent de l'acquisition du langage articulé chez les espèces du genre *Homo*.

On relève enfin une modification de la denture : réduction des canines (dimorphisme sexuel moins marqué), mâchoire moins puissantes.

Doc. 2 : *Homo erectus* diffère essentiellement d'*Homo sapiens* par certains caractères crâniens. Chez *Homo sapiens*, le volume cérébral est nettement plus important, les bourrelets sus-orbitaires ont complètement disparu et la face est plus droite. Ceci peut être mis en relation avec les pratiques intellectuelles d'*Homo sapiens* : fabrication d'objets beaucoup plus complexes et diversifiés, pratique de l'art (peintures rupestres), existence de rites (funéraires notamment).

Doc. 1 et 2 : Se reporter au schéma-bilan page 101.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'étude de quelques fossiles attribués à la lignée humaine montre qu'il a existé de nombreuses espèces, différentes des Hommes et des singes actuels, mais possédant déjà certains caractères dérivés propres aux humains. On sait par exemple qu'il a existé de nombreuses autres espèces bipèdes (Australopithèques par exemple). Les caractères qui différencient Hommes et singes actuels ont donc été acquis progressivement au cours de l'histoire évolutive de la lignée humaine. Le processus d'encéphalisation, associé à des activités culturelles de plus en plus élaborées, caractérise les espèces appartenant au genre *Homo*.

3. Ressources complémentaires

- Logiciel « Lignée humaine » (Pierre Perez, site de l'académie de Toulouse) : <http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/lycee/perez/evolution/ligsomm.htm>

- **Arbre phylogénétique du genre *Homo* (Hominides.com) :**
<http://www.hominides.com/html/ancetres/ancetres.php>
- **Quelques informations concernant « Mrs Ples » (« Les Homininés ») :**
<http://hominines.portail-svt.com/articles.php?lng=fr&pg=14>
- **Logiciel Phylogène (IFE-ACCES-INRP) :**
<http://acces.ens-lyon.fr/evolution/logiciels/phylogene>

Activités pratiques

7

Une phylogénie en discussion (p. 96-97)

Connaissances	Capacités et attitudes
Le genre <i>Homo</i> regroupe l'Homme actuel et quelques fossiles qui se caractérisent notamment par une face réduite, un dimorphisme sexuel peu marqué sur le squelette, un style de bipédie avec trou occipital avancé et aptitude à la course à pied, une mandibule parabolique, etc. Production d'outils complexes et variété des pratiques culturelles sont associées au genre <i>Homo</i> , mais de façon non exclusive. La construction précise de l'arbre phylogénétique du genre <i>Homo</i> est controversée dans le détail.	Positionner quelques espèces de primates actuels ou fossiles, dans un arbre phylogénétique, à partir de l'étude de caractères ou de leurs productions.

1. Les intentions pédagogiques

L'objectif de cette dernière activité est de montrer l'existence d'une diversité, au sein même du genre *Homo*, et de présenter les questions encore en discussion autour de la phylogénie de ce groupe. Cependant, cette étude ne se prétend pas exhaustive. Comme le précise le programme : « *L'étude de fossiles n'a aucun objectif exhaustif. Il s'agit simplement d'illustrer la diversité des primates fossiles, notamment de ceux habituellement classés dans le genre Homo. La controverse sur le détail précis de l'arbre est évoquée et illustre une question scientifique en devenir. Cependant, les différentes conceptions en présence ne sont en aucun cas exigibles.* »

Le **document 1** montre comment une découverte récente peut perturber une conception préétablie. En effet, la distinction entre le genre *Australopithecus* et le genre *Homo*, qui semble bien nette pour certaines espèces (voir double page précédente), apparaît finalement moins évidente lorsqu'il s'agit de situer des spécimens comme *Australopithecus sediba*, ici présenté. En fait, c'est la définition même du genre *Homo* qui est en débat. Les amateurs trouveront sur le site « Planet-Terre » (voir adresse ci-dessous ou sur le **site ressources Bordas**) un article approfondi à propos de cette découverte. L'intérêt de cette discussion est de montrer le caractère buissonnant de l'histoire évolutive de la lignée humaine, caractère qui, bien loin de revêtir un aspect exceptionnel, est tout à fait conforme aux conceptions actuelles de l'évolution des espèces.

Le **document 2** expose les hypothèses, bien étayées, qui permettent de reconstituer la colonisation des continents par diverses migrations de populations d'*Homo erectus*.

Le **document 3** présente *Homo sapiens* fossile à travers l'exemple du spécimen de Cro-Magnon. Ce sera l'occasion d'insister sur les spécificités culturelles de notre espèce : on pourra compléter ce document par la page « Des clés pour ... aller plus loin » (page 103) qui présente des exemples de peintures rupestres réalisées par *Homo sapiens*. Ce document est l'occasion d'explorer les divers modèles d'arbre phylogénétique du genre *Homo*. De nombreuses dénominations et variantes de ces théories existent : modèles « Out of Africa », en « totem », « multirégional », « en chandelier », « réticulé »... L'important est de montrer que, si l'origine africaine d'*Homo sapiens* est aujourd'hui acquise, des incertitudes existent sur les modalités de l'expansion de cette espèce et de sa filiation avec les autres espèces du genre *Homo*. Il peut également être intéressant de rapprocher cette problématique de celles abordées au cours du chapitre 3 : critères de définition de l'espèce, mécanismes de spéciation.

En s'appuyant sur le **document 4**, on présente un autre exemple d'espèce humaine et l'on aborde les interrogations qui entourent toujours l'Homme de Neandertal. Là encore, on pourra faire un rapprochement avec les questions liées à la spéciation.

2. Les pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 à 4 : L'étude de la phylogénie du genre *Homo* pose un certain nombre de questions qui restent aujourd'hui en discussion :

- Quelle est l'origine du genre *Homo*, quelles sont les relations de parenté entre les espèces appartenant au genre *Homo* et les espèces que l'on regroupe dans le genre *Australopithecus* ?
- Quelles sont les migrations qui ont permis à diverses espèces humaines de coloniser la planète ?
- Quelle est l'origine exacte des diverses populations d'*Homo sapiens* ? Quelles sont les relations de parenté entre ces populations et les autres espèces humaines qui l'ont précédé ?
- Pourquoi l'Homme de Neandertal n'est-il connu qu'en Eurasie ? Pourquoi a-t-il disparu ? S'est-il hybridé avec *Homo sapiens* ?

Doc. 1 à 4 : Certaines découvertes conduisent parfois à remettre en question ce qui semblait acquis.

