

COLLECTION

Claude Lizeaux • Denis Baude



**SCIENCES de la VIE et de la TERRE**

**Programme 2011**

# Livre du professeur

Sous la direction de Claude Lizeaux et de Denis Baude,  
ce livre a été écrit par :

Denis Baude  
Christophe Brunet  
Bruno Forestier  
Emmanuelle François  
Yves Jusserand

Claude Lizeaux  
Paul Pillot  
Stéphane Rabouin  
André Vareille

# Sommaire

Partie	Les ressources du manuel numérique .....	3
	Le programme de SVT 1 <sup>re</sup> S .....	5
Partie 1	<b>Expression, stabilité et variation du patrimoine génétique</b>	
	Chapitre 1 Reproduction conforme et réPLICATION de l'ADN .....	28
	Chapitre 2 Variabilité génétique et mutation de l'ADN .....	42
	Chapitre 3 L'expression du patrimoine génétique .....	55
	Chapitre 4 Génotype, phénotype et environnement .....	67
Partie 2	<b>La tectonique des plaques : histoire d'un modèle</b>	
	Chapitre 1 La naissance d'une théorie : la dérive des continents .....	79
	Chapitre 2 De la dérive des continents à la tectonique des plaques .....	90
	Chapitre 3 La tectonique des plaques : un modèle qui s'enrichit .....	101
Partie 3	<b>Enjeux planétaires contemporains</b>	
	Chapitre 1 Tectonique globale et ressources géologiques locales .....	121
	Chapitre 2 Tectonique des plaques et recherche d'hydrocarbures .....	124
	Chapitre 3 Pratiques agricoles et gestion de l'environnement .....	133
	Chapitre 4 Pratiques alimentaires et perspectives globales .....	144
Partie 4	<b>Corps humain et santé</b>	
	Chapitre 1 Devenir homme ou femme .....	162
	Chapitre 2 Sexualité et procréation .....	171
	Chapitre 3 Variation génétique et santé .....	186
	Chapitre 4 La vision : de la lumière au message nerveux .....	201
	Chapitre 5 Cerveau et vision .....	216

© Bordas/SEJER, Paris, 2011  
ISBN 978-2-04-732841-5

« Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants-droit, ou ayants-cause, est illicite (article L. 122-4 du Code de la Propriété Intellectuelle). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par l'article L. 335-2 du Code de la Propriété Intellectuelle. Le Code de la Propriété Intellectuelle n'autorise, aux termes de l'article L. 122-5, que les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration ».

# Les ressources du manuel numérique

Les ressources du manuel numérique ont été rassemblées et conçues pour une utilisation interactive et ouverte. Elles laissent une large place à la liberté pédagogique du professeur ou de l'équipe enseignante autant dans les choix de documents ou d'activités que dans les modalités de mise en œuvre. L'une des lignes conductrices a été de permettre une mise en activité de l'élève développant interrogation, réflexion et recherche d'explication tout en privilégiant son autonomie.

Ces ressources sont de divers ordres :

- des vidéos pour observer et mieux comprendre ;
- des modélisations dynamiques de molécules en trois dimensions ;
- des diaporamas pour faciliter l'expérimentation, des outils pour les TP ;
- des animations en lien avec les activités du livre ;
- des schémas bilan animés ;
- des fiches pour aller plus loin ;
- des exercices interactifs pour s'entraîner et s'évaluer.

## Des vidéos pour observer et mieux comprendre

*Les vidéos présentant des « manipulations de paillasse »* ne se substituent pas à une activité pratique des élèves :

- Certaines apportent à l'élève les pré-requis nécessaires pour aborder un thème donné. Ainsi, l'étude du cristallin ou des photorécepteurs implique une connaissance de la place occupée par ces organes dans l'œil. La vidéo de la dissection de l'œil de bœuf (par ailleurs difficile à réaliser dans la classe) satisfait à cet objectif.
- D'autres peuvent se substituer à une manipulation, soit par manque de matériel, soit par un choix délibéré du professeur. Ainsi, on peut imaginer que pour des raisons pratiques ou pédagogiques, le professeur fasse un autre choix que la réalisation de mesures de la vitesse de propagation d'ondes vibratoires dans les roches. L'utilisation de la vidéo de cette manipulation sera alors utile. À l'inverse, elle pourra servir de guide technique pour la manipulation elle-même.

*Les vidéos d'actualités issues des médias ou d'archives* : ces courts « articles » sont précieux pour mettre en place un questionnement, lancer un débat ou apporter des éléments d'explication. À titre d'exemple, la vidéo « Les nitrates dans l'eau » qui fait état de la pollution des eaux par les nitrates

d'origine agricole, conséquence d'une agriculture intensive... ou « Agriculture, produire plus » sur les possibilités d'accroître la production tout en préservant l'environnement.

**Des vidéos scientifiques** sorties du laboratoire ou du service spécialisé : le diagnostic de sexe par échographie chez le fœtus ou une vidéo du déroulement de la division cellulaire.

Le site [www.bordas-svtlycee.fr](http://www.bordas-svtlycee.fr) propose des liens vers des ressources extérieures. Exemples de vidéos : « La découverte du rift océanique (extrait de l'opération Famous) », « une campagne de forage du Glomar Challenger », « l'ICSI (Intra Cytoplasmic Sperm Injection) ».

## Des modélisations dynamiques de molécules en trois dimensions

Le manuel est émaillé de photographies de molécules ou de complexes moléculaires en trois dimensions. La plupart sont également proposées sous forme de modélisations dynamiques (vidéos). L'objectif n'est pas de se substituer à une activité de l'élève avec un logiciel de traitement de données moléculaires (MolUSc, Rastop ou autres) mais, là encore, de créer une situation de choix pédagogique. Les vidéos ont été construites pour être des outils de recherche d'explication (comment l'ARN-polymérase réalise-t-elle une réparation de l'ADN ? Pourquoi l'hémoglobine S s'organise-t-elle en fibres dans les hématies falciformes ?, etc.)

L'utilisation peut être collective ou dans le cadre d'un atelier.

L'index des fichiers de coordonnées moléculaires figure à la fin de chaque vidéo et sont téléchargeables sur le site [www.bordas-svtlycee.fr](http://www.bordas-svtlycee.fr).

## Des diaporamas pour faciliter l'expérimentation, des outils pour les TP

Un certain nombre d'activités expérimentales requièrent le suivi par l'élève d'un protocole rigoureux. C'est le cas de l'irradiation d'une culture de levures (partie 1 chapitre 2) ou la réalisation d'un antibiogramme (partie 2 chapitre 3). L'option a été prise de proposer un diaporama guidant l'élève pas à pas dans la conduite de son protocole. Ce choix s'applique notamment à la mise en œuvre d'une PCR (partie 1 chapitre 1). Dans ce diaporama a été intégrée une part d'explication biologique du processus mis en jeu. Le diaporama en collectif ou en libre-service est alors un substitut de la manipulation (qui requiert

l'équipement nécessaire).

L'aide à la « lecture » de lames minces de roches observées au microscope est un outil qui permettra à l'élève, en balayant des microphotographies de roches, de collecter les indications nécessaires à la détermination des minéraux. Il a sa place sur l'ordinateur à côté du microscope.

### **Des animations en lien avec les activités du livre**

La compréhension d'un mécanisme, d'un phénomène ou d'une technique peut être facilitée par un schéma. Elle sera plus facile si l'élève peut générer différentes situations et appréhender les conséquences à travers une animation. Les animations sur la myopie, la presbytie et les corrections optiques possibles (partie 4 chapitre 4), celles sur la tomographie sismique (partie 2 chapitre 4), les failles transformantes (partie 2 chapitre 3) ou la formation des pétroles en lien avec l'ouverture de la Téthys (partie 3 chapitre 2) en sont des exemples. Si l'utilisation en collectif est possible, celle en atelier ou libre-service reste plus adaptée.

### **Des schémas bilan animés**

Un schéma bilan offre de nombreuses informations souvent très symbolisées et de façon très synthétique. Une telle représentation est souvent difficile à exploiter par l'élève dans la mesure où il ne sait pas où démarrer et comment en effectuer la lecture. Ceci est encore plus vrai s'il s'agit d'un schéma montrant un mécanisme de régulation par exemple (partie 4 chapitre 2), un enchaînement de causes et de conséquences (partie 4 chapitre 1), un

flux de matière ou d'énergie (partie 3 chapitre 3). Le schéma bilan animé propose une progression. Il peut être exploité en collectif, comme support de synthèse mais également individuellement ou en petit groupe : les élèves élaborent alors par eux-mêmes la synthèse en s'appuyant sur l'outil proposé.

### **Des fiches pour aller plus loin**

Elles ont été rédigées à la manière d'articles proches de l'actualité scientifique tout en restant à la portée des élèves. L'intention est d'aller plus loin, s'interroger ou débattre sur des problèmes de société, de santé, d'environnement, en lien avec l'histoire des sciences ou l'histoire des arts. Exemples : « La maladie de Huntington : une enzyme de réparation de l'ADN en cause », « Risques solaires : profiter du soleil en toute sécurité », « Les terres agricoles mondiales, objet de convoitise, « John Dalton et le daltonisme » (article de J. Dalton dans le *Journal of science of Edinburgh*, 1794).

Certaines d'entre elles renvoient vers des sites d'intérêt.

### **Des exercices interactifs pour s'entraîner et s'évaluer**

Ils reprennent les exercices du livre (QCM, vrai ou faux, utiliser ses compétences). Ils ne sont pas seulement un outil d'évaluation mais se veulent être également un instrument d'apprentissage. Le choix a donc été fait de valider ou non la réponse de l'élève mais de ne pas proposer les bonnes réponses. L'élève est renvoyé vers un document ou une activité lui permettant de confirmer ou de préciser ses connaissances. L'aide est disponible à tout moment.

# Programme de Sciences de la Vie et de la Terre en classe de Première scientifique

(Bulletin officiel n° 9 du 30 septembre 2010)

## Préambule

### I. LES SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE AU LYCÉE

#### 1. Les sciences de la vie et de la Terre dans le parcours de l'élève en lycée

- *Les objectifs de l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre*

Au lycée, les sciences de la vie et de la Terre sont une voie de motivation et de réussite pour la poursuite de la formation scientifique après le collège et la préparation à l'enseignement supérieur ; elles participent également à l'éducation en matière de santé, sécurité, environnement, de tout élève qui choisira une orientation vers des filières non scientifiques. La discipline vise trois objectifs essentiels :

- aider à la construction d'une culture scientifique commune fondée sur des connaissances considérées comme valides tant qu'elles résistent à l'épreuve des faits (naturels ou expérimentaux) et des modes de raisonnement propres aux sciences ;

- participer à la formation de l'esprit critique et à l'éducation citoyenne par la prise de conscience du rôle des sciences dans la compréhension du monde et le développement de qualités intellectuelles générales par la pratique de raisonnements scientifiques ;

- préparer les futures études supérieures de ceux qui poursuivront sur le chemin des sciences et, au-delà, les métiers auxquels il conduit ; aider par les acquis méthodologiques et techniques ceux qui s'orienteront vers d'autres voies.

- *Trois thématiques structurantes*

Pour atteindre ces objectifs, les programmes s'articulent autour de trois grandes thématiques qui, dans une large mesure, ne sont pas indépendantes.

**La Terre dans l'Univers, la vie et l'évolution du vivant.** Il s'agit de montrer - dans le cadre des domaines propres aux sciences de la vie et de la Terre - que la science construit, à partir de méthodes d'argumentation rigoureuses fondées sur l'observation du monde, une explication cohérente de son état, de son fonctionnement et de son histoire. Au-delà de la perspective culturelle, cette ligne de réflexion prépare aux métiers les plus proches des sciences fondamentales (recherche, enseignement).

**Enjeux planétaires contemporains.** Il s'agit de montrer comment la discipline participe à l'appréhension rigoureuse de grands problèmes auxquels l'humanité d'aujourd'hui se trouve confrontée. Au-delà de la préoc-

cupation citoyenne qui prépare chacun à l'exercice de ses responsabilités individuelles et collectives, la perspective utilisée ici conduit aux métiers de la gestion publique, aux professions en lien avec la dynamique de développement durable et aux métiers de l'environnement (agronomie, architecture, gestion des ressources naturelles).

**Corps humain et santé.** Centrée sur l'organisme humain, cette thématique permet à chacun de comprendre le fonctionnement de son organisme, ses capacités et ses limites. Elle prépare à l'exercice des responsabilités individuelles, familiales et sociales et constitue un tremplin vers les métiers qui se rapportent à la santé (médecine, odontologie, diététique, épidémiologie).

Ces trois thématiques ne sont en rien des catégories rigides mais bien des directions de réflexion. Elles ne se substituent pas aux découpages traditionnels de la discipline (biologie et géologie par exemple) et conduisent à la découverte progressive des grands domaines qu'elle recouvre. En particulier, les sciences de la Terre conservent une originalité qu'il convient de ne pas nier. Les thèmes généraux aident à montrer la cohérence globale du champ intellectuel concerné, centré sur un objet d'étude la nature – et des méthodes fondées sur la confrontation entre les idées scientifiques et les faits - naturels ou expérimentaux. Elles aident aussi à situer l'enseignement dispensé dans la perspective de la construction d'un projet de vie propre à chaque élève.

Dans chaque thématique, la construction des savoirs se réalise peu à peu tout au long de la scolarité. Cette continuité est conçue pour faciliter la progressivité des apprentissages, sans pour autant empêcher la souplesse nécessaire à l'élaboration d'un parcours de formation pour chaque élève.

- *Les sciences de la vie et de la Terre dans le nouveau lycée*

L'enseignement des sciences de la vie et de la Terre prend en compte les objectifs généraux de la réforme des lycées.