Ainsi, la découverte d'*Australopithecus sediba* montre que la distinction entre le genre *Australopithecus* et le genre *Homo* est moins nette qu'il n'y paraît. Certains caractères, que l'on croyait spécifiquement humains, se rencontrent aussi chez certains Australopithèques.

On pense également que les vagues migratoires des populations humaines ont pu être plus nombreuses que celles habituellement décrites et que des échanges génétiques entre populations ont pu être plus ou moins importants.

Alors que l'Homme moderne (*Homo sapiens*) et l'Homme de Neandertal sont considérés comme deux espèces bien distinctes, il apparaît aujourd'hui que des échanges génétiques entre ces deux espèces ont bien eu lieu.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

La reconstitution précise de l'arbre phylogénétique du genre *Homo* pose un certain nombre d'interrogations quant à la définition même du genre *Homo* et des différentes espèces qui y appartiennent. Des questions demeurent quant à l'origine précise de ces espèces et leur filiation exacte, les raisons et les modalités qui ont permis à *Homo sapiens* de supplanter les autres espèces du genre *Homo*.

3. Ressources complémentaires

- *Australopithecus sediba*, nouvel australopithèque d'Afrique du Sud (Site « Planet Terre, ENS Lyon ») :
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-Australopithecus-sediba.xml>
- Arbre phylogénétique du genre *Homo* (Hominides.com) :
<http://www.hominides.com/html/ancetres/ancetres.php>
- Logiciel « Lignée humaine » (Pierre Perez, site de l'académie de Toulouse) :
<http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/lycee/perez/evolution/ligsomm.htm>

EXERCICES

p. 104 à 107

Pour la partie « **Maîtriser ses connaissances** » :

- la correction des exercices « **Pour s'entraîner** » figure à la fin du manuel de l'élève, pages 396 à 401 ;
- la correction de la partie « **Objectif BAC** » comporte seulement une correction des QCM ; en effet, les questions de synthèse sont des restitutions de connaissances où toute liberté est laissée à l'élève pour construire une réponse organisée.

5 Les caractères dérivés propres à la lignée humaine (p. 104)

QCM : les bonnes réponses sont : **1d** ; **2b**.

7 La place des Hommes de Neandertal et de Cro-magnon (p. 105)

Cette comparaison permet de quantifier les différences génétiques entre les individus étudiés.

Ainsi, les cinq individus actuels appartenant à *Homo sapiens* ne diffèrent que par deux ou trois nucléotides sur la séquence étudiée (longue d'une centaine de nucléotides). La différence n'est pas plus importante avec les deux spécimens de Cro-Magnon, ce qui confirme que ces derniers, même s'ils sont plus anciens, appartiennent bien eux aussi à l'espèce *Homo sapiens*.

Les trois spécimens de Neandertal montrent un nombre de différences plus important avec la séquence de référence : environ 10 %. Remarquons cependant qu'ils diffèrent très peu entre eux. Il est donc légitime de considérer qu'ils forment une espèce distincte.

La différence est plus importante avec les Chimpanzés (plus de 20 %) qui n'appartiennent pas à la lignée humaine.

Ces résultats sont donc en parfait accord avec la phylogénie du genre *Homo*.

8 La bipédie des Australopithèques (p. 105)

QCM : les bonnes réponses sont : **1b** ; **2c**.

9 L'énigme de l' « Homme de Florès » (p. 106)

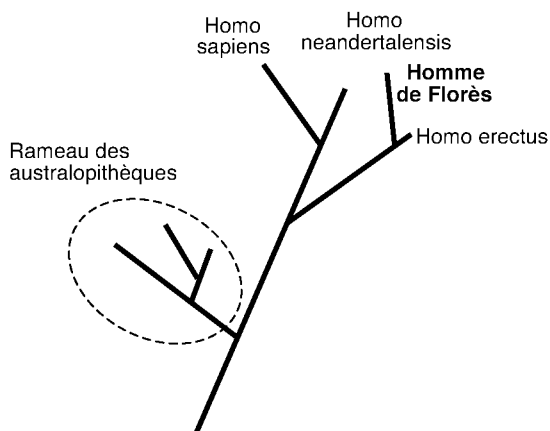
L'âge des fossiles trouvés semblerait correspondre à l'espèce *Homo sapiens*.

Cependant certaines caractéristiques montrent qu'il n'appartient pas à cette espèce :

- La capacité crânienne est faible, même si l'on tient compte de la petite taille du spécimen étudié ;
- L'os de la boîte crânienne est épais alors qu'*Homo sapiens* se distingue des autres espèces humaines par des os de la boîte crânienne fins ;
- L'Homme de Flores ne possède pas la forme particulière du poignet qui caractérise *Homo sapiens* et *Homo neandertalensis* ;
- Les outils associés à l'Homme de Flores sont relativement diversifiés sans être finement taillés.

Ainsi, il apparaît que ce fossile ne correspond à aucune des espèces humaines jusque là décrites. Pourtant, ce fossile est bien celui d'un Homme : la photographie de son crâne montre que celui-ci est très différent de celui des Australopithèques. Par ailleurs, il façonne des outils.

Il est donc légitime d'en faire une nouvelle espèce appartenant au genre *Homo*. La forme du poignet montre que cette espèce ne partage pas d'ancêtre commun exclusif avec *Homo sapiens* et *Homo neandertalensis*. Ses caractères (faible capacité crânienne, os crâniens épais, outils assez rudimentaires) permettent plutôt de le rapprocher d'*H. erectus*. Il pourrait donc s'agir d'un rameau ayant évolué à partir d'une population d'*H. erectus*, sous l'effet des caractéristiques de l'environnement local : isolement insulaire ayant conduit à une spéciation.



10 Une parenté établie par comparaison moléculaire (p. 107)

La résolution du problème posé nécessite simplement de maîtriser les fonctionnalités du logiciel Phylogène pour comparer des séquences moléculaires : comparaison de séquences, matrice des distances, arbre. Les documents reproduits dans le livre ne proposent volontairement qu'un exemple très partiel : l'élève devra mener une étude exhaustive des séquences proposées (en téléchargement sur le **site ressources Bordas**).

Les trois arbres obtenus sont globalement cohérents et montrent l'intérêt de la prise en compte de plusieurs molécules pour renforcer une argumentation. Ils permettent cependant une intéressante étude critique puisque, dans le détail, il y a divergence quant à la place du Gorille par rapport à l'Homme et au Chimpanzé. On remarquera cependant que les différences pour ces trois espèces portent sur des valeurs très faibles.