Pour participer à l'affirmation du **caractère généraliste de la Première**, le programme de sciences de la vie et de la Terre fait le choix d'aborder une palette de thèmes variés et, par conséquent, accepte de ne pas trop les approfondir. Il s'agit de montrer la diversité des sujets qu'abordent les sciences de la vie et de la Terre dans l'espoir que chaque élève y trouvera matière à répondre à ses attentes. Les bases ainsi établies, le plus souvent à partir d'étude d'exemples concrets et motivants, conduiront, dans les classes ultérieures, à des approfondissements, des généralisations, des approches complémentaires. Ces bases larges permettront à l'élève de déterminer ses choix pour le cycle terminal en connaissance de cause.

Pour participer à une **meilleure information des élèves** sur les possibilités qui s'offrent à eux, au-delà même du lycée, le programme s'organise, comme cela a été souligné, autour de thématiques qui aident au repérage de grands secteurs d'activités professionnelles. En outre, chaque fois que cela sera possible, les professeurs saisiront les occasions offertes afin d'attirer l'attention sur des métiers plus précis, dont l'exercice professionnel présente un certain rapport avec les questions abordées en classe.

Pour participer à la **facilitation des corrections de trajectoires**, le programme sera organisé en prenant en compte trois préoccupations. Certaines thématiques abordées seront communes aux classes de Première scientifiques et non scientifiques (avec un niveau de précision différent). Certaines thématiques de classe de Première scientifique seront traitées de telle sorte que seules leurs conclusions les plus générales soient nécessaires en Terminale. Certaines thématiques de terminale scientifique se situeront directement dans la continuité des acquis de la classe de Seconde.

Pour participer à la **prise en compte de la diversité des élèves**, une grande marge de liberté est laissée aux professeurs, seuls à même de déterminer les modalités pédagogiques adaptées à leur public. En outre, il est toujours possible de diversifier les activités à l'intérieur d'une même classe pour traiter un même point du programme.

## 2. Les conditions d'exercice de la liberté pédagogique du professeur

Le programme est conçu pour laisser une **très large place à la liberté pédagogique** du professeur et/ou de l'équipe disciplinaire. Cette liberté porte sur les **modalités didactiques** mises en œuvre, sur l'ordre dans lequel seront étudiés les thèmes, sur les exemples choisis ainsi que, dans une mesure raisonnable, sur l'**ampleur de l'argumentation** développée dans le cadre de tel ou tel sujet. C'est pour respecter la liberté de choix d'exemples que les objectifs de formation sont définis avec un grand degré de généralité. Ces exemples, toujours localisés, seront choisis, pour certains au moins, dans un contexte proche.

Néanmoins, la liberté pédagogique ne saurait émanciper des objectifs de formation rappelés ci-dessus. Pour aider à atteindre ces objectifs, quelques principes didactiques généraux sont rappelés ci-dessous, dont il convient de faire un usage adapté.

### • *Les compétences : une combinaison de connaissances, capacités et attitudes*

L'acquisition des connaissances reste un objectif important de l'enseignement, mais il doit être replacé dans un tout dont font aussi partie, capacités et attitudes. L'affirmation de l'importance de cette formation intellectuelle et humaine explique le niveau de généralité des exigences de connaissances. **Connaissances, capacités et attitudes sont trois objectifs de formation de statut également respectables.** Ceci conduit à leur porter la même attention au moment de la conception des

mises en œuvre pédagogiques, y compris les évaluations. Celles-ci prendront en compte, chaque fois que possible, ces trois objectifs de formation.

Si les connaissances scientifiques à mémoriser sont raisonnables, c'est pour permettre aux enseignants de consacrer du temps à faire comprendre ce qu'est le savoir scientifique, son mode de construction et son évolution au cours de l'histoire des sciences.

### • *La démarche d'investigation*

La poursuite des objectifs de formation méthodologique implique généralement que l'on mette en œuvre une pédagogie active, au cours de laquelle **l'élève participe** à l'élaboration d'un projet et à la construction de son savoir. La démarche d'investigation, déjà pratiquée à l'école primaire et au collège, prend tout particulièrement son sens au lycée et s'appuie le plus souvent possible sur des travaux d'élèves en laboratoire. **Des activités pratiques, envisageables pour chacun des items du programme, seront mises en œuvre chaque fois que possible.** Le professeur s'assurera que les élèves utilisent des méthodes et outils différenciés sur l'ensemble de l'année. Ainsi, chaque élève rencontrera dans les meilleures conditions l'occasion d'aller sur le terrain, de disséquer, de préparer et réaliser des observations microscopiques, d'expérimenter avec l'aide d'un ordinateur, de modéliser, de pratiquer une recherche documentaire en ligne, etc.

Il est d'usage de décrire une démarche d'investigation comme la succession d'un certain nombre d'étapes types :

- une situation motivante suscitant la curiosité ;
- la formulation d'une problématique précise ;
- l'énoncé d'hypothèses explicatives ;
- la conception d'une stratégie pour éprouver ces hypothèses ;
- la mise en œuvre du projet ainsi élaboré ;
- la confrontation des résultats obtenus et des hypothèses ;
- l'élaboration d'un savoir mémorisable ;
- l'identification éventuelle de conséquences pratiques de ce savoir.

Ce canevas est la conceptualisation d'une démarche type. Le plus souvent, pour des raisons variées, il convient d'en **choisir quelques aspects pour la conception des séances**. C'est là aussi un espace de liberté pédagogique pour le professeur qui vérifiera toutefois qu'à l'issue de l'année, les différentes étapes auront bien été envisagées.

Pour que la démarche d'investigation soit un réel outil de formation, une vision qualitative plutôt que quantitative est préférable : mieux vaut argumenter bien et lentement qu'argumenter mal et trop vite. Cette démarche constitue le cadre intellectuel approprié pour la mise en œuvre d'activités de laboratoire, notamment manipulatoires et expérimentales, indispensables à la construction des savoirs de la discipline.

### • *Les technologies de l'information et de la communication*

Les technologies de l'information et de la communication seront mises en œuvre en de nombreuses circonstances.

Il pourra s'agir de technologies généralistes dont on fera ici un usage spécialisé, notamment Internet en utilisation conjointe avec des techniques de laboratoire classiques. Mais on veillera aussi à développer les savoir-faire des élèves relativement aux technologies plus spécialisées, comme l'**expérimentation assistée par ordinateur**, technique indispensable pour une formation moderne et efficace des élèves.

L'usage de **logiciels, généralistes ou spécialisés**, est encouragé. Les sciences de la vie et de la Terre participent à la préparation du B2i niveau lycée.

Les productions pédagogiques, les travaux d'élèves, gagneront à être exploités, en classe et hors de la classe dans le cadre d'un **environnement numérique de travail** (ENT).

#### • *La pratique de démarches historiques*

L'approche historique d'une question scientifique peut être une **manière originale de construire une démarche d'investigation**. L'histoire de l'élaboration d'une connaissance scientifique, celle de sa modification au cours du temps, sont des moyens utiles pour comprendre la nature de la connaissance scientifique et son mode de construction, avec ses avancées et éventuelles régressions. Il conviendra de veiller à ce que cette approche ne conduise pas à la simple évocation d'une succession événementielle et à ne pas caricaturer cette histoire au point de donner une fausse idée de la démonstration scientifique. Si certains arguments ont une importance historique majeure, il est rare qu'un seul d'entre eux suffise à entraîner une évolution décisive des connaissances scientifiques ; de même, il serait vain de prétendre faire « réinventer » par les élèves, en une ou deux séances, ce qui a nécessité le travail de plusieurs générations de chercheurs.

#### • *L'approche de la complexité et le travail de terrain*

Le travail de terrain est un moyen privilégié pour l'**approche de situations complexes réelles**. Le programme comporte, dès la classe de seconde, plusieurs items qui se prêtent bien à la réalisation d'un travail hors de l'établissement (sortie géologique, exploration d'un écosystème, visite de musée scientifique, d'entreprise, de laboratoire). Un tel déplacement permettra souvent de collecter des informations utiles pour plusieurs points du programme et susceptibles d'être exploitées à plusieurs moments de l'année.

Un tel travail de terrain doit s'exercer en cohérence avec un projet pédagogique pensé dans le contexte de l'établissement.

Les activités en laboratoire doivent aussi être l'occasion d'aborder des tâches complexes. À partir d'une question globale, elles sont l'occasion de développer les compétences des élèves et leur autonomie de raisonnement.

#### • *L'autonomie des élèves et le travail par atelier*

Le lycéen, dès la Seconde, doit se préparer à **une autonomie de pensée et d'organisation qui lui sera indispensable pour réussir ses études supérieures**. Les travaux

pratiques se prêtent particulièrement au développement de cette compétence. Pour y parvenir, il est bon de concevoir les séances afin que l'élève dispose d'une certaine marge de manœuvre dans la construction de sa démarche.

La liberté de choix sera parfois exploitée en différenciant les exemples étudiés au sein d'une même classe. Chaque groupe d'élèves a alors en charge l'organisation autonome de son travail, sous la conduite du professeur. Échanges et débats conduisent ensuite à tirer des conclusions plus générales que l'étude collective d'un exemple unique ne le permettrait. Ils sont en outre l'occasion de développer les qualités d'expression et d'écoute.

#### • *L'évaluation des élèves*

Dès la classe de Seconde, les évaluations formatives jouent un rôle important pour aider les élèves à s'adapter à leur nouveau cadre de travail.

Les dimensions **diagnostique, formative et sommative** en termes de connaissances, de capacités et d'attitudes ont chacune leur utilité. Le professeur choisit des supports pertinents afin d'aider les élèves le long de leur parcours. Il facilite ainsi un accompagnement personnalisé permettant un suivi des apprentissages et une orientation éclairée.

Sans exagérer le temps annuel consacré à l'évaluation sommative, il convient de concevoir des contrôles réguliers, de durées variées et ciblés sur quelques compétences bien identifiées qui varient d'un contrôle à l'autre. L'organisation précise des évaluations dépend de la classe et constitue, tout au long du lycée, un cheminement progressif qui conduit au baccalauréat.

Les activités pratiques individuelles des élèves, qu'il convient de développer chaque fois que possible, sont également l'occasion d'évaluer les acquisitions des capacités techniques et expérimentales. Non seulement le suivi de l'acquisition de capacités expérimentales permet de vérifier le développement d'une forme de rigueur de raisonnement spécifique aux sciences expérimentales, mais encore, c'est une préparation progressive, indispensable dès la classe de Seconde, à une forme d'évaluation que les élèves pourront rencontrer au baccalauréat et au cours de leurs études supérieures. L'évaluation de la capacité à communiquer à l'oral est à renforcer.

### 3. Les sciences de la vie et de la Terre, discipline d'ouverture

Les sciences de la vie et de la Terre sont une discipline ouverte sur les grands problèmes de la société contemporaine, comme le montrent les intitulés du programme eux-mêmes.

#### • *Les préoccupations éducatives*

Les nombreuses connexions avec les objectifs éducatifs transversaux (santé, environnement, etc.) seront mises en évidence le plus souvent possible.

#### • *La convergence avec d'autres disciplines*

Au-delà de la parenté avec les autres sciences expérimentales que sont les sciences physiques et chimiques,

les programmes de sciences de la vie et de la Terre fournit l'occasion d'interactions avec d'autres disciplines, notamment avec les mathématiques (par la formalisation utilisée et la sensibilisation à une approche statistique), la géographie (thèmes de l'énergie et de l'eau) et l'EPS (thème activité physique).

### • *L'histoire des arts*

En continuité avec les préconisations contenues dans les programmes de collège, il est bon de souligner que les sciences de la vie et de la Terre peuvent être l'occasion d'intéressantes relations avec l'enseignement d'histoire des arts. Les professeurs choisiront, en cohérence avec le mode d'organisation de l'enseignement de l'histoire des arts dans l'établissement, les modalités d'interactions qui leur conviennent.

Plusieurs sujets abordés dans le programme s'y prêtent, bien que le choix soit fait de ne pas le souligner au cas par cas le long du déroulé du programme afin de laisser toute liberté de mise en œuvre aux équipes.

À titre d'exemple, on peut citer les évocations littéraires de la biodiversité ou sa représentation picturale ; la statuaire du corps humain au cours d'un exercice sportif. Les évocations littéraires de la vie des mineurs renseignent sur des conditions d'exploitation souvent révolues aujourd'hui. La représentation d'animaux ou végétaux actuels ou disparus met en scène un dialogue entre les connaissances scientifiques et les pratiques artistiques, etc.

## II. LES SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE EN CLASSE DE PREMIÈRE S

Le programme de la classe de Première S prend appui sur ceux de la classe de Seconde et du collège. De plus, il est écrit de façon à rendre le moins difficile possible un changement de filière en fin ou en cours de Première. Les thèmes abordés dans les classes non scientifiques le sont aussi dans la filière S, à un autre niveau d'approfondissement scientifique. En particulier, il devrait être possible sans trop de difficulté de préparer les épreuves scientifiques anticipées du baccalauréat de Première ES ou L en ayant suivi un enseignement de Première S.

En classe de Première S, les trois thématiques présentées dans le préambule général pour le lycée sont déclinées comme indiqué ci-dessous. Les pourcentages proposés donnent une indication très générale de la pondération souhaitée entre les thèmes, mais ils ne doivent pas être considérés comme des impératifs rigides.

Dans le thème « La Terre dans l'Univers, la vie et l'évolution du vivant » (50 %), on étudie :

- les données fondamentales sur le patrimoine génétique (réPLICATION, transcription, traduction, mutation et variabilité génétique) ; l'explicitation de certains phénomènes moléculaires permet de progresser dans l'explication au-delà de la classe de Seconde ;

- la tectonique des plaques dans le cadre de l'histoire d'un modèle ; il s'agit d'une approche historique

qui prolonge, précise et argumente le modèle étudié au collège.