La vie fixée chez les plantes, résultat de l'évolution

Activités pratiques

1

Organisation et développement d'une plante (p. 110-111)

Connaissances	Capacités et attitudes
Les caractéristiques de la plante sont en rapport avec la vie fixée à l'interface sol/air dans un milieu variable au cours du temps.	Conduire une étude morphologique simple d'une plante commune. Représenter schématiquement l'organisation d'une plante type et savoir en décrire un exemple.

1. Les intentions pédagogiques

Ces premières activités sont d'abord et essentiellement destinées à réactiver des acquis. Les élèves savent depuis le collège que les plantes terrestres vivent fixées entre sol et air, ils connaissent le vocabulaire simple décrivant leur organisation (tige, racine, feuille, fleur...). Cependant, ces connaissances de base sont indispensables pour la suite et doivent être rappelées. On pourra d'ailleurs également s'appuyer sur les documents de la page 11.

Le choix de la plante s'est porté sur l'arabette des dames pour diverses raisons : l'arabette est très bien documentée et sert de modèle dans d'autres contextes (voir par exemple les pages 59, 112, 113, 120, 135 du manuel). On peut la cultiver sans grande difficulté au laboratoire et sa croissance est très rapide. La culture en « rhizotron » permet l'observation continue des parties aériennes et souterraines, et cela sur la totalité du cycle de développement. L'utilisation de rhizotrons est aussi l'occasion de manipuler et de mettre en œuvre des démarches expérimentales avec les élèves (influences de la gravité, de la lumière...).

Les plantes obtenues (attention à planifier correctement vos cultures !) pourront servir de matériel pour l'étude des surfaces d'échanges (Activités pratiques 2) et des circulations de matières (Activités pratiques 3).

Le **document 1** présente l'arabette et le dispositif de culture en rhizotron. La construction d'un rhizotron est tout à fait possible : on trouvera toute précision utile pour construire ce dispositif et le mettre en œuvre dans les ressources complémentaires (**manuel numérique enrichi version Premium** et sur le **site ressources Bordas**).

Le **document 2** fournit une vision dynamique de l'arabette : on perçoit mieux l'organisation de la plante et son implantation dans les deux milieux air et sol à travers ces images prises à quelques jours d'intervalle. Des images comparables peuvent être prises par les élèves et servir pour les Activités pratiques 2.

Le **document 3** propose une démarche expérimentale simple, visant à mettre en évidence l'influence de l'orientation du milieu sur l'orientation de la croissance de la plante. Au-delà de cet objectif, il s'agit d'inciter à concevoir (et éventuellement à mettre en œuvre) d'autres protocoles simples pour tester l'influence d'autres paramètres de l'environnement.

2. Pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : La mobilisation des acquis, complétée par les documents proposés, doit permettre de légender photographie ou dessin.

Doc. 2 : Au cours du développement de l'arabette, on observe au-dessus du sol la formation de feuilles de plus en plus nombreuses. Après leur formation au centre de la plante (dans le bourgeon terminal), les feuilles voient leur surface augmenter. Dans le sol, les racines principales s'allongent et s'enfoncent verticalement. Des racines secondaires se forment et s'allongent à partir de la base des racines principales.

Doc. 3 : On constate que les racines principales, d'abord horizontales du fait du basculement du rhizotron, se sont incurvées durant ces 24 heures, reprenant une orientation verticale et une croissance dirigée vers le bas. La tige principale, elle aussi horizontale au début de l'expérience, est en train de s'incurver et reprend une orientation verticale, dirigée vers le haut. On peut déduire de ces résultats que le développement de la plante est sous l'influence de facteurs orientés. Pour les racines, on peut supposer que le facteur en cause est la gravité. Pour les tiges, l'influence peut être celle de la gravité et/ou celle de la lumière.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Une plante herbacée se développe à l'interface du sol et de l'air grâce à un système racinaire qui croît progressivement en profondeur dans le sol et aux parties aériennes, tiges et feuilles qui s'érigent à partir du sol.

3. Ressources complémentaires

- **Un article essentiel pour construire un rhizotron et s'initier à la culture des arabettes :**
F. Devienne-Barret, C. Richard-Molard et al., Ara-rhizotron: An effective culture system to study simultaneously root and shoot development of Arabidopsis.
Revue Plant and Soil (2006) 280:253-266
- **Site ressources Bordas :**
Fiche détaillée : Plan de construction d'un ara-rhizotron
- **Des informations précises sur la culture des arabettes :**
<http://www.calstatela.edu/faculty/vllnwth/grow.htm>
- **Pour se procurer des graines d'arabettes (gratuit pour les enseignants) :**
<http://dbsgap.versailles.inra.fr/portail/>
Pour se procurer la souche sauvage, choisir l'accession Col-0 (186AV) dans le catalogue.

La plante et ses échanges avec l'environnement (p. 112-113)

Connaissances	Capacités et attitudes
La plante développe des surfaces d'échanges de grande dimension avec l'atmosphère (échanges de gaz, capture de la lumière) et avec le sol (échange d'eau et d'ions).	Effectuer une estimation (ordre de grandeur) des surfaces d'échanges d'une plante par rapport à sa masse ou son volume.

1. Les intentions pédagogiques

Cette seconde série d'activités pratiques vise à montrer que dans l'air comme dans le sol, la plante réalise des échanges d'importance vitale. On montre que l'efficacité de ces échanges repose sur le développement de surfaces de grandes dimensions. Celles-ci sont mises en évidence en rapportant les surfaces foliaires et racinaires aux masses de ces organes : de très faibles masses correspondent à de très grandes surfaces.

Le programme suggère de comparer ces rapports surface/masse avec ceux d'un mammifère. Cette voie n'a pas été retenue, les organisations anatomiques très différentes des plantes et des mammifères rendant peu significative cette comparaison.

On a préféré axer les activités sur les techniques de mesure des organes végétaux (surfaces et longueurs mesurées à l'aide d'images numérisées et traitées par des logiciels adaptés ; masses mesurées avec des balances de précision). À travers l'observation d'organes au microscope optique, on pourra discuter de l'influence des échelles et instruments d'étude sur les résultats obtenus : selon qu'elles sont estimées à l'œil nu ou au microscope, les surfaces peuvent en effet être très différentes.

Le **document 1** étudie les feuilles à l'échelle macroscopique. Les surfaces foliaires sont mesurées avec le logiciel Mesurim, logiciel généraliste probablement connu des élèves, et donnant de très bons résultats. On en profite pour rappeler que ces vastes surfaces foliaires sont en rapport avec les échanges de gaz et la captation de l'énergie lumineuse indispensables à la réalisation de la photosynthèse.

Le **document 2** prolonge l'étude des surfaces foliaires, mais cette fois à l'échelle microscopique. Il pourra être utilisé seul, ou associé à l'observation de coupes anatomiques, voire à leur réalisation. C'est l'occasion de montrer que l'anatomie de la feuille est elle aussi très bien adaptée aux échanges liés à la photosynthèse. Les élèves découvrent l'existence des stomates et de l'atmosphère interne de la feuille. Leur ouverture variable en fonction des conditions d'environnement est abordée, et pourra être réinvestie dans les Activités pratiques 4 (voir p. 116), surtout si l'on insiste dès à présent sur le fait que de grandes quantités de vapeur d'eau peuvent s'échapper de la plante lorsque les stomates sont ouverts.

Le **document 3** propose quelques mesures de racines à l'échelle macroscopique. Il existe pour cela plusieurs logiciels spécialisés, capables de mesurer non seulement les surfaces, mais aussi les longueurs des racines de différents ordres, le nombre de racines, etc. Le choix s'est porté sur le logiciel EZ-Rhizo car il est gratuit et libre de droit dans un cadre pédagogique ; son utilisation est assez simple. Un tutoriel est mis à disposition sur le **site ressources Bordas** (voir ci-dessous les ressources complémentaires).

Le **document 4** prolonge l'étude des racines à l'échelle microscopique ; l'observation des poils absorbants, la description de leurs caractéristiques (finesse, longueur,

nombre...) montre là aussi l'adaptation des structures à la fonction (ici, l'absorption de la solution du sol). Cette activité peut donner lieu à des travaux pratiques : germinations d'arabette ou d'autres graines, observations à la loupe binoculaire, au microscope... On pourra à cet effet utiliser la page 135 du manuel.

2. Pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 et 2 : Au niveau macroscopique, on constate que la morphologie des feuilles est marquée par un très grand rapport surface/masse. Pour l'arabette utilisée dans le document 1, ce rapport vaut $80,5 \text{ cm}^2/\text{g}$. Cette caractéristique est due à la très faible épaisseur des feuilles par rapport à leur surface. Très plates et fines, les feuilles sont donc bien adaptées à la collecte de l'énergie lumineuse, et aux échanges de gaz. Au niveau microscopique, on constate l'abondance des cellules chlorophylliennes, leur disposition en un faible nombre de couches (parenchymes) entre deux épidermes transparents : la lumière atteint sans problème toutes les cellules chlorophylliennes. Les échanges de gaz (absorption du CO_2 , rejet de l' O_2 et de la vapeur d'eau) sont permis par les stomates, puisque ce sont les seules structures perméables à la surface de la feuille.

Doc. 3 et 4 : Les racines sont longues ($12,98 \text{ cm}$ dans l'exemple étudié dans le doc. 3) par rapport à leur surface ($0,81 \text{ cm}^2$). Cela correspond à des organes cylindriques, de très petit diamètre (ici, $0,81/12,98 = 0,062 \text{ cm}$ de diamètre) par rapport à leur longueur. Le rapport longueur/diamètre moyen est dans cet exemple de $12,98/0,062 = 209$. Leur longueur ainsi que leurs ramifications permettent à la plante d'explorer les différentes couches du sol autour d'elle, et éventuellement d'entrer en contact avec l'eau qu'il contient.

Doc. 4 : À l'échelle microscopique, les poils absorbants sont bien adaptés à leur fonction de prélèvement de l'eau et des ions du sol : finesse des parois, longueur de chaque poil, grand nombre de poils par unité de surface, etc.

Doc. 1 à 4 : Les mesures macroscopiques de surfaces réalisées en classe sont assez précises : seules les erreurs de manipulation et la résolution des appareils et logiciels de mesure limitent la précision. Par contre, les observations microscopiques révèlent l'existence de surfaces qu'il est impossible de mesurer en classe : la surface d'une feuille dépend de l'abondance de ses stomates, et de leur niveau d'ouverture... La surface d'une racine dépend du nombre et de la taille de ses poils absorbants... Finalement, les mesures réalisées en classe sous-estiment nettement les surfaces réelles des organes végétaux.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'organisation d'une plante est caractérisée par de très grandes surfaces d'échanges avec l'air, pour les feuilles, et avec le sol, pour les racines. L'organisation de la feuille est particulièrement bien adaptée à l'exercice de la fonction photosynthétique.

3. Ressources complémentaires

- **Pour télécharger le logiciel EZ-Rhizo :**
<http://www.psrg.org.uk/ez-rhizo.htm>
- **Site ressources Bordas :**
Tutoriel : utilisation du logiciel EZ-Rhizo
- **Pour télécharger le logiciel Mesurim :**
<http://pedagogie.ac-amiens.fr/svt/info/logiciels/Mesurim2/Telecharge.htm>

Les circulations de matières dans la plante (p. 114-115)

Connaissances	Capacités et attitudes
Des systèmes conducteurs permettent les circulations de matières dans la plante, notamment entre systèmes aérien et souterrain.	Réaliser et observer une coupe anatomique dans une tige ou une racine.

1. Les intentions pédagogiques

On a montré précédemment que la plante puise ses ressources pour partie dans le sol, pour partie dans l'air. Ces activités visent donc à montrer comment organes aériens et souterrains, interdépendants et complémentaires, sont mis en relation par des réseaux de tubes. On insiste sur la spécialisation des deux types de réseaux, sur leur continuité au sein de la plante, sur les particularités permettant de les identifier dans une coupe anatomique. Par contre, le niveau cellulaire n'étant pas un objectif du programme, les caractéristiques des cellules conductrices ne sont qu'évoquées.

Du point de vue des savoir-faire, ces activités peuvent être une occasion pour réaliser des coupes transversales et longitudinales dans divers organes végétaux, pour suivre un protocole rigoureux menant à la coloration des tissus, pour observer au microscope, photographier ou dessiner.

Le **document 1** introduit les notions de sève brute et élaborée, positionne les tissus conducteurs au sein de la plante. Le choix a été fait de montrer deux coupes d'un même organe (une tige), l'une transversale et l'autre longitudinale, afin de mettre en évidence l'aspect tridimensionnel des tissus conducteurs : ce sont des tubes. On a évité d'utiliser les termes « vaisseau » et « tube criblé », dans un souci de simplicité et de clarté. Seuls les termes « xylème » et « phloème » sont utilisés pour distinguer les tubes transporteurs de sève brute et ceux transporteurs de sève élaborée. On montre que les tubes du xylème et du phloème sont regroupés ; leur identification passe par leurs différences de coloration, d'épaisseur de paroi, de taille des cellules.