Pour aborder le thème des « Enjeux planétaires contemporains » (17 %), deux questions sont traitées :

- dans le prolongement du programme de Seconde, et en écho à l'étude historique du modèle de tectonique des plaques, on aborde la manière dont la connaissance de la tectonique des plaques constitue souvent un cadre de réflexion utile en géologie appliquée ;

- le thème « Nourrir l'humanité » prolonge l'approche globale de l'agriculture conduite en Seconde ; il s'agit de mettre en relation les besoins qualitatifs et quantitatifs des individus en aliments et eau potable et les problématiques de gestion durable de la planète ; il est l'occasion de présenter quelques notions fondamentales d'écologie générale.

Enfin le thème « Corps humain et santé » (33 %) est structuré autour de trois questions :

- la dualité féminin/masculin est abordée sous l'angle de son ontogenèse pour permettre une approche biologique des questions de sexualité ;

- les relations entre la variabilité génétique et la santé conduisent à évoquer la part de la génétique dans la cause des maladies, celle des perturbations du génome dans le cancer, et l'importance médicale de la sélection de souches bactériennes résistantes aux antibiotiques ;

- en relation étroite avec le cours de physique, la vision est abordée sous trois angles ; le cristallin est étudié en tant que lentille transparente vivante, les cellules photoréceptrices permettent à la fois de comprendre certains aspects de la perception mais aussi d'aborder leur origine évolutive. Par ailleurs, le fonctionnement cérébral montre la complexité des interconnexions et de la plasticité.

Comme pour la classe de Seconde, la liberté pédagogique du professeur est grande en classe de Première S. Cependant, la nécessité d'assurer la construction d'un corpus commun de compétences conduit parfois à préciser davantage ce qui est attendu. En outre, le travail en classe s'inscrit dès cette classe dans la perspective d'une préparation au baccalauréat. En particulier, un premier entraînement à l'épreuve des capacités expérimentales impose une pratique pédagogique aussi concrète que possible. Dans le même ordre d'idée, une sortie de terrain est souhaitable, tout particulièrement dans le cadre de l'enseignement des sciences de la Terre.

Beaucoup de points abordés dans le programme se prêtent particulièrement bien à des approfondissements disciplinaires ou, plus encore, à des développements transdisciplinaires (en accompagnement personnalisé, en TPE, etc.).

### Programme

Le programme est présenté en deux colonnes. Chaque thème comporte une brève introduction qui en indique l'esprit général.

**La colonne de gauche liste les connaissances** (en caractère droit) qui doivent être acquises par les élèves à l'issue de la classe de première.

En italique, la colonne de gauche comporte aussi quelques commentaires qui précisent et limitent les objectifs d'apprentissage, lorsque cela paraît nécessaire :

– en italique simple, quelques précisions sur les objectifs et mots-clés (ces mots-clés correspondent à des notions qui n'ont pas été placées directement dans le programme pour de simples questions d'écriture, mais qui doivent être connues des élèves) ;

– entre parenthèses, des indications sur ce qui a déjà été étudié et qui ne sera pas reconstruit en première (ces acquis peuvent cependant être rappelés) ;

– entre crochets, quelques limites, chaque fois qu'il a semblé nécessaire de rendre parfaitement explicite ce jusqu'où ne doit pas aller l'exigible (il s'agit bien de limites de ce qui est exigible pour les élèves, ce qui ne veut pas dire qu'il est interdit d'en parler dans le déroulement de la construction du savoir) ;

– les convergences les plus marquantes vers d'autres disciplines (ces relations ne sont pas indiquées de façon exhaustive).

Une nouvelle rubrique apparaît dans cette colonne par rapport au programme de Seconde. Dénommée

« pistes », elle suggère des directions de réflexions susceptibles d'être exploitées dans le cadre de prolongements au-delà du programme lui-même, en TPE, accompagnement personnalisé ou clubs scientifiques par exemple, de préférence en interdisciplinarité.

La colonne de droite indique les capacités et attitudes dont on attend qu'elles soient développées dans le cadre de l'item décrit.

En préambule du programme, une liste de capacités et attitudes générales est présentée. Celles-ci sont communes à la plupart des items qui, par conséquent, ne sont pas reprises par la suite. Il convient cependant de ne pas les oublier et d'organiser leur apprentissage sur l'ensemble de l'année.

On observera que, par souci de continuité et de cohérence, le vocabulaire utilisé pour décrire les capacités et attitudes mises en œuvre s'inspire fortement de celui utilisé pour le socle commun de connaissances et de compétences du collège (décret 2006-830 du 11 juillet 2006, encart au BOEN n° 29 du 20 juillet 2006).

## Capacités et attitudes développées tout au long du programme

- Pratiquer une démarche scientifique (observer, questionner, formuler une hypothèse, expérimenter, raisonner avec rigueur, modéliser).
- Recenser, extraire et organiser des informations.
- Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique.
- Manipuler et expérimenter.
- Comprendre qu'un effet peut avoir plusieurs causes.
- Exprimer et exploiter des résultats, à l'écrit, à l'oral, en utilisant les technologies de l'information et de la communication.
- Communiquer dans un langage scientifiquement approprié: oral, écrit, graphique, numérique.
- Percevoir le lien entre sciences et techniques.
- Manifester sens de l'observation, curiosité et esprit critique.
- Montrer de l'intérêt pour les progrès scientifiques et techniques.
- Être conscient de sa responsabilité face à l'environnement, la santé, le monde vivant.
- Avoir une bonne maîtrise de son corps.
- Être conscient de l'existence d'implications éthiques de la science.
- Respecter les règles de sécurité.
- Comprendre la nature provisoire, en devenir, du savoir scientifique.
- Être capable d'attitude critique face aux ressources documentaires.
- Manifester de l'intérêt pour la vie publique et les grands enjeux de la société.
- Savoir choisir un parcours de formation.

Connaissances	Capacités et attitudes
<b>Thème 1 – La Terre dans l'Univers, la vie et l'évolution du vivant</b>	
<b>THÈME 1-A EXPRESSION, STABILITÉ ET VARIATION DU PATRIMOINE GÉNÉTIQUE</b>	
Ce thème s'appuie sur les connaissances acquises en collège et en classe de seconde sur la molécule d'ADN.	
Il s'agit de comprendre comment la réPLICATION et la mitose permettent une reproduction cellulaire conforme. Toutefois, la fragilité de la molécule d'ADN – notamment lors de la réPLICATION – est source de mutation, cause de variation génétique.	
Les mécanismes de transcription et traduction expliquent l'équipement protéique des cellules.	
<b><i>Reproduction conforme de la cellule et réPLICATION de l'ADN</i></b>	
<p>Les chromosomes sont des structures constantes des cellules eucaryotes qui sont dans des états de condensation variables au cours du cycle cellulaire. En général la division cellulaire est une reproduction conforme qui conserve toutes les caractéristiques du caryotype (nombre et morphologie des chromosomes).</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. Phases du cycle cellulaire : interphase (G1, S, G), mitose.</i>  <i>(Collège et Seconde. Première approche de la mitose, du caryotype). [Limites. Les anomalies du caryotype ne sont pas abordées ici. Le fonctionnement du fuseau mitotique est hors programme.]</i>  <i>Pistes. Explication des anomalies chromosomiques; caryotypes et définition des espèces.</i></p>	<p>Recenser, extraire et exploiter des informations permettant de caractériser le cycle cellulaire et ses phases, dans différents types cellulaires.</p> <p>Effectuer un geste technique en observant au microscope des divisions de cellules eucaryotes.</p>
<p>Chaque chromatide contient une molécule d'ADN.</p> <p>Au cours de la phase S, l'ADN subit la réPLICATION semi-conservative. En absence d'erreur, ce phénomène préserve, par copie conforme, la séquence des nucléotides.</p> <p>Ainsi, les deux cellules-filles provenant par mitose d'une cellule-mère possèdent la même information génétique.</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. Il s'agit de donner aux élèves les connaissances de base nécessaires sur la multiplication cellulaire conforme aux échelles cellulaire (mitose) et moléculaire (réPLICATION de l'ADN).</i>  <i>(Collège et Seconde. Première approche de l'ADN).</i>  <i>[Limites. L'intervention d'un ensemble d'enzymes et la nécessité d'une source d'énergie sont seulement signalées, sans souci de description exhaustive.] Pistes. Comprendre la PCR. Calculer la vitesse de réPLICATION chez les eucaryotes.</i></p>	<p>Mettre en œuvre une méthode (démarche historique) et/ou une utilisation de logiciels et/ou une pratique documentaire permettant de comprendre le mécanisme de réPLICATION semi-conservative.</p>
<b><i>Variabilité génétique et mutation de l'ADN</i></b>	
<p>Pendant la réPLICATION de l'ADN surviennent des erreurs spontanées et rares, dont la fréquence est augmentée par l'action d'agents mutagènes. L'ADN peut aussi être endommagé en dehors de la réPLICATION.</p> <p>Le plus souvent l'erreur est réparée par des systèmes enzymatiques. Quand elle ne l'est pas, si les modifications n'empêchent pas la survie de la cellule, il apparaît une mutation, qui sera transmise si la cellule se divise.</p> <p>Une mutation survient soit dans une cellule somatique (elle est ensuite présente dans le clone issu de cette cellule) soit dans une cellule germinale (elle devient alors héréditaire).</p> <p>Les mutations sont la source aléatoire de la diversité des allèles, fondement de la biodiversité.</p>	<p>Recenser, exploiter et interpréter des bases de données et/ou concevoir et réaliser un protocole pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mettre en évidence l'influence d'agents mutagènes sur des populations humaines (UV, benzène, etc.);</li> <li>- analyser l'influence de l'irradiation d'une culture de levures par des UV (suivi du taux de mortalité).</li> </ul> <p>Utiliser des logiciels pour caractériser des mutations.</p> <p>Recenser et exploiter des informations permettant de caractériser la diversité allélique d'une population.</p>

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>(Collège et Seconde. Première approche de la variation génétique.)</p> <p>[Limites. L'action d'agents mutagènes est étudiée à titre d'exemple, mais leur mécanisme d'action n'a pas à être mémorisé. Aucune exhaustivité n'est attendue dans la présentation de ces agents.]</p> <p>Convergence. Mathématiques : probabilité.</p> <p>Pistes. Quantification de la mutation dans une population cellulaire (mathématiques) ; les agents mutagènes dans l'environnement (physique-chimie).</p>	
<i>L'expression du patrimoine génétique</i>	
<p>La séquence des nucléotides d'une molécule d'ADN représente une information. Le code génétique est le système de correspondance mis en jeu lors de la traduction de cette information. À quelques exceptions près, il est commun à tous les êtres vivants.</p> <p>Les portions codantes de l'ADN comportent l'information nécessaire à la synthèse de chaînes protéiques issues de l'assemblage d'acides aminés.</p> <p>Chez les eucaryotes, la transcription est la fabrication, dans le noyau, d'une molécule d'ARN pré-messager, complémentaire du brin codant de l'ADN. Après une éventuelle maturation, l'ARN messager est traduit en protéines dans le cytoplasme.</p> <p>Un même ARN pré-messager peut subir, suivant le contexte, des maturations différentes et donc être à l'origine de plusieurs protéines différentes. [Limites. Le code génétique n'est pas à mémoriser. Les rôles des ARNr et ARNt ne sont pas au programme. Les mécanismes sont étudiés chez les eucaryotes, mais l'objectif n'est pas de mettre l'accent sur les différences entre les eucaryotes et les procaryotes. L'existence d'une maturation de l'ARN pré-messager est signalée, mais ses différents aspects ne sont pas exigibles]</p>	<p>Recenser, extraire et exploiter des informations permettant de caractériser les protéines comme expression primaire de l'information génétique.</p> <p>Mettre en œuvre une méthode (démarche historique) et/ou une utilisation de logiciels et/ou une pratique documentaire permettant :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- d'approcher le mécanisme de la transcription, et de la traduction ;</li> <li>- de comprendre comment le code génétique a été élucidé.</li> </ul>
<p>L'ensemble des protéines qui se trouvent dans une cellule (phénotype moléculaire) dépend :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- du patrimoine génétique de la cellule (une mutation allélique peut être à l'origine d'une protéine différente ou de l'absence d'une protéine) ;</li> <li>- de la nature des gènes qui s'expriment sous l'effet de l'influence de facteurs internes et externes variés.</li> </ul> <p>Le phénotype macroscopique dépend du phénotype cellulaire, lui-même induit par le phénotype moléculaire.</p> <p>(Collège et Seconde. Première approche des différentes échelles du phénotype et de la variation.)</p> <p>[Limites. L'étude de la différenciation cellulaire n'est pas au programme; on se contente de constater que plusieurs cellules d'un même organisme peuvent ne pas contenir les mêmes protéines.]</p> <p>Pistes. Perturbation de la production de protéines dans une cellule cancéreuse. Différenciation cellulaire et expression protéique.</p>	<p>Recenser, extraire et exploiter des informations (à partir d'un exemple comme la drépanocytose ou le <i>xeroderma pigmentosum</i>) permettant de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- caractériser les différentes échelles d'un phénotype ;</li> <li>- différencier les rôles de l'environnement et du génotype dans l'expression d'un phénotype.</li> </ul>