Le **document 2** présente trois coupes complémentaires de celles du document 1 (racine, feuille, fruit). L'utilisation conjointe des deux documents permet donc de montrer l'existence d'un réseau continu de xylème et de phloème au sein de la plante. D'autres coupes pourront être réalisées en classe : pétiole, pédoncule floral... On peut aussi observer le réseau de nervures d'une feuille (voir activités complémentaires).

2. Pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : La sève brute se forme dans les racines (au niveau des poils absorbants). Elle contient de l'eau et des ions du sol indispensables à la vie de toutes les cellules de la plante, et qui permettent aux cellules chlorophylliennes de réaliser leur photosynthèse. La sève élaborée se forme dans les organes chlorophylliens : elle contient de l'eau et des molécules organiques issues de la photosynthèse. Celles-ci nourrissent toutes les cellules de la plante qui ne réalisent pas la photosynthèse.

Doc. 1 et 2 : Les informations fournies sur cette double page doivent permettre de légender et de donner un titre précis aux photographies réalisées.

Doc. 1 et 2 : Les photographies montrent que xylème et phloème sont présents dans les racines (doc. 2c), dans les tiges (doc. 1b, 1c, 1d), dans les feuilles (doc. 2a) et dans les fruits (doc. 2b). Leurs tubes parcourent donc l'ensemble de la plante, reliant organes aériens et souterrains.

Doc. 1 et 2 : Le schéma réalisé ne sera pas qu'anatomique, il devra aussi être fonctionnel. Voir schéma bilan page 129.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'eau et les ions minéraux (sève brute), puisés dans le sol, parviennent jusqu'aux feuilles grâce à un réseau continu de tubes rigides et imperméables constituant le xylème. Les produits de la photosynthèse (sève élaborée) sont distribués dans la plante par d'autres tubes, constituant le phloème.

3. Ressources complémentaires

■ **Techniques pour observer le réseau de nervures d'une feuille :**

Faire une recherche sur le site <http://bricolages.loisirs-activites.com> avec le mot-clé « skeleton ».

■ **Observation des tissus conducteurs dans une courgette :**

<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Fruits/courgette.htm>

■ **Construire et utiliser une « tranchette » à deux rasoirs, instrument simple et efficace pour obtenir des coupes anatomiques très fines :**

<http://www.microscopies.com/DOSSIERS/Magazine/Articles/WD-TIPS/Tips-French.html>

Les plantes se protègent contre les agressions (p. 116-117)

Connaissances	Capacités et attitudes
La plante possède des structures et des mécanismes de défense (contre les agressions du milieu, les prédateurs, les variations saisonnières).	Recenser, extraire et exploiter des informations concernant des mécanismes protecteurs chez une plante (production de cuticules, de toxines, d'épines...).

1. Les intentions pédagogiques

Les exemples de structures et comportements de défense chez les plantes sont très nombreux. On a choisi de ne pas en dresser un catalogue, qui serait resté nécessairement superficiel, mais de privilégier l'étude approfondie de deux exemples marquants par leur originalité, leur degré de complexité.

Le **document 1** s'appuie sur l'exemple de l'oyat des dunes (*Ammophila arenaria*) pour illustrer l'adaptation à la sécheresse. Une manipulation simple est proposée, montrant la capacité des feuilles de cette plante à s'enrouler et à se dérouler selon l'hygrométrie ambiante. On trouvera des détails sur cette manipulation, sur l'anatomie de la feuille d'oyat et ses capacités de déformation dans les ressources complémentaires. Voir aussi les pistes d'exploitation ci-dessous. Il est possible de se procurer des plants d'oyat des dunes en jardinerie et de les cultiver au laboratoire. On évitera le prélèvement en milieu naturel : les dunes littorales sont des milieux fragiles et juridiquement protégés aux niveaux national et international.

Le **document 2** traite un exemple célèbre d'adaptation aux prédateurs. Les acacias africains présentent en effet de nombreuses adaptations leur permettant de limiter les dégâts provoqués par les grands herbivores. Trois grands types d'armes défensives ont été illustrés : la protection mécanique (épines), chimique (tanins et éthylène) et biologique (symbiose avec des fourmis).

La photographie **c** montre les épines bulbeuses de l'*Acacia drepanolobium* et les fourmis *Crematogaster nigriceps* qui vivent en symbiose.

2. Pistes d'exploitation

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : Sous l'épiderme de la face interne de la feuille d'oyat se trouve un tissu constitué de cellules chlorophylliennes. Lorsque l'atmosphère est humide, la feuille est dépliée, et expose ses cellules aux rayons solaires. L'épiderme de cette face est pourvu de nombreux stomates qui permettent les échanges gazeux associés à la photosynthèse. À proximité du tissu chlorophyllien, le xylème et le phloème assurent l'approvisionnement en eau et ions minéraux, l'exportation des produits de la photosynthèse. Les pertes en eau sont limitées chez l'oyat par diverses adaptations anatomiques et comportementales.

– **Au niveau anatomique :** la face externe est lisse (ce qui limite sa surface), presque dépourvue de stomates et recouverte d'une épaisse cuticule imperméable. Les pertes en eau à son niveau sont donc très faibles, mais en contrepartie elle ne permet pas les échanges de gaz indispensables pour la photosynthèse. La face interne (chlorophyllienne) présente de nombreux replis (côtes séparées par des cryptes). L'épiderme est

de plus recouvert de longs poils. Ces deux caractéristiques réduisent la vitesse du vent à proximité immédiate de l'épiderme. Ainsi, une atmosphère plus humide que l'air ambiant peut persister au niveau des stomates, ce qui limite le flux sortant de vapeur d'eau, sans interdire pour autant les échanges de gaz pour la photosynthèse.

– **Au niveau comportemental** : en atmosphère humide, la feuille est étalée. Elle expose ses cellules chlorophylliennes et les cryptes sont ouvertes, facilitant les échanges gazeux. Lorsque l'atmosphère devient sèche, la feuille se replie sur elle-même. Ce phénomène repose sur la différence d'affinité pour l'eau des deux faces de la feuille. La face externe contient des cellules mortes, rigides et hydrophobes : elles ne sont pas sensibles aux changements d'humidité, et peu déformables. Inversement, la face interne est recouverte de cellules hydrophiles et déformables : lorsque l'air devient sec, elles perdent de l'eau et leur taille diminue. Comme la face interne voit sa surface diminuer, tandis que la face externe ne change pas de surface, l'ensemble se déforme en s'enroulant. Le phénomène inverse se produit si l'atmosphère devient à nouveau humide.

Une fois enroulée, la feuille d'oyat n'expose plus à l'air sec qu'une faible surface cylindrique, lisse et imperméable. Cette configuration limite les pertes en eau mais aussi la photosynthèse.

Doc. 2 : Les acacias disposent d'épines qui peuvent être qualifiées d'armes mécaniques : longues, dures et pointues, elles blessent les prédateurs. Les tanins sont des molécules toxiques pour les herbivores, qui s'empoisonnent en se nourrissant des feuilles d'acacias. Ce sont en quelques sortes des armes chimiques. Enfin, l'association avec des fourmis relève à la fois des armes biologiques et chimiques, puisque ces insectes injectent leurs toxines aux herbivores qui consomment les feuilles de l'arbre.

Doc. 2 : L'expérience illustrée sur la photographie b montre que les tanins provoquent la précipitation des molécules (enzymes digestives) présentes dans la salive. Sous cette forme insoluble, les enzymes ne peuvent plus remplir leur rôle de digestion des aliments.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Au cours de l'évolution, les plantes ont développé de multiples adaptations qui leur permettent par exemple de résister à la sécheresse ou de se défendre contre les prédateurs (poils, épines, production de molécules toxiques, associations symbiotiques, etc.).

3. Ressources complémentaires

- **De nombreux exemples de molécules végétales impliquées dans la défense contre les agressions :**

http://www.ecosociosystemes.fr/metabolisme_secondaire.html

- **Des informations complémentaires sur l'oyat des dunes :**

http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/climatologie/d/adaptations-des-plantes-aux-climats-secs_476/c3/221/p6/

<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/mouvements/nasties-hydro.htm>

La fleur, une organisation en couronnes (p. 118-119)

Connaissances	Capacités et attitudes
L'organisation florale, contrôlée par des gènes de développement, et le fonctionnement de la fleur permettent le rapprochement des gamètes entre plantes fixées.	Réaliser la dissection d'une fleur simple et traduire les observations sous une forme schématique simple (diagramme floral).

1. Les intentions pédagogiques

L'organisation globale de la plante a été abordée dans les pages précédentes. Il s'agit maintenant de comprendre comment s'organise une fleur et de relier cette organisation à sa fonction d'organe reproducteur.

Les **documents 1 à 4** sont tous bâtis sur une même logique qui permet une découverte progressive des organes de la fleur (un document pour chacune des 4 couronnes composant une fleur) et une construction en parallèle du diagramme floral. La reproduction des végétaux a déjà été abordée en classe de sixième, mais beaucoup de choses auront pu être oubliées. C'est pourquoi un petit schéma de fleur simplifiée permet de repérer facilement les différents organes. L'exemple choisi est celui de la tulipe, une fleur de grande taille disponible une grande partie de l'année chez les fleuristes, mais le professeur pourra faire travailler ses élèves sur d'autres espèces puisées dans les jardins et la nature pour faire comprendre qu'il y a une unité d'organisation malgré des différences. Cette double page peut être utilisée comme un guide de dissection, mais le professeur pourra également choisir de faire travailler ses élèves sur document en comparant l'organisation de la tulipe avec celles d'autres espèces trouvées sur les pages de garde du début de manuel ou des sites Internet (voir **site ressources Bordas**).

2. Les pistes de travail

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 à 4 : La fleur est formée de 4 couronnes de pièces florales. En partant de l'extérieur de la fleur, on trouve :

- les sépales, qui ont un rôle protecteur vis-à-vis des autres pièces florales ;
- les pétales, qui jouent le même rôle protecteur et peuvent attirer les insectes ;
- les étamines, qui sont les organes mâles de la fleur produisant le pollen ;
- les carpelles, qui sont les organes femelles de la fleur, devant être fécondés par les grains de pollen.

Doc. 1 à 4 : L'organisation de la fleur est toujours la même, on note cependant des différences dans le nombre, la couleur ou la forme des pièces florales. Dans certains cas, pétales et sépales peuvent disparaître ou se confondre. Dans d'autre cas, les fleurs sont unisexuées et comportent soit les étamines, soit les carpelles.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

La fleur est organisée en couronnes concentriques. Au centre sont situés les organes reproducteurs protégés par des sépales et des pétales.

Le contrôle génétique de la morphogenèse florale (p. 120-121)

Connaissances	Capacités et attitudes
L'organisation florale, contrôlée par des gènes de développement, et le fonctionnement de la fleur permettent le rapprochement des gamètes entre plantes fixées.	<ul style="list-style-type: none"> – Extraire et exploiter des informations de différents documents. – Utiliser des logiciels de traitement de séquences nucléiques et protéiques.

1. Les intentions pédagogiques

L'objectif de cette double page est de comprendre que la construction des différentes pièces florales est sous le contrôle de gènes du développement. Il n'existe pas de système unitaire dans le monde végétal, même si on peut mettre en évidence une certaine homologie dans les gènes du développement floral d'espèces différentes. Le programme précise bien qu'il ne faut pas rechercher l'exhaustivité, mais privilégier le mécanisme global. L'exemple de l'arabette des dames choisi ici est un des plus documentés dans la littérature scientifique et complète l'approche anatomique du début de chapitre. Il permet donc une lecture assez simple et de nombreux supports sont disponibles.

Le **document 1** permet de retrouver la notion de gènes du développement, déjà abordée au cours du chapitre 2. On peut présenter l'hypothèse de Goethe, puis se demander comment des organes identiques peuvent évoluer différemment. Le nymphéa utilisé comme exemple est également une fleur courante, facile à se procurer.

Le **document 2** montre l'existence de mutants, avec la possibilité de réinvestir les connaissances dans la lecture des diagrammes floraux. Ce document est à utiliser en combinaison avec l'étude des gènes associés présentée par le document 4.

Le **document 3** présente le « système ABC » des gènes du développement floral chez l'arabette des dames. Ce document est la clé de lecture des mutations étudiées dans les documents 2 et 4.

Le **document 4** montre des résultats de comparaison de différents gènes des classes A, B et C. Le professeur pourra, selon son choix, faire travailler ses élèves sur ce document ou utiliser un logiciel de comparaison de séquences. Les fichiers nécessaires sont disponibles sur le **manuel numérique enrichi (version Premium)** et téléchargeables sur le **site ressources Bordas**.

2. Les pistes de travail

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : Les ébauches de pièces florales montrent une forte ressemblance entre elles dans les stades précoces de leur développement. On voit également que chez le nymphéa, il existe des stades intermédiaires entre les différentes pièces. Tout se passe donc comme si on partait d'une ébauche commune pour construire l'une ou l'autre des pièces florales. Il doit donc exister des contrôles génétiques différents pour chacune des pièces constituant la fleur.