Connaissances	Capacités et attitudes
<b>THÈME 1-B LA TECTONIQUE DES PLAQUES : L'HISTOIRE D'UN MODÈLE</b>	
<p>Les grandes lignes de la tectonique des plaques ont été présentées au collège. Il s'agit, en s'appuyant sur une démarche historique, de comprendre comment ce modèle a peu à peu été construit au cours de l'histoire des sciences et de le compléter. On se limite à quelques étapes significatives de l'histoire de ce modèle.</p>	
<p>L'exemple de la tectonique des plaques donne l'occasion de comprendre la notion de modèle scientifique et son mode d'élaboration. Il s'agit d'une construction intellectuelle hypothétique et modifiable. Au cours du temps, la communauté scientifique l'affine et le précise en le confrontant en permanence au réel. Il a une valeur prédictive et c'est souvent l'une de ces prédictions qui conduit à la recherche d'un fait nouveau qui, suivant qu'il est ou non découvert, conduit à étayer ou modifier le modèle. La solidité du modèle est peu à peu acquise par l'accumulation d'observations en accord avec lui. Les progrès techniques accompagnent le perfectionnement du modèle tout autant que les débats et controverses.</p>	
<p>Nota. – À partir de l'exemple de la tectonique des plaques, les élèves seront conduits à comprendre quelques caractéristiques du mode de construction des théories scientifiques.</p>	
<b><i>La naissance de l'idée</i></b>	
<p>Au début du xx<sup>e</sup> les premières idées évoquant la mobilité horizontale s'appuient sur quelques constatations :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la distribution bimodale des altitudes (continents/océans) ;</li> <li>- les tracés des côtes ;</li> <li>- la distribution géographique des paléoclimats et de certains fossiles. Ces idées se heurtent au constat d'un état solide de la quasi-totalité du globe terrestre établi, à la même époque, par les études sismiques. L'idée de mobilité horizontale est rejetée par l'ensemble de la communauté scientifique.</li> </ul> <p><i>[Limites. Il ne s'agit pas d'une étude exhaustive des précurseurs de la tectonique des plaques, mais simplement de l'occasion de montrer la difficile naissance d'une idée prometteuse.]</i>  <i>Convergence. Mathématiques: distributions, fréquences.</i></p>	<p>Comprendre les difficultés d'acceptation des premières idées de mobilité.</p> <p>Réaliser et exploiter des modélisations analogique et numérique pour établir un lien entre propagation des ondes sismiques et structure du globe.</p>
<b><i>L'interprétation actuelle des différences d'altitude moyennes entre les continents et les océans</i></b>	
<p>La différence d'altitude observée entre continents et océans reflète un contraste géologique.</p> <p>Les études sismiques et pétrographiques permettent de caractériser et de limiter deux grands types de croûtes terrestres: une croûte océanique essentiellement formée de basalte et de gabbro et une croûte continentale constituée entre autres de granite.</p> <p>La croûte repose sur le manteau, constitué de péridotite.</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. La découverte des deux lithosphères est l'occasion de fournir aux élèves les données fondamentales sur les principales roches rencontrées (basalte, gabbro, granite, péridotite).</i>  <i>(Collège et Seconde. Première approche de la croûte et de la lithosphère.) [Limites. L'étude pétrographique se limite à la présentation des principales caractéristiques des quatre roches citées. Bien que l'observation de lames minces soit recommandée, il n'est pas attendu de faire mémoriser par les élèves les critères d'identification microscopique des minéraux.]</i>  <i>Convergences. Physique: ondes mécaniques.</i></p>	<p>Concevoir une modélisation analogique et réaliser des mesures à l'aide de dispositifs d'expérimentation assistée par ordinateur de propagation d'ondes à travers des matériaux de nature pétrographique différente.</p> <p>Observer à différentes échelles, de l'échantillon macroscopique à la lame mince, les roches des croûtes océanique et continentale et du manteau.</p> <p>Comprendre comment des observations fondées sur des techniques nouvelles ont permis de dépasser les obstacles du bon sens apparent.</p>
<b><i>L'hypothèse d'une expansion océanique et sa confrontation à des constats nouveaux</i></b>	
<p>Au début des années 1960, les découvertes de la topographie océanique et des variations du flux thermique permettent d'imaginer une expansion océanique par accrétion de matériau remontant à l'axe des dorsales, conséquence d'une convection profonde.</p>	<p>Comprendre comment la convergence des observations océanographiques avec les mesures de flux thermique a permis d'avancer l'hypothèse d'une expansion océanique réactualisant l'idée d'une dérive des continents.</p>

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La mise en évidence de bandes d'anomalies magnétiques symétriques par rapport à l'axe des dorsales océaniques, corréables avec les phénomènes d'inversion des pôles magnétiques (connus depuis le début du siècle) permet d'éprouver cette hypothèse et de calculer des vitesses d'expansion.</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. Cette étude est l'occasion de fournir aux élèves les données fondamentales sur le magnétisme des roches (magnétite, point de Curie).</i></p> <p><i>[Limites. Un élève doit situer cet épisode de l'histoire des sciences dans les années 1960. La mémorisation des dates précises et des auteurs n'est pas attendue.]</i></p> <p><i>Convergence. Physique: magnétisme.</i></p> <p><i>Pistes. Les variations du champ magnétique terrestre ; les inversions magnétiques.</i></p>	<p>Comprendre comment la corrélation entre les anomalies magnétiques découvertes sur le plancher océanique et la connaissance plus ancienne de l'existence d'inversion des pôles magnétiques confirme l'hypothèse de l'expansion océanique. Calculer des taux d'expansion.</p>
<b><i>Le concept de lithosphère et d'asthénosphère</i></b>	
<p>Au voisinage des fosses océaniques, la distribution spatiale des foyers des séismes en fonction de leur profondeur s'établit selon un plan incliné. Les différences de vitesse des ondes sismiques qui se propagent le long de ce plan, par rapport à celles qui s'en écartent, permettent de distinguer: la lithosphère de l'asthénosphère.</p> <p>L'interprétation de ces données sismiques permet ainsi de montrer que la lithosphère s'enfonce dans le manteau au niveau des fosses dites de subduction.</p> <p>La limite inférieure de la lithosphère correspond généralement à l'isotherme 1 300 °C.</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. Distinction claire des notions de : lithosphère, asthénosphère, croûte, manteau, subduction.</i></p> <p><i>(Collège : lithosphère-asthénosphère)</i></p> <p><i>[Limites. On se contente de présenter la notion de subduction. Le mécanisme et les conséquences géologiques de ce phénomène seront abordés en terminale.]</i></p>	<p>Saisir et exploiter des données sur des logiciels pour mettre en évidence la répartition des foyers des séismes au voisinage des fosses océaniques.</p> <p>Comprendre comment l'interprétation de la distribution particulière des foyers des séismes permet :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- de définir la lithosphère par rapport à l'asthénosphère ;</li> <li>- de confirmer, dans le cadre du modèle en construction, que la lithosphère océanique retourne dans le manteau.</li> </ul> <p>Concevoir une modélisation analogique et réaliser des mesures à l'aide de dispositifs d'expérimentation assistée par ordinateur de propagation d'ondes à travers un même matériau mais à des températures différentes pour comprendre la différence entre lithosphère et asthénosphère.</p>
<b><i>Un premier modèle global : une lithosphère découpée en plaques rigides</i></b>	
<p>À la fin des années soixante, la géométrie des failles transformantes océaniques permet de proposer un modèle en plaques rigides. Des travaux complémentaires parachèvent l'établissement de la théorie de la tectonique des plaques en montrant que les mouvements divergents (dorsales), décrochants (failles transformantes) et convergents (zones de subduction) sont cohérents avec ce modèle géométrique. Des alignements volcaniques, situés en domaine océanique ou continental, dont la position ne correspond pas à des frontières de plaques, sont la trace du déplacement de plaques lithosphériques au-dessus d'un point chaud fixe, en première approximation, dans le manteau.</p> <p><i>(Collège : plaques lithosphériques)</i></p> <p><i>[Limites. La formalisation mathématique de la cinématique des plaques n'est pas attendue.]</i></p> <p><i>Pistes. Étude géométrique de la cinématique des plaques (mathématiques); modélisation des types de failles.</i></p>	<p>Réaliser une manipulation analogique simple ou utiliser un logiciel de simulation, pour comprendre que les mouvements des plaques sont des rotations de pièces rigides se déplaçant sur une sphère.</p> <p>Comprendre comment désormais des faits ne s'intégrant pas <i>a priori</i> avec le modèle initial (volcanisme intraplaque) permettent un enrichissement du modèle (théorie des points chauds) et non son rejet.</p> <p>Corréler les directions et les vitesses de déplacements des plaques tirées des données paléomagnétiques avec celles déduites de l'orientation et des âges des alignements volcaniques intraplaques.</p>

Connaissances	Capacités et attitudes
<b><i>Le renforcement du modèle par son efficacité prédictive</i></b>	
<p>Le modèle prévoit que la croûte océanique est d'autant plus vieille qu'on s'éloigne de la dorsale. Les âges des sédiments en contact avec le plancher océanique (programme de forage sous-marins J.O.I.D.E.S.) confirment cette prédition et les vitesses prévues par le modèle de la tectonique des plaques.</p> <p>Le modèle prévoit des vitesses de déplacements des plaques (d'après le paléomagnétisme et les alignements de volcans intraplaques). Avec l'utilisation des techniques de positionnement par satellites (GPS), à la fin du xx<sup>e</sup> siècle, les mouvements des plaques deviennent directement observables et leurs vitesses sont confirmées.</p> <p><i>[Limites. L'étude des forages marins se limite à l'interprétation du premier sédiment au contact de la croûte magmatique. L'interprétation des inversions magnétiques enregistrées dans les sédiments des carottes de forage n'est pas au programme.]</i></p> <p><i>Pistes. Les systèmes de positionnement satellitaire (physique, mathématiques).</i></p>	<p>Saisir et exploiter des informations sur cartes.</p> <p>Concevoir, réaliser et exploiter un modèle analogique.</p> <p>Réaliser des mesures sur le terrain pour comprendre le principe du GPS.</p> <p>Saisir et exploiter des données sur des logiciels.</p>
<b><i>L'évolution du modèle : le renouvellement de la lithosphère océanique</i></b>	
<p>En permanence, de la lithosphère océanique est détruite dans les zones de subduction et produite dans les dorsales.</p> <p>La divergence des plaques de part et d'autre de la dorsale permet la mise en place d'une lithosphère nouvelle à partir de matériaux d'origine mantélique. Dans les zones de subduction, les matériaux de la vieille lithosphère océanique s'incorporent au manteau.</p> <p>Objectifs et mots-clés. Il s'agit de construire une représentation graphique synthétique du modèle global et de fournir aux élèves les données essentielles sur le fonctionnement d'une dorsale type.</p> <p><i>(Collège : volcanisme)</i></p> <p><i>[Limites. La subduction est localisée et simplement présenté comme un lieu de destruction de lithosphère océanique, les phénomènes géologiques associés seront traités en terminale. On se limite à l'étude d'une dorsale siège de la production d'une lithosphère océanique complète: les différents types de dorsales ne sont pas au programme. Le moteur de la tectonique des plaques sera explicité en classe de Terminale.]</i></p> <p><i>Convergences. Physique : changements d'état.</i></p> <p><i>Pistes. Construire un raisonnement sur des données géochimiques (mathématiques, physique) ; frontières de plaques et risques naturels (histoire-géographie, mathématiques).</i></p>	<p>Recenser, extraire et organiser des informations sur des images satellitaires et de tomographie sismique.</p> <p>Réaliser des modélisations analogiques et numériques pour établir les liens entre amincissement de la lithosphère, remontée, dépressurisation et fusion partielle de l'asthénosphère sous-jacente et formation d'une nouvelle lithosphère.</p>
<b>Thème 2 – Enjeux planétaires contemporains</b>	
<p><b>THÈME 2-A TECTONIQUE DES PLAQUES ET GÉOLOGIE APPLIQUÉE</b></p> <p>L'objectif est de montrer que le modèle de la tectonique des plaques présente un intérêt appliqué. Sans chercher à donner une vision naïve selon laquelle toute application géologique pratique nécessite les concepts de la tectonique des plaques, on choisira un exemple permettant de montrer que, parfois, ce modèle permet de comprendre les conditions d'existence d'une ressource exploitabile.</p> <p>L'exemple sera choisi de façon à introduire quelques idées concernant une histoire sédimentaire compréhensible dans le cadre du modèle de la tectonique des plaques.</p> <p>Deux possibilités sont proposées, l'une d'approche locale, l'autre plus globale. Le professeur choisira de traiter au moins l'une de ces deux approches.</p>	

Connaissances	Capacités et attitudes
<b>Première possibilité : tectonique des plaques et recherche d'hydrocarbures</b>	
<p>Le choix est fait de s'intéresser à un champ pétrolifère ou gazier situé dans un bassin de marge passive pour comprendre les principaux facteurs qui conditionnent la formation des gisements. En s'appuyant éventuellement sur ce qui aura été étudié en seconde, il s'agit d'expliquer le constat fait alors: les gisements d'hydrocarbures sont rares et précisément localisés.</p>	
<p>Le modèle de la tectonique des plaques constitue un cadre intellectuel utile pour rechercher des gisements pétroliers. À partir de l'étude d'un exemple on montre que la tectonique globale peut rendre compte:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>d'un positionnement géographique du bassin favorable au dépôt d'une matière organique abondante et à sa conservation ;</li> <li>d'une tectonique en cours de dépôt (subsidence) et après le dépôt qui permettent l'enfouissement et la transformation de la matière organique puis la mise en place du gisement.</li> </ul> <p>La rare coïncidence de toutes ces conditions nécessaires explique la rareté des gisements dans l'espace et le temps.</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. L'exemple étudié permet de présenter ce qu'est un bassin sédimentaire et quelques exemples de roches sédimentaires. Il permet aussi de montrer l'intérêt de la tectonique des plaques dans la compréhension du phénomène sédimentaire. [Limites. Une présentation exhaustive des types de bassins et de leur contexte géodynamique est hors programme. La typologie des pièges pétroliers l'est également]</i></p> <p><i>Pistes. Comprendre l'importance économique d'une histoire géologique (géographie) ; ressources énergétiques et géopolitique (histoire-géographie). Rechercher d'autres contextes de gisements d'hydrocarbures, sur Terre ou ailleurs.</i></p>	<p>Recenser, extraire et organiser des informations permettant de reconstituer le contexte géographique et géologique à l'époque du dépôt à l'origine de l'hydrocarbure de l'exemple étudié.</p> <p>Découvrir la morphologie et la structure des marges passives à partir des profils de sismique réflexion et/ou des cartes et/ou des coupes.</p> <p>Recenser, extraire et organiser des informations, notamment lors d'une sortie sur le terrain.</p> <p>Analyser les positions relatives des continents et des océans (Téthys ou Atlantique) lors des périodes d'absence ou de grande accumulation de roches-mères pétrolières pour comprendre les conditions favorables à leur dépôt.</p> <p>Modéliser la circulation de fluides de densités différentes non miscibles dans des roches perméables.</p> <p>Concevoir une modélisation et suivre un protocole pour comprendre comment une structure géologique associée à un recouvrement imperméable constitue un piège à liquide.</p> <p>Repérer les grandes caractéristiques d'un bassin sédimentaire et de quelques roches sédimentaires.</p>
<b>Deuxième possibilité : tectonique des plaques et ressource locale</b>	
<p>Un exemple de ressource géologique est choisi dans un contexte proche de l'établissement scolaire. Son étude (nature, gisement) permet de comprendre que ses conditions d'existence peuvent être décrites en utilisant le cadre général de la tectonique des plaques.</p> <p><i>Objectif et mots-clés. Il s'agit de montrer l'intérêt local et concret du modèle. Tout exemple de matériau géologique d'intérêt pratique peut être retenu. [Limites. Aucune connaissance spécifique n'est attendue.]</i></p>	<p>Recenser, extraire et organiser des informations notamment lors d'une sortie sur le terrain.</p>
<b>THÈME 2-B NOURRIR L'HUMANITÉ</b>	
<p>Le thème « Nourrir l'humanité » prolonge l'approche globale de l'agriculture conduite en seconde. Pour cela, il nécessite la présentation de quelques grandes notions concernant les écosystèmes et leur fonctionnement. Par comparaison, l'étude d'une culture permet de comprendre la conception, l'organisation et le fonctionnement d'un agrosystème; celle d'un élevage amène l'idée d'impacts écologiques différents selon les agrosystèmes. Enfin, ce thème permet de mettre en relation les pratiques alimentaires individuelles et les problématiques de gestion de l'environnement telles que les sciences de la vie et de la Terre permettent de les aborder scientifiquement.</p>	<p>La production végétale: utilisation de la productivité primaire.</p>
<p>Un écosystème naturel est constitué d'un biotope et d'une biocénose. Son fonctionnement d'ensemble est permis par la productivité primaire qui, dans les écosystèmes continentaux, repose sur la photosynthèse des plantes vertes.</p>	<p>Étudier un exemple de culture végétale pour montrer comment des techniques variées permettent une production quantitativement et qualitativement adaptée aux besoins.</p>

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>L'agriculture repose sur la constitution d'agrosystèmes gérés dans le but de fournir des produits (dont les aliments) nécessaires à l'humanité. Un agrosystème implique des flux de matière (dont l'eau) et d'énergie qui conditionnent sa productivité et son impact environnemental. L'exportation de biomasse, la fertilité des sols, la recherche de rendements posent le problème de l'apport d'intrants dans les cultures (engrais, produits phytosanitaires, etc.).</p> <p>Le coût énergétique et les conséquences environnementales posent le problème des pratiques utilisées. Le choix des techniques culturales vise à concilier la nécessaire production et la gestion durable de l'environnement.</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. Il s'agit de quantifier les flux d'énergie et de matière dans l'agrosystème de production végétale (qualitativement - polluants compris - et quantitativement). Cette étude permet de présenter les principes de la réflexion qui conduisent à une pratique raisonnée de l'agriculture.</i>  <i>(Collège et Seconde. Première approche des bases biologiques de la production agricole.)</i></p> <p><i>[Limites. Aucune exhaustivité n'est attendue dans la présentation des pratiques agricoles et des intrants.]</i></p> <p><i>Pistes. Agriculture et développement durable ; agriculture biologique / raisonnée (histoire-géographie).</i></p>	<p>Faire preuve d'esprit critique en étudiant la conduite d'une culture quant à son impact sur l'environnement.</p> <p>Recenser, extraire et exploiter des informations, notamment sur le terrain, utiliser des bases de données et des logiciels pour comparer les bilans d'énergie et de matière (dont l'eau) d'un agrosystème de production végétale et d'un écosystème peu modifié par l'Homme.</p> <p>Concevoir et réaliser un protocole pour mettre en oeuvre une culture et analyser ses caractéristiques et/ou utiliser des logiciels modélisant une culture, ses bilans et sa gestion.</p>
<b><i>La production animale : une rentabilité énergétique réduite</i></b>	
<p>Dans un écosystème naturel, la circulation de matière et d'énergie peut être décrite par la notion de pyramide de productivité.</p> <p>Dans un agrosystème, le rendement global de la production par rapport aux consommations (énergie, matière) dépend de la place du produit consommé dans la pyramide de productivité. Ainsi, consommer de la viande ou un produit végétal n'a pas le même impact écologique.</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. Il s'agit de faire comprendre que la production animale fondée sur une production végétale quantitativement abondante se traduit par un bilan de matière et d'énergie plus défavorable.</i></p> <p><i>Convergence. Géographie (Seconde) - l'eau ressource essentielle.</i></p>	<p>Recenser, extraire et exploiter des informations, utiliser des bases de données et des logiciels pour comparer les bilans d'énergie et de matière (dont l'eau) de différents élevages, et comparer production animale et production végétale.</p> <p>Faire preuve d'esprit critique en étudiant la conduite d'un élevage quant à son impact sur l'environnement.</p>
<b><i>Pratiques alimentaires collectives et perspectives globales</i></b>	
<p>Les pratiques alimentaires sont déterminées par les ressources disponibles, les habitudes individuelles et collectives selon les modes de consommation, de production et de distribution. Le but de cette partie est de montrer en quoi les pratiques alimentaires individuelles répétées collectivement peuvent avoir des conséquences environnementales globales.</p>	<p>Recenser, extraire et exploiter des informations, utiliser des bases de données et des logiciels pour comprendre :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- l'impact global des pratiques alimentaires ;</li> <li>- la gestion de populations et/ou de peuplements naturels.</li> </ul>
<p>À l'échelle globale, l'agriculture cherche à relever le défi de l'alimentation d'une population humaine toujours croissante. Cependant, les limites de la planète cultivable sont bientôt atteintes : les ressources (eau, sol, énergie) sont limitées tandis qu'il est nécessaire de prendre en compte l'environnement pour en assurer la durabilité.</p>	<p>Recenser, extraire et exploiter des informations sur la variété des agrosystèmes mondiaux et leurs caractéristiques.</p> <p>Recenser et comparer différentes pratiques culturales, du point de vue de leur durabilité (bilan carbone, bilan énergétique, biodiversité...).</p> <p>Recenser, extraire et exploiter des informations sur les recherches actuelles permettant d'améliorer la production végétale dans une logique de développement durable.</p>

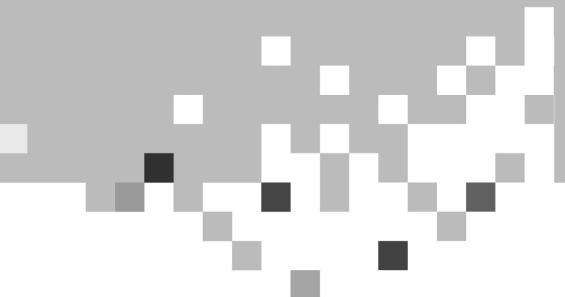
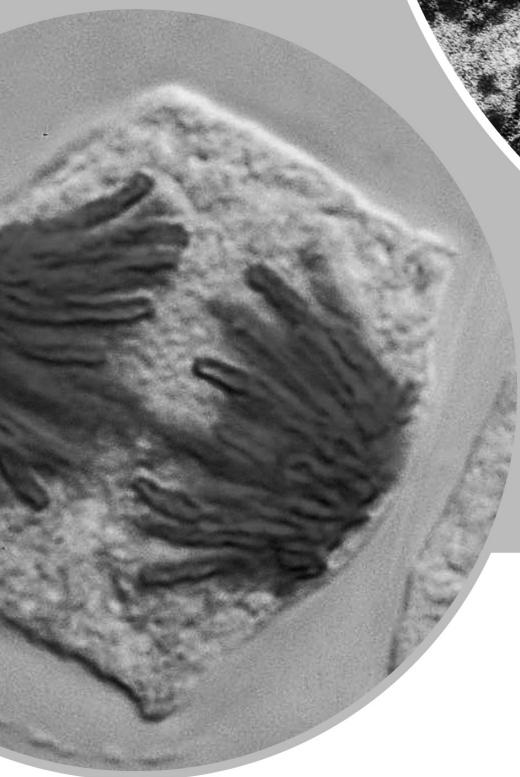
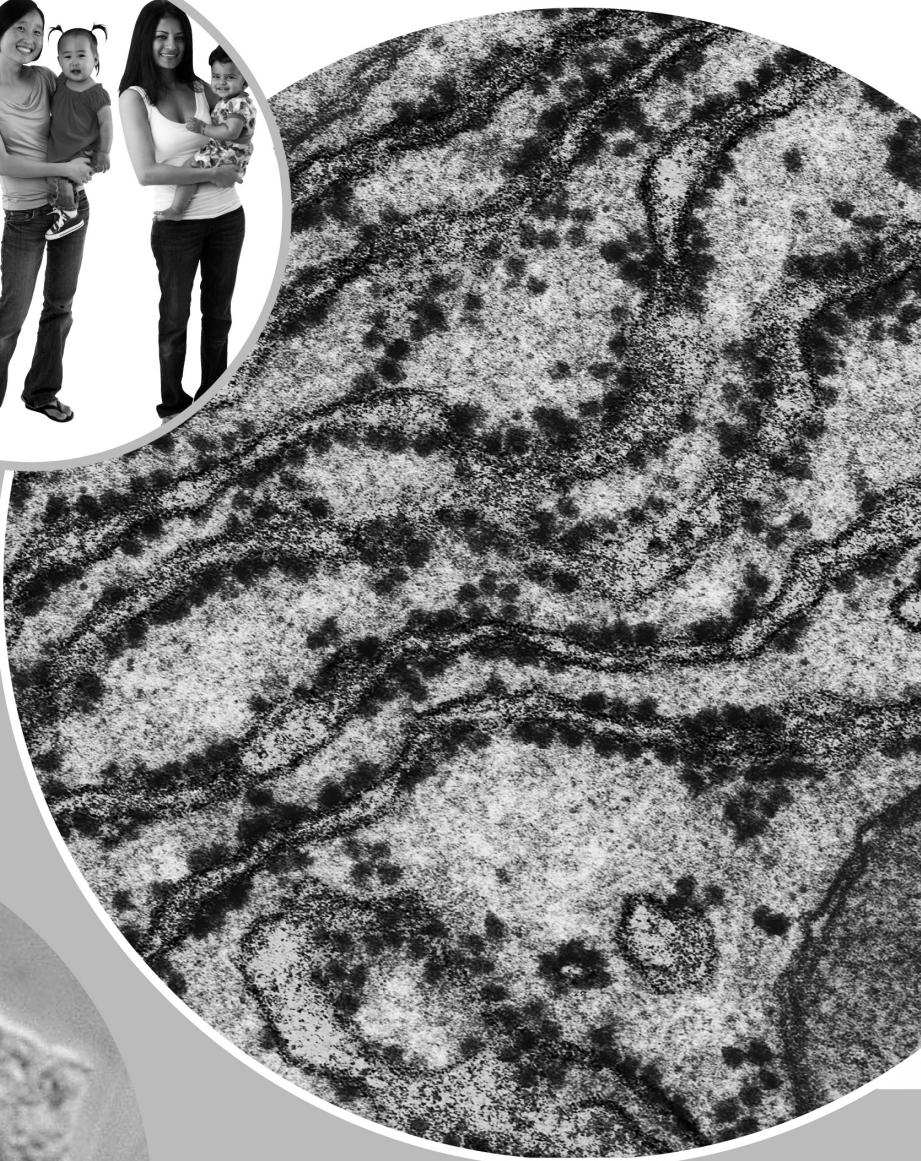
Connaissances	Capacités et attitudes
<p><i>Objectifs et mots-clés. On cherche ici à mettre en relation les pratiques locales et leurs implications globales afin d'installer les bases de la réflexion qui conduit aux choix de pratiques. Il s'agit de montrer comment il est possible d'aborder la réflexion sur ces questions en termes de bilan planétaire.</i></p> <p><i>[Limites. Il ne s'agit pas d'enseigner les choix qui doivent être faits, mais d'introduire les bases scientifiques nécessaires à une réflexion éclairée sur les choix. Aucune exhaustivité concernant les pratiques alimentaires n'est attendue.]</i></p> <p><i>Convergence : Géographie (Seconde) - Nourrir les hommes.</i></p>	<p>Utiliser des systèmes d'information géographique (SIG) pour déterminer l'importance des besoins (énergie, matière, sol, etc.) de la production mondiale agricole actuelle (et son évolution récente).</p>
<b>Thème 3 – Corps humain et santé</b>	
<b>THÈME 3-A FÉMININ, MASCULIN</b>	
<p>L'étude de la sexualité humaine s'appuie sur les acquis du collège. Dans une optique d'éducation à la santé et à la responsabilité, il s'agit de comprendre les composantes biologiques principales de l'état masculin ou féminin, du lien entre la sexualité et la procréation et des relations entre la sexualité et le plaisir. Ces enseignements gagneront à être mis en relation avec d'autres approches interdisciplinaire (philosophie) et/ou intercatégorielle (professionnels de santé). Il s'agit d'aider l'élève à la prise en charge responsable de sa vie sexuelle.</p>	
<i>Devenir femme ou homme</i>	
<p>On saisira l'occasion d'affirmer que si l'identité sexuelle et les rôles sexuels dans la société avec leurs stéréotypes appartiennent à la sphère publique, l'orientation sexuelle fait partie, elle, de la sphère privée. Cette distinction conduit à porter l'attention sur les phénomènes biologiques concernés.</p>	
<p>Les phénotypes masculin et féminin se distinguent par des différences anatomiques, physiologiques, et chromosomiques. La mise en place des structures et de la fonctionnalité des appareils sexuels se réalise, sous le contrôle du patrimoine génétique, sur une longue période qui va de la fécondation à la puberté, en passant par le développement embryonnaire et fœtal. La puberté est la dernière étape de la mise en place des caractères sexuels.</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. SRY, testostérone, AMH. (Collège et Seconde. Première approche de la distinction homme/femme et de la puberté.) [Limites. Les acquis anatomiques du collège seront seulement rappelés.]</i></p>	<p>Extraire et exploiter des informations de différents documents, réaliser des dissections pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- identifier les différences anatomiques, physiologiques et chromosomiques des deux sexes ;</li> <li>- expliquer les étapes de différenciation de l'appareil sexuel au cours du développement embryonnaire.</li> </ul> <p>Traduire les différents mécanismes étudiés sous la forme de schémas fonctionnels.</p>
<i>Sexualité et procréation</i>	
<p>Chez l'homme et la femme, le fonctionnement de l'appareil reproducteur est contrôlé par un dispositif neuroendocrinien qui fait intervenir l'hypothalamus, l'hypophyse et les gonades. La connaissance de ces mécanismes permet de comprendre et de mettre au point des méthodes de contraception féminine préventive (pilules contraceptives) ou d'urgence (pilule du lendemain). Des méthodes de contraception masculine hormonale se développent. D'autres méthodes contraceptives existent, dont certaines présentent aussi l'intérêt de protéger contre les infections sexuellement transmissibles.</p> <p>L'infertilité des couples peut avoir des causes variées. Dans beaucoup de cas, des techniques permettent d'aider les couples à satisfaire leur désir d'enfant: insémination artificielle, FIV/ETE, ICSI.</p>	<p>Traduire les mécanismes de contrôle de l'activité gonadique sous la forme de schémas fonctionnels.</p> <p>Effectuer des gestes techniques pour réaliser différentes observations microscopiques.</p> <p>Mettre en oeuvre une méthode (démarche historique) et/ou une utilisation de logiciels et/ou une pratique documentaire pour expliquer le mode d'action de différentes pilules contraceptives.</p> <p>Extraire et exploiter des données pour relier la prévention contre les IST (SIDA, hépatite, papillomavirus...) à la vaccination ou l'utilisation du préservatif.</p> <p>Recenser, extraire et organiser des informations pour comprendre les modalités de la procréation médicalement assistée.</p> <p>Percevoir le lien entre science et technique.</p> <p>Argumenter, débattre sur des problèmes éthiques posés par certaines pratiques médicales.</p>