Doc. 2 : Chez le mutant *pistillata*, les pétales laissent la place à des sépales et les étamines à des carpelles. Chez le mutant *apetala2*, il n'y a que trois couronnes : sépales,

étamines et carpelles ; les pétales ont disparu. Enfin, chez le mutant *agamous*, il n'y a plus d'organes reproducteurs, on a seulement une succession de couronnes de sépales et de pétales.

Doc. 3 et 4 : Chez le mutant *pistillata*, on remarque une mutation sur le gène de classe B. La lecture du document 3 montre que sans gène de classe B fonctionnel, la production de pétales et d'étamines est impossible, on a donc deux couronnes de sépales (dus à l'activité du gène de classe A seul) et deux couronnes de carpelles (dus à l'activité du gène de classe C seul).

Pour le mutant *apetala2*, c'est le gène de classe A qui présente une mutation. Ce gène permet néanmoins la formation d'une couronne de sépales mais n'interagit pas avec le gène de classe B pour former des pétales. On a ensuite une couronne d'étamines (due à l'activité des gènes de classe B et C ensemble) et une couronne de carpelles (due à l'activité du gène de classe C seul).

Enfin, le mutant *agamous* possède une mutation au niveau du gène de classe C. Sans ce gène, la formation des étamines et des carpelles est impossible. On a une succession de couronnes de sépales (dus à l'activité du gène de classe A seul) et de pétales (dus à l'activité des gènes de classe A et B ensemble).

Synthèse : réponse au problème à résoudre

La formation des différentes pièces florales est contrôlée par des gènes du développement. Il faut une combinaison précise de l'expression de ces gènes pour former des sépales, pétales étamines ou carpelles.

Pollinisation et coévolution (p. 122-123)

Connaissances	Capacités et attitudes
La pollinisation de nombreuses plantes repose sur une collaboration animal pollinisateur/plante produit d'une coévolution.	<ul style="list-style-type: none"> – Extraire et exploiter des informations de différents documents. – Mettre en évidence les relations entre une plante et un animal pollinisateur.

1. Les intentions pédagogiques

Il existe de multiples exemples de coévolution concernant la pollinisation. L'exemple de l'abeille choisi ici est un exemple simple qui parlera à tous les élèves. Il est de plus facile à rattacher à l'actualité et à d'autres thèmes car la préservation des abeilles est essentielle pour la biodiversité et pour les productions agricoles.

Le **document 1** donne une définition de la pollinisation. Ce rappel est utile car cette définition remonte à l'année de sixième pour les élèves.

Le **document 2** va présenter une des adaptations des plantes à leurs animaux pollinisateurs. L'observation concrète pourra être répétée sur d'autres espèces de fleurs. Le professeur pourra ainsi, à partir d'observations de plantes, faire rechercher aux élèves les adaptations morphologiques destinées à attirer les animaux, et celles facilitant la pollinisation.

Le **document 3** est le pendant du document 2 pour l'abeille et montre les adaptations la liant aux plantes. Le **document 4** permet de compléter ces adaptations avec celles permettant le transport du pollen. Ce dernier document donne également les résultats d'une étude montrant le lien fort qui existe entre abeilles pollinisatrices et fleurs pollinisées, lien dû à la coévolution des deux espèces.

2. Les pistes de travail

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : Les fleurs sont souvent hermaphrodites, mais ne peuvent en général pas s'autoféconder. Le pollen doit donc être transporté d'une fleur à une autre. Quand les étamines sont enfermées dans la corolle, le vent n'est pas le vecteur de transport idéal, et la fleur utilise les services d'animaux (souvent des insectes comme les abeilles) pour transporter le pollen.

Doc. 2 et 3 : Certaines fleurs possèdent à la base de leurs étamines des glandes nectarifères produisant un liquide sucré : le nectar. Ce liquide peut être récupéré par des insectes comme les abeilles qui l'utilisent pour se nourrir.

Doc. 3 : Les pièces buccales des abeilles forment un tube permettant d'aspirer des liquides et de le stocker dans le jabot. Elles peuvent donc aller prélever le nectar au contact des glandes nectarifères au fond de la corolle.

Doc. 4 : Les abeilles sont couvertes de poils permettant l'accroche facile des grains de pollen. De plus, comme une abeille visite le plus souvent la même espèce de plante, elle pourra déposer des grains de pollen dans une fleur compatible pouvant ainsi être fécondée.

L'étude décrite montre que lorsque les abeilles sont moins présentes dans un milieu, la biodiversité diminue. Certaines espèces disparaissent faute de pollinisateurs.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les plantes zoogames ont besoin des animaux pour transporter leurs pollen. Elles ont développé des caractéristiques qui se sont révélées efficaces pour attirer les animaux, comme la production d'un nectar sucré. En retour, les animaux pollinisateurs comme les abeilles ont développé des adaptations morphologiques permettant de prélever ce nectar et faciliter la pollinisation. On a donc bien une coévolution où chacune des deux espèces exerce une influence sur l'autre puisque renforçant l'avantage sélectif des adaptations développées.

3. Ressources complémentaires

■ Manuel numérique enrichi (version Premium) :

séquence vidéo : « Le bourdon et la sauge » (pollinisation de la sauge par le bourdon).

Activités pratiques

8

Dispersion des graines et coévolution (p. 124-125)

Connaissances	Capacités et attitudes
La dispersion des graines est nécessaire à la survie et à la dispersion de la descendance. Elle repose souvent sur une collaboration animal disséminateur/plante produit d'une coévolution.	<ul style="list-style-type: none"> – Extraire et exploiter des informations de différents documents. – Concevoir et réaliser des protocoles expérimentaux. – Mettre en évidence les relations entre une plante et un animal assurant sa dissémination.

1. Les intentions pédagogiques

Dans cette double page, on s'intéresse à la dispersion des graines, mais la logique reste la même que pour la pollinisation. Un minimum de connaissances sur la transformation de la fleur en fruit est nécessaire, même si ce n'est pas l'objectif de l'étude.

Il existe de multiples modes de zoochorie, les plus classiques étant une dispersion *via* les excréments ou un transport passif de graines ou fruits accrochés dans les poils ou les plumes. L'exemple choisi ici est intéressant car il montre de façon claire des adaptations de chacun des deux partenaires en fonction de l'autre.

Le **document 1** rappelle le besoin de dissémination des graines pour une plante fixée. Comme pour la pollinisation, la vie fixée impose de recourir à des adaptations particulières. Quand une espèce animale est impliquée, le mécanisme est bien souvent, de façon plus ou moins évidente, le résultat d'une coévolution.