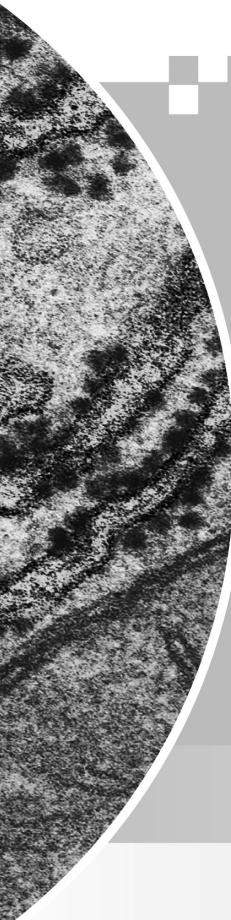
Connaissances	Capacités et attitudes
<p><i>Objectifs et mots-clés. Les mécanismes neuroendocrines de contrôle de la reproduction sont étudiés. (Collège et lycée. Première approche du fonctionnement de l'appareil reproducteur et de la contraception. Première approche de la procréation médicalement assistée.)</i></p> <p><i>[Limites. Les mécanismes cellulaires de l'action des hormones, de même que les voies de leur synthèse, ne sont pas au programme. Il ne s'agit pas de présenter les techniques de procréation médicalement assistée mais seulement de montrer que la compréhension de leurs principes généraux repose sur des connaissances scientifiques et d'évoquer leur cadre éthique.]</i></p> <p><i>Pistes. Bioéthique (philosophie); hormones naturelles/hormones synthétiques (chimie).</i></p>	
<b><i>Sexualité et bases biologiques du plaisir</i></b>	
<p>L'activité sexuelle est associée au plaisir.</p> <p>Le plaisir repose notamment sur des phénomènes biologiques, en particulier l'activation dans le cerveau des « systèmes de récompense ».</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. Sans chercher à laisser croire que les relations entre sexualité et plaisir ne s'expriment qu'en termes scientifiques, on montre qu'une composante biologique existe.</i></p> <p><i>[Limites. Les mécanismes cérébraux du plaisir sont étudiés seulement d'une façon globale (activation de zones cérébrales) sans explicitation des phénomènes cellulaires].</i></p> <p><i>Pistes. Éducation à la santé et à la sexualité.</i></p>	<p>Mettre en œuvre une méthode (démarche historique) et/ou une utilisation de logiciels et/ou une pratique documentaire pour mettre en évidence le système de récompense.</p>
<p><b>THÈME 3-B VARIATION GÉNÉTIQUE ET SANTÉ</b></p> <p>L'Homme aussi bien que les microorganismes infectieux susceptibles de l'attaquer présentent une forte variabilité génétique issue de mutations et conservée au cours des générations. Ces variations présentent des implications en matière de santé: les Hommes ne sont pas « génétiquement égaux devant la maladie » et l'évolution rapide des microorganismes pose des problèmes en termes de prévention et de traitement. En outre, on insiste sur le fait qu'en général, le développement d'une maladie ou la mise en place d'un phénotype dépend de l'interaction complexe entre le génotype et l'histoire personnelle.</p>	
<b><i>Patrimoine génétique et maladie</i></b>	
<p>La mucoviscidose est une maladie fréquente, provoquée par la mutation d'un gène qui est présent sous cette forme chez une personne sur 40 environ. Seuls les homozygotes pour l'allèle muté sont malades.</p> <p>Le phénotype malade comporte des aspects macroscopiques qui s'expliquent par la modification d'une protéine.</p> <p>L'étude d'un arbre généalogique permet de prévoir le risque de transmission de la maladie.</p> <p>On limite les effets de la maladie en agissant sur des paramètres du milieu. La thérapie génétique constitue un espoir de correction de la maladie dans les cellules pulmonaires atteintes.</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. Le but est de comprendre une maladie génétique. La mucoviscidose est suggérée en raison de sa fréquence, mais le professeur pourra, s'il le souhaite, choisir un autre exemple.</i></p> <p><i>Collège et Seconde. Mutation, phénotype, génotype, relation gène – protéine. [Limites: aucune connaissance concernant une autre maladie génétique n'est attendue, mais un élève doit pouvoir l'étudier à partir de documents fournis. On se limite au cas de maladies autosomales.]</i></p> <p><i>Convergences. Mathématiques : probabilités.</i></p>	<p>Recenser, extraire et organiser des informations :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pour établir le lien entre le phénotype macroscopique et le génotype ;</li> <li>- pour comprendre les traitements médicaux (oxygénothérapie, kinésithérapie) et les potentialités offertes par les thérapies géniques.</li> </ul> <p>Étudier un arbre généalogique pour évaluer un risque génétique.</p>

<b>Connaissances</b>	<b>Capacités et attitudes</b>
<p>Le plus souvent, l'impact du génome sur la santé n'est pas un déterminisme absolu. Il existe des gènes dont certains allèles rendent plus probable le développement d'une maladie sans pour autant le rendre certain. En général les modes de vie et de milieu interviennent également et le développement d'une maladie dépend alors de l'interaction complexe entre facteurs du milieu et génome.</p> <p>Un exemple de maladie (maladie cardiovasculaire, diabète de type II) permet d'illustrer le type d'études envisageables.</p> <p><i>Objectifs et méthodes. Il s'agit de montrer aux élèves que la détermination des causes d'une maladie n'est possible qu'en utilisant un mode de pensée statistique. On cherche également à développer une capacité critique face à la simplicité de certains messages affirmant le rôle déterminant de tel facteur, génétique ou non.</i></p> <p><i>[Limites. Il s'agit, à partir de l'exemple des maladies cardiovasculaires ou du diabète de type II, de montrer les principes généraux d'une approche épidémiologique, sans formalisme mathématique complexe. Il ne s'agit nullement de développer une expertise réelle en matière d'épidémiologie, mais seulement de sensibiliser à ce type d'approche.]</i></p> <p><i>Pistes. Études statistiques de problèmes de santé (mathématiques).</i></p>	<p>Recenser, extraire et organiser des informations pour identifier :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- l'origine multigénique de certaines maladies ;</li> <li>- l'influence des facteurs environnementaux.</li> </ul> <p>Comprendre que déterminer les facteurs génétiques ou non d'une maladie repose sur des méthodes particulières qui constituent les fondements de l'épidémiologie.</p> <p>Comprendre les conditions de validité d'affirmations concernant la responsabilité d'un gène ou d'un facteur de l'environnement dans le déclenchement d'une maladie.</p> <p>Savoir choisir ses comportements face à un risque de santé pour exercer sa responsabilité individuelle ou collective.</p>
<b>Perturbation du génome et cancérisation</b>	
<p>Des modifications accidentielles du génome peuvent se produire dans des cellules somatiques et se transmettre à leurs descendantes. Elles sont à l'origine de la formation d'un clone cellulaire porteur de ce génome modifié. La formation d'un tel clone est parfois le commencement d'un processus de cancérisation.</p> <p>Des modifications somatiques du génome surviennent par mutations spontanées ou favorisées par un agent mutagène. D'autres sont dues à des infections virales.</p> <p>La connaissance de la nature des perturbations du génome responsable d'un cancer permet d'envisager des mesures de protection (éviter des agents mutagènes, surveillance, vaccination).</p> <p><i>Collège et Seconde. Mutation, première approche de la vaccination.</i></p> <p><i>[Limites. L'intérêt de la vaccination n'est signalé qu'en s'appuyant sur les acquis du collège: les mécanismes précis de la vaccination seront étudiés en terminale. La perturbation du génome par un virus est présentée de façon globale seulement : ses mécanismes seront étudiés en Terminale.]</i></p> <p><i>Pistes. Cancers et politiques de prévention ; cancer et santé publique (histoire, géographie, ECJS).</i></p>	<p>Recenser, extraire et organiser des informations pour identifier l'origine des facteurs de cancérisation (agents mutagènes, infections virales). Comprendre les causes multiples pouvant concourir au développement de certains cancers (cas des cancers pulmonaires) et identifier des mesures de prévention possibles.</p> <p>Comprendre l'importance, en matière de santé publique, de certains virus liés à la cancérisation (hépatite B, papillomavirus) et connaître les méthodes de prévention possibles.</p>
<b>Variation génétique bactérienne et résistance aux antibiotiques</b>	
<p>Des mutations spontanées provoquent une variation génétique dans les populations de bactéries. Parmi ces variations, certaines font apparaître des résistances aux antibiotiques.</p> <p>L'application d'un antibiotique sur une population bactérienne sélectionne les formes résistantes et permet leur développement. L'utilisation systématique de traitements antibiotiques peut augmenter la fréquence des formes résistantes par sélection naturelle.</p>	<p>Concevoir et mettre en place un protocole permettant de montrer la sensibilité de micro-organismes à différents antibiotiques.</p> <p>Recenser, extraire et organiser des informations pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- identifier la sensibilité ou la résistance de micro-organismes à différents antibiotiques ;</li> <li>- pour calculer le taux d'apparition de résistances dans une population.</li> </ul> <p>Comprendre, sur un exemple, l'application du raisonnement évolutionniste en matière médicale.</p>

Connaissances	Capacités et attitudes
<p><i>Collège et Seconde. Mutation, fréquence allélique, sélection naturelle. [Limites. Les mécanismes moléculaires de la résistance aux antibiotiques ne sont pas au programme : si un exemple est décrit pour faire comprendre ce dont il s'agit, il ne devra pas être mémorisé.]</i></p> <p><i>Pistes. La résistance aux antibiotiques, les infections nosocomiales.</i></p>	
<b>THÈME 3-C DE L'ŒIL AU CERVEAU : QUELQUES ASPECTS DE LA VISION</b>	
Les notions d'optique de la vision sont étudiées en physique, ainsi que quelques données essentielles sur la lumière et la couleur. Sans chercher à proposer une étude exhaustive de la physiologie de la vision, cette thématique est abordée selon trois approches qui associent des aspects scientifiques et des implications en matière de santé.	
<p><b><i>Le cristallin : une lentille vivante</i></b></p> <p>Le cristallin est l'un des systèmes transparents de l'œil humain. Il est formé de cellules vivantes qui renouvellent en permanence leur contenu. Les modalités de ce renouvellement sont indispensables à sa transparence.</p> <p>Des anomalies de forme du cristallin expliquent certains défauts de vision. Avec l'âge, sa transparence et sa souplesse peuvent être altérées.</p> <p>Convergences. Physique : optique géométrique, fonctionnement optique de l'œil.</p> <p><i>Pistes. Les traitements des déficiences du cristallin.</i></p>	<p>Recenser, extraire et organiser des informations et/ou manipuler (dissection, maquette et/ou recherche documentaire) pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- localiser et comprendre l'organisation et le fonctionnement du cristallin ;</li> <li>- comprendre certains défauts de vision.</li> </ul>
<b><i>Les photorécepteurs : un produit de l'évolution</i></b>	
<p>La rétine est une structure complexe qui comprend les récepteurs sensoriels de la vision appelés photorécepteurs. Celle de l'Homme contient les cônes permettant la vision des couleurs (3 types de cônes respectivement sensibles au bleu, au vert et au rouge) et les bâtonnets sensibles à l'intensité lumineuse. Les gènes des pigments rétiniens constituent une famille multigénique (issue de duplications) dont l'étude permet de placer l'Homme parmi les primates.</p> <p>Des anomalies des pigments rétiniens se traduisent par des perturbations de la vision des couleurs.</p> <p>Le message nerveux issu de l'œil est acheminé au cerveau par le nerf optique.</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. Tout en évoquant rapidement la complexité de la rétine et de ses fonctions, il s'agit de centrer l'attention sur les cellules photoréceptrices. Leur étude permet aussi bien d'évoquer des troubles de la vision colorée que de réaliser une première approche de la place de l'Homme dans l'évolution.</i></p> <p><i>[Limites. La physiologie de la rétine n'est pas abordée. On signale simplement l'élaboration globale d'un message acheminé par le nerf optique.]</i></p> <p>Convergences. Physique : lumière, couleur.</p> <p><i>Pistes. Le daltonisme ; la vision des couleurs chez les vertébrés.</i></p>	<p>Extraire et exploiter des informations (maquette, logiciel et/ou recherche documentaire et/ou observations microscopiques) pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- comprendre l'organisation de la rétine ;</li> <li>- déterminer le rôle des photorécepteurs ;</li> <li>- comprendre l'organisation des voies visuelles ;</li> <li>- faire le lien entre la vision des couleurs et l'évolution.</li> </ul>
<b><i>Cerveau et vision : aires cérébrales et plasticité</i></b>	
<p>Plusieurs aires corticales participent à la vision.</p> <p>L'imagerie fonctionnelle du cerveau permet d'observer leur activation lorsque l'on observe des formes, des mouvements. La reconnaissance des formes nécessite une collaboration entre les fonctions visuelles et la mémoire.</p>	<p>Exploiter des données, notamment expérimentales, pour comprendre qu'une image naît des interactions entre différentes aires du cortex cérébral.</p> <p>Recenser, extraire et organiser des informations pour comprendre le phénomène de plasticité cérébrale et son importance dans l'établissement de différentes fonctions cognitives.</p>

<b>Connaissances</b>	<b>Capacités et attitudes</b>
<p>Des substances comme le LSD perturbent le fonctionnement des aires cérébrales associées à la vision et provoquent des hallucinations qui peuvent dériver vers des perturbations cérébrales graves et définitives.</p> <p>La mise en place du phénotype fonctionnel du système cérébral impliqué dans la vision repose sur des structures cérébrales innées, issues de l'évolution et sur la plasticité cérébrale au cours de l'histoire personnelle.</p> <p>De même, la mémoire nécessaire, par exemple, à la reconnaissance d'un visage ou d'un mot repose sur la plasticité du cerveau.</p> <p>L'apprentissage repose sur la plasticité cérébrale. Il nécessite la sollicitation répétée des mêmes circuits neuroniques.</p> <p><i>Objectifs et mots-clés. On cherche à montrer comment la réalisation d'une fonction cognitive complexe repose sur l'activité de plusieurs zones cérébrales de façon coordonnée. La maturation des systèmes cérébraux liés à la vision permet, à partir d'un nombre limité d'exemples, de présenter la notion de plasticité cérébrale et son lien avec l'apprentissage.</i></p> <p><i>[Limites. Il ne s'agit pas de présenter une étude exhaustive des aires cérébrales intervenant dans la vision ni des mécanismes précis de la mémoire ou du langage. La notion de plasticité cérébrale est abordée à partir d'un nombre limité d'exemples, sans souci d'exposé exhaustif de ses mécanismes.]</i></p>	<p>Interpréter des expériences sur la maturation du cortex visuel chez l'animal.</p> <p>Interpréter des observations médicales et/ou des imageries cérébrales chez l'Homme.</p>





# Partie

# 1

# Expression, stabilité et variation du patrimoine génétique

Chapitre 1	Reproduction conforme et réPLICATION de l'ADN .....	28
Chapitre 2	Variabilité génétique et mutation de l'ADN .....	42
Chapitre 3	L'expression du patrimoine génétique .....	55
Chapitre 4	Génotype, phénotype et environnement .....	67

# 1 Expression, stabilité et variation du patrimoine génétique

## Les objectifs généraux de cette partie

Dans le nouveau programme de la classe de Première S, cette partie s'intègre au thème plus général « La Terre dans l'Univers, la vie et l'évolution du vivant ». Rappelons en effet que trois thématiques générales structurent désormais les programmes de chacune des années du lycée et se retrouvent donc à chaque niveau. Par commodité, les auteurs proposent cependant de bien distinguer cette première partie de la suivante qui, bien qu'appartenant au même thème, est de nature très différente puisque purement géologique.

Les instructions préconisent d'accorder 50 % du temps annuel à l'ensemble de cette grande thématique. Il est donc raisonnable d'accorder 25 % du temps annuel à cette première partie.

Celle-ci s'inscrit dans la continuité d'un enseignement de biologie qui trouve une cohérence verticale du collège à la classe de Terminale. En effet, au collège, les élèves ont déjà effectué, en classe de Troisième, une première approche des bases génétiques sur lesquelles reposent l'unité et la diversité des êtres vivants. L'évolution de la biodiversité a été mise en évidence et reliée à la variation génétique. Un premier approfondissement a été réalisé en classe de Seconde : la structure de la molécule d'ADN est désormais connue, sa nature codée mise en évidence et la biodiversité envisagée à différents niveaux et dans toutes ses composantes. Le manuel propose donc deux pages qui permettent, sans perte de temps, de mobiliser les acquis essentiels.

En classe de Première, l'approfondissement porte tout d'abord sur l'étude plus précise de la division cellulaire et de la réPLICATION de l'ADN. Ces concepts ne sont pas nouveaux : en classe de Troisième, les élèves ont déjà vu que le programme génétique se retrouve conservé dans toutes les cellules d'un même organisme. L'étude porte donc ici sur les modalités de ces mécanismes, intégrant les connaissances de la classe de Seconde concernant la molécule d'ADN : état des chromosomes, étapes de la mitose, mécanisme semi-conservatif de réPLICATION de l'ADN.

Il s'agit ensuite de montrer sur quoi repose la variabilité de l'ADN : en effet, l'idée d'une reproduction conforme de l'information génétique doit être immédiatement tempérée par l'existence d'une variabilité de cette molécule. La part accordée aux mécanismes qui soutiennent cette variabilité (étude de l'action des agents mutagènes, systèmes de réparation de l'ADN, devenir des mutations somatiques et germinales) est beaucoup plus importante que dans les anciens programmes.

Enfin, cette partie du programme aborde les questions de l'expression de l'information génétique. On retrouve ici les relations classiques entre génotype et phénotype. Cependant, la démarche de ce nouveau programme consiste à partir de l'ADN pour envisager ensuite son expression aux différentes échelles : phénotype moléculaire d'abord (synthèse des protéines, code génétique) puis autres échelles du phénotype (cellulaire et de l'organisme) et enfin étude des interactions avec les facteurs environnementaux.

Cette partie du programme permet de mettre en œuvre une démarche d'investigation : après avoir posé des problématiques précises (les pages d'ouverture de chapitre proposent

des documents permettant de s'interroger), les différentes activités permettent de pratiquer une démarche scientifique : élaboration d'hypothèses, recherche d'informations, expérimentation, etc. Il appartient au professeur d'effectuer ces activités de façon guidée ou de laisser plus d'autonomie à ses élèves en proposant, de temps en temps, la pratique de tâches complexes. C'est pourquoi, dans les « Pistes d'exploitation » de chaque activité, une problématique générale a d'abord été posée, suivie de quelques questions plus précises pour aider à l'exploitation des documents, sans préjuger de la démarche de résolution que l'on peut mettre en œuvre.

Notons qu'à plusieurs reprises, il est possible d'adopter une démarche historique ou bien de compléter les activités pratiques par des aperçus complémentaires sur l'histoire des sciences (voir, en particulier, les pages « Des clés pour... »).

Chaque chapitre peut se prêter à des approfondissements (suggérés dans le programme sous l'appellation de « pistes ») : on trouvera dans le manuel, à la fin de chaque chapitre, des documents « Des clés pour... aller plus loin » pouvant servir de support pour de tels approfondissements.

Au cours de cette partie du programme, on développera ainsi diverses compétences :

- **Des connaissances** : il s'agit tout d'abord de préciser la relation entre ADN et chromosomes. Le mécanisme de réplication de l'ADN est mis en relation avec les différentes étapes de la mitose afin de montrer comment est assurée la reproduction conforme de l'information génétique (maintien du caryotype au cours des générations cellulaires). Le phénomène de mutation est présenté comme inhérent au processus même de réplication et l'action des agents mutagènes est mise en évidence. Les différents types de mutations ponctuelles sont répertoriés et le devenir des mutations est envisagé, tant à l'échelle de l'individu qu'à celle de l'organisme. Enfin, le lien est fait entre mutation et biodiversité génétique.

L'expression de l'information génétique nécessite de comprendre la structure primaire des protéines et le rôle essentiel de ces molécules. On détaillera ensuite les étapes de la transcription et de la traduction (existence et rôle de l'ARN messager, code génétique). La maturation des ARN pré-messagers et l'épissage alternatif permettent, dès la classe de Première, d'aller au-delà du dogme « un gène – une protéine ». Le phénotype est envisagé aux différentes échelles et la complexité des interactions avec les facteurs environnementaux permet de relativiser l'importance du déterminisme génétique.

- **Des capacités** : cette partie du programme permet la mise en œuvre de nombreuses capacités expérimentales. L'observation du réel se fera à différentes échelles, nécessitant le recours au microscope optique mais aussi l'observation d'électronographies et l'utilisation de logiciels de visualisation de modèles moléculaires. La mise en évidence des mutations ponctuelles et l'expression de l'information génétique nécessitent de maîtriser les logiciels de traitement de séquences nucléotidiques et protéiques. Différentes manipulations sont proposées, nécessitant le respect de protocoles précis (effets d'une irradiation d'une culture de levures par les UV par exemple). L'exploitation et la communication des observations et des résultats expérimentaux nécessitent de s'approprier progressivement le vocabulaire scientifique et les outils de communication comme le dessin d'observation, le schéma, la numérisation d'images notamment.

- **Des attitudes** : dans cette partie, les élèves prendront conscience de l'importance d'un certain nombre de questions de santé et de la responsabilité tant individuelle que collective : effet des agents mutagènes, risques liés au cancer, maladies génétiques. Certaines de ces questions seront plus précisément étudiées dans la dernière partie du programme.

Les expérimentations réalisées nécessitent le respect de règles strictes : travail dans des conditions stériles, sécurité au laboratoire (utilisation d'une lampe à UV), etc.

Cette partie du programme est découpée en quatre chapitres : le **chapitre 1** est consacré à l'étude du cycle cellulaire (mitose et réPLICATION de l'ADN). Le **chapitre 2** aborde les questions liées à la variabilité de l'ADN. Le **chapitre 3** concerne l'expression de l'information génétique et les relations gènes-protéines. Le **chapitre 4** envisage les différents aspects des relations génotype/phénotype, aux différentes échelles.