Le **document 2** rappelle les principes de la transformation de la fleur en fruit et montre la présence de réserves de matières organiques dans différentes zones. Des tests pourront être menés sur différents fruits, selon le choix du professeur, pour montrer l'existence d'une diversité de réserves tant du point de vue biochimique que des structures qui les stockent. Ceci pourra alors être mis en relation avec des régimes alimentaires d'animaux, plus ou moins spécialisés.

Le **document 3** décrit un exemple précis de coévolution étroite entre une plante et un lézard. On pourra y retrouver aisément les différentes adaptations des deux partenaires.

2. Les pistes de travail

Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 : Les plantes étant fixées au sol, les graines qu'elles produisent ne peuvent *a priori* pas espérer mieux que de tomber au pied de la plante mère. Cela pose deux problèmes : la colonisation de nouveaux espaces est impossible et la plante mère représente une redoutable concurrence en ce qui concerne la lumière, l'eau ou les ions minéraux. C'est pourquoi la plupart des espèces de plantes à fleurs ont développé des stratégies au cours de l'évolution leur permettant de disséminer leurs graines à bonne distance.

Doc. 2 : La plupart des pièces florales fanent (sépalés, pétales et étamines). Le gynécée va par contre se développer et donner un fruit et les ovules contenus dans les carpelles deviennent des graines. Ces graines contiennent des réserves qui seront utilisées par la plantule lors de la germination. Le péricarpe est formé par la transformation de la paroi de l'ovaire. Il peut être charnu, c'est-à-dire contenir des réserves de matières organiques. Ces molécules ne serviront pas pour la graine, mais attireront des animaux. Si les graines résistent à la digestion, elles seront déposées avec les excréments loin de la plante mère et pourront germer dans un espace favorable.

Doc. 3 : On note des interactions entre le lézard et le cactus : les fruits produits par le cactus sont mangés par le lézard ; une fois digérées, les graines se retrouvent dans les excréments et germent. L'intérêt du lézard est de trouver une source d'eau dans les fruits, celui du cactus est de trouver un moyen de disséminer ses graines.

Le cactus montre des adaptations à cette association : il produit des fruits sucrés et riches en eau, attirant les lézards. Ces fruits sortent à des heures où les lézards sont actifs (ils sont d'ailleurs presque les seuls).

Le lézard présente également des caractéristiques issues de l'association : sa taille lui permet d'atteindre les fruits et de les avaler. La digestion des graines par les sucs digestifs du lézard est indispensable pour l'accomplissement de la germination.

Synthèse : réponse au problème à résoudre

La dissémination des graines résulte souvent d'adaptations réciproques entre la plante et un animal. Ces adaptations résultent d'une coévolution, chacune d'entre elles présentant un avantage sélectif pour l'espèce qui en a hérité.

Pour la partie « **Maîtriser ses connaissances** » :

- la correction des exercices « **Pour s'entraîner** » figure à la fin du manuel de l'élève, pages 396 à 401 ;
- la correction de la partie « **Objectif BAC** » comporte seulement une correction des QCM ; en effet, les questions de synthèse sont des restitutions de connaissances où toute liberté est laissée à l'élève pour construire une réponse organisée.

6 La formation de la fleur

Les bonnes réponses sont : **1-c ; 2-d.**

7 Structure et fonction de la feuille

Voir schéma bilan p. 129 du manuel de l'élève.

8 L'origine de fleurs doubles

La variété Souvenir de St Anne's ressemble plus à l'églantine qu'à la variété Souvenir de la Malmaison dont elle est pourtant issue : cette dernière possède, en effet, un très grand nombre de pétales et assez peu d'étamines, alors que c'est l'inverse pour le Souvenir de St Anne's. Quand on analyse l'expression des gènes du développement floral chez ces deux variétés, on remarque que la variété Souvenir de la Malmaison n'exprime pas le gène de classe C. Le schéma de construction des pièces florales de la page 121 montre que ce gène est nécessaire à la production des étamines et carpelles.

Dans la variété Souvenir de la Malmaison, l'expression des gènes du développement floral se fait donc au détriment des étamines et carpelles mais au profit des pétales.

La mutation du gène de classe C chez le Souvenir de St Anne's l'a rendu fonctionnel et a diminué le nombre de pétales.

9 Relations évolutives entre une plante et des insectes

- Les passiflores tropicales se sont adaptées aux insectes herbivores en sécrétant des toxines.
- Les papillons *Heliconius* se sont adaptés à la présence de toxines chez les passiflores : les enzymes digestives de leurs chenilles sont capables de dégrader ces toxines.
- Certaines passiflores tropicales se sont adaptées à la prédation exercée par les chenilles d'*Heliconius*, elles possèdent des nectaires qui présentent deux avantages : la forme et la couleur de ces glandes rappellent celles des œufs d'*Heliconius*, ce qui dissuade les femelles de ces papillons de déposer leurs œufs, comme le montre le graphique d. Ces plantes accueillent moins de chenilles d'*Heliconius* que celles qui sont dépourvues de nectaires. Les dégâts occasionnés sont donc plus limités. De plus, les nectaires attirent les fourmis qui se nourrissent du nectar, mais aussi des chenilles d'*Heliconius*. Il existe donc une association à bénéfice mutuel entre ces passiflores et les fourmis.

10 Une coévolution entre insectes et figuiers

Le document 1 montre que la pollinisation des figuiers dépend de petits insectes, les agaonides. Après sa naissance dans une fleur, la femelle sort de la figue en récupé-

rant du pollen ; elle va ensuite aller pondre dans une autre figue et y déposer son pollen, ce qui polliniserà les fleurs femelles de cette figue.

Les agaonides sont adaptés à cette association car ils peuvent entrer dans les figues par l'ostiole. Leurs membres ou leur comportement favorise le prélèvement du pollen, et enfin, ils sont souvent spécialisés dans une seule espèce de figuier.

De leur côté, les figuiers se sont adaptés à cette association en offrant une protection ainsi qu'une source de nourriture aux larves d'agaonides. La maturité décalée des fleurs mâles et femelles est également essentielle dans ce système.

Le document 4 montre que ces associations sont très étroites avec des groupes d'agaonides liés à des groupes précis de figuiers. On voit que les phylogénies correspondent, ce qui fait penser que les évolutions des deux groupes se sont faites en parallèle.

La pollinisation des figuiers se fait donc grâce à une association avec les agaonides née d'une coévolution entre ces deux groupes.

11 Le rôle des poils absorbants

La comparaison des observations réalisées met en évidence une migration de la coloration qui confirme le rôle attribué aux poils absorbants.