## Une correspondance entre le programme officiel et les chapitres du manuel

Connaissances	Les chapitres du manuel
<p><b>Reproduction conforme de la cellule et réPLICATION de l'ADN</b></p> <p>Les chromosomes sont des structures constantes des cellules eucaryotes qui sont dans des états de condensation variables au cours du cycle cellulaire. En général la division cellulaire est une reproduction conforme qui conserve toutes les caractéristiques du caryotype (nombre et morphologie des chromosomes).</p> <p>Chaque chromatide contient une molécule d'ADN.</p> <p>Au cours de la phase S, l'ADN subit la réPLICATION semi-conservative. En absence d'erreur, ce phénomène préserve, par copie conforme, la séquence des nucléotides.</p> <p>Ainsi, les deux cellules-filles provenant par mitose d'une cellule-mère possèdent la même information génétique.</p>	<p><b>chapitre 1</b></p> <p><b>Reproduction conforme et réPLICATION de l'ADN</b> (pages 10-29)</p> <p><b>Les activités pratiques</b></p> <p><b>Act. 1</b> Les chromosomes, éléments permanents des cellules</p> <p><b>Act. 2</b> La division cellulaire : une reproduction conforme</p> <p><b>Act. 3</b> Le mécanisme de la réPLICATION de l'ADN</p> <p><b>Act. 4</b> Les étapes du cycle cellulaire</p>
<p><b>Variabilité génétique et mutation de l'ADN</b></p> <p>Pendant la réPLICATION de l'ADN surviennent des erreurs spontanées et rares, dont la fréquence est augmentée par l'action d'agents mutagènes. L'ADN peut aussi être endommagé en dehors de la réPLICATION.</p> <p>Le plus souvent l'erreur est réparée par des systèmes enzymatiques. Quand elle ne l'est pas, si les modifications n'empêchent pas la survie de la cellule, il apparaît une mutation, qui sera transmise si la cellule se divise.</p> <p>Une mutation survient soit dans une cellule somatique (elle est ensuite présente dans le clone issu de cette cellule) soit dans une cellule germinale (elle devient alors héréditaire).</p> <p>Les mutations sont la source aléatoire de la diversité des allèles, fondement de la biodiversité.</p>	<p><b>chapitre 2</b></p> <p><b>Variabilité génétique et mutation de l'ADN</b> (pages 30-49)</p> <p><b>Les activités pratiques</b></p> <p><b>Act. 1</b> L'origine d'une variabilité de l'ADN</p> <p><b>Act. 2</b> L'influence d'une irradiation par les UV</p> <p><b>Act. 3</b> Réparation de l'ADN et mutations</p> <p><b>Act. 4</b> Mutations et biodiversité</p>

Connaissances	Les chapitres du manuel
<p><i>L'expression du patrimoine génétique</i></p> <p>La séquence des nucléotides d'une molécule d'ADN représente une information. Le code génétique est le système de correspondance mis en jeu lors de la traduction de cette information. À quelques exceptions près, il est commun à tous les êtres vivants.</p> <p>Les portions codantes de l'ADN comportent l'information nécessaire à la synthèse de chaînes protéiques issues de l'assemblage d'acides aminés. Chez les eucaryotes, la transcription est la fabrication, dans le noyau, d'une molécule d'ARN pré-messager, complémentaire du brin codant de l'ADN. Après une éventuelle maturation, l'ARN messager est traduit en protéines dans le cytoplasme.</p> <p>Un même ARN pré-messager peut subir, suivant le contexte, des maturations différentes et donc être à l'origine de plusieurs protéines différentes.</p>	<p><b>chapitre 3</b></p> <p><b>L'expression du patrimoine génétique</b> (pages 50-71)</p> <p><b>Les activités pratiques</b></p> <p><b>Act. 1</b> La découverte des relations entre protéines et ADN  <b>Act. 2</b> Le transfert de l'information génétique  <b>Act. 3</b> Le langage génétique  <b>Act. 4</b> La traduction de l'ARN messager en protéine  <b>Act. 5</b> Du génome au « protéome »</p>
<p>L'ensemble des protéines qui se trouvent dans une cellule (phénotype moléculaire) dépend :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- du patrimoine génétique de la cellule (une mutation allélique peut être à l'origine d'une protéine différente ou de l'absence d'une protéine) ;</li> <li>- de la nature des gènes qui s'expriment sous l'effet de l'influence de facteurs internes et externes variés.</li> </ul> <p>Le phénotype macroscopique dépend du phénotype cellulaire, lui-même induit par le phénotype moléculaire.</p>	<p><b>chapitre 4</b></p> <p><b>Génotype, phénotype et environnement</b> (pages 72-83)</p> <p><b>Les activités pratiques</b></p> <p><b>Act. 1</b> Le phénotype se définit à différentes échelles  <b>Act. 2</b> Phénotype moléculaire et expression génétique  <b>Act. 3</b> L'influence de l'environnement sur le phénotype</p>

# Reproduction conforme et réPLICATION de l'ADN

## Activités pratiques

1

### Les chromosomes, éléments permanents des cellules (p. 12-13)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>Les chromosomes sont des structures constantes des cellules eucaryotes qui sont dans des états de condensation variables au cours du cycle cellulaire.</p> <p>Chaque chromatide contient une molécule d'ADN.</p>	<p>Recenser, extraire et exploiter des informations permettant de caractériser le cycle cellulaire.</p>

### Les intentions pédagogiques

Au début de cette partie du programme, on s'appuie sur les connaissances acquises par les élèves en classes de Troisième et Seconde (voir « Retrouver les acquis » pages 8 et 9). L'existence des chromosomes est connue, ainsi que le fait qu'ils sont constitués d'ADN. L'accent est mis dans cette activité sur le fait que les chromosomes sont des éléments présents en permanence, mais qui changent d'état selon le moment du cycle cellulaire. L'idée essentielle est celle d'une « condensation » plus ou moins importante de l'ADN au cours du cycle cellulaire ; à ce stade, on distingue seulement la période de l'interphase et celle de la mitose, sans entrer dans le détail des différentes phases de chacune de ces deux périodes (ce sera fait ultérieurement au cours de la dernière activité de ce chapitre, car la phase S, notamment, ne prend son sens que si l'on a déjà vu ce qu'était la réPLICATION de l'ADN).

Une démarche d'investigation peut être initiée à partir du document présenté page 10 (Chromosome et ADN). On peut en effet s'interroger sur la relation existant entre ADN et chromosome (au sens du classique chromosome mitotique).

Le **document 1** met en évidence la présence permanente du matériel chromosomique au cours du cycle cellulaire. Dans la cellule en division, la coloration au réactif de Schiff révèle l'ADN formant des chromosomes nettement identifiables, alors qu'il apparaît dispersé dans le noyau de la cellule en interphase, aucun chromosome (au sens où les élèves se le représentent) n'étant visible. À noter que la coloration de Feulgen, utilisant le réactif de Schiff, est bien spécifique de l'ADN : la coloration rouge résulte d'une réaction entre le désoxyribose et la fuchsine. L'observation des chromosomes mitotiques ou des noyaux interphasiques au microscope optique est tout à fait réalisable par les élèves (pour la technique détaillée de la coloration de Feulgen, voir ci-dessous « Ressources complémentaires»). Le cas particulier de l'observation des chromosomes polyténiques est proposé en exercice page 29.

Le **document 2** est un support facilitant ou complétant une activité pratique facilement réalisable par les élèves eux-mêmes, révélant la capacité d'enroulement de l'ADN.

L'utilisation d'un logiciel de modélisation moléculaire permet de visualiser un modèle de nucléosome, de réaliser des mesures : contrairement à ce que l'on pourrait penser, la molécule d'ADN ne se présente jamais sous la forme d'un simple filament mais est enroulé autour de corpuscules protéiques. Sans entrer dans les détails, ce rôle structural des histones sera simplement signalé.

Le **document 3** vise à établir clairement l'organisation d'un chromosome. La notion de chromosome « double », constitué de deux chromatides, par rapport au chromosome « simple », à une chromatide, a déjà été vue en Troisième ; elle est essentielle pour la compréhension du chapitre et pour la suite des études scientifiques (Terminale S notamment). Dans cette perspective, et pour éviter des confusions fréquentes chez les élèves, il apparaît indispensable de maîtriser le vocabulaire essentiel associé à la description d'un chromosome (centromère, bras courts et longs, chromatides).

L'identité des deux chromatides d'un même chromosome est connue depuis la classe de Troisième. Rappeler cette identité est un préalable nécessaire pour comprendre comment la division cellulaire assure la répartition intégrale de l'information génétique entre deux cellules-filles (activités pratiques 2). On peut aussi déjà poser à cette occasion la problématique du mécanisme de l'obtention de ces deux copies identiques de l'information génétique : ce sera l'objet des activités pratiques 3.

Mais l'objectif de ce document est de faire comprendre que dans un chromosome mitotique, l'ADN est hyper-condensé : un raisonnement associant l'étude du schéma, l'observation des microphotographies et les données chiffrées permet alors de proposer une explication : grâce à des enroulements successifs, 8,2 cm d'ADN sont en effet empaquetés sur 7 µm de longueur et 0,7 µm de largeur dans le chromosome humain 1.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Sur la photographie **a**, l'ADN forme des corps colorés bien identifiables, les chromosomes. Ces éléments sont invisibles sur la photographie **b**, alors que l'ADN est pourtant présent, comme le révèle la coloration au réactif de Schiff. Dans ce cas, les molécules ADN apparaissent diffuses, dispersées dans l'ensemble du noyau cellulaire.

**Doc. 3 :** L'ADN est présent à des degrés de condensation différents selon le moment du cycle cellulaire auquel la cellule se trouve.

Sur la photographie **a**, les molécules d'ADN sont très condensées, surenroulées sur elles-mêmes et forment des chromosomes courts et épais, bien observables. Sur la photographie **b**, les molécules d'ADN sont peu condensées : elles sont donc plus longues et forment des amas filamenteux enchevêtrés.

**Doc. 2 et 3 :** En passant de l'interphase à la mitose, chaque filament d'ADN se surenroule sur lui-même : cet état très condensé forme un chromosome bien individualisé. La transformation inverse se produit lors du passage de la mitose à l'interphase.

**Doc. 1 à 3 :** Les chromosomes sont des éléments permanents car ils restent présents à chaque période du cycle cellulaire. Cependant, ils sont visibles au microscope de façon individualisée uniquement lorsque les molécules d'ADN qui les constituent se surenroulent sur elles-mêmes dans un état maximal de condensation, ce qui ne se produit que lors de la mitose. Pendant l'interphase, le matériel chromosomique est bien présent, mais les chromosomes sont invisibles au microscope car les molécules d'ADN ne sont pas condensées.

## Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les différents aspects présentés par le matériel génétique au cours de la vie d'une cellule dépendent de l'état plus ou moins condensé dans lequel se trouvent les molécules d'ADN. Pendant la mitose, les molécules d'ADN sont enroulées sur elles-mêmes, très condensées. Elles forment alors des bâtonnets courts et épais, bien individualisés, facilement observables : ce sont les chromosomes. En interphase, les molécules d'ADN sont peu condensées et forment des amas diffus de molécules enchevêtrées.

### 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas** : vidéo du modèle moléculaire d'un nucléosome.
- **Site ressources Bordas** : modèle moléculaire (fichier « pdb ») d'un nucléosome.
- **Observer des chromosomes au microscope optique** (Les SVT au lycée – Jean-Jacques Auclair) :  
<http://jean-jacques.auclair.pagesperso-orange.fr/travaux/chromo/chromo1.htm>

## La division cellulaire : une reproduction conforme (p. 14-15)

Connaissances	Capacités et attitudes
En général, la division cellulaire est une reproduction conforme qui conserve toutes les caractéristiques du caryotype (nombre et morphologie des chromosomes).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recenser, extraire et exploiter des informations permettant de caractériser le cycle cellulaire et ses phases, dans différents types cellulaires.</li> <li>- Effectuer un geste technique en observant au microscope des divisions de cellules eucaryotes.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Le fait que les chromosomes soient des éléments permanents des cellules ayant été établi au cours de l'activité 1, cette seconde activité vise à découvrir leur comportement au cours de la division cellulaire.

Conformément au programme, cette activité précède l'étude de l'interphase et de la duplication de l'ADN. Cependant, cette étude ne prend son sens que si l'on a déjà bien compris qu'au début de la division cellulaire, l'information génétique est présente dans la cellule mère en double exemplaire (chaque chromosome est « double ») : ceci peut et doit être considéré comme un acquis (vu en classe de Troisième et rappelé au cours de l'activité précédente). L'étude de l'interphase, qui est l'objet de l'activité suivante, portera donc sur la recherche des mécanismes qui assurent cette duplication.

Dans un premier temps, cette activité propose une observation concrète de cellules en mitose, afin d'établir le déroulement de l'ensemble du phénomène en classant des prises de vues dans un ordre chronologique. Le **document 1** présente donc d'abord un protocole permettant l'obtention de préparations microscopiques contenant des cellules en mitose. La coloration à l'orcéine acétique, facile à réaliser, est très efficace mais d'autres techniques peuvent être utilisées (voir ci-dessous « Ressources complémentaires »).

Cette activité nécessite de mettre en œuvre de différentes capacités expérimentales : suivre un protocole, réaliser une préparation microscopique, utiliser le microscope, réaliser des photographies ou faire des dessins d'observation. Les différentes observations réalisées par les élèves pourront être mutualisées, mises en commun (il est en effet difficile d'obtenir en une seule préparation des cellules à tous les stades de la mitose).

Les clichés obtenus peuvent être comparés aux six photographies du document 1 (ici volontairement non classées dans l'ordre chronologique), afin de s'assurer que l'ensemble des stades de la mitose a été obtenu ; il faudra ensuite les classer dans un ordre logique et décrire le comportement des chromosomes. Si certains stades n'ont pas été observés, les photographies **a** à **f** peuvent servir de document de secours.

Le **document 2** propose de se focaliser sur deux moments-clés de la mitose afin d'y décrire le comportement précis des chromosomes et de bien comprendre la signification essentielle de ce phénomène. Les clichés obtenus par les élèves lors de leur propre manipulation ne pouvant atteindre cette définition, l'étude de ces photographies (qui peut faire l'objet de la réalisation de croquis) est complémentaire de l'activité proposée par le document 1 pour la découverte de l'ensemble du déroulement de la mitose.

Les deux photographies de la métaphase et de l'anaphase ont une excellente définition et un format tel qu'elles permettent (presque) de distinguer individuellement les 16 chromosomes

contenus dans la cellule. Les chromosomes sont bien visibles à l'état répliqué sur la photographie **a**, avec leur net alignement à l'équateur de la cellule. La photographie **b** met en évidence la formation de deux lots de chromosomes égaux en nombre, et ne comportant visiblement chacun qu'une seule chromatide. On montre ainsi les deux étapes-clés qui permettent la conservation du même caryotype dans les deux cellules-filles.

À l'issue de cette étude, le comportement des chromosomes a été décrit en totalité : pour vérifier et associer les noms des quatre phases caractéristiques de la mitose, on proposera aux élèves de se reporter au schéma bilan page 23 (ou de sa version animée sur le manuel numérique). Il est également possible de faire constater la généralisation de ce phénomène aux cellules animales en utilisant l'exercice 7 page 27.

L'étude du fuseau de division n'est pas au programme : cependant, si l'on juge nécessaire ou opportun de l'envisager simplement, on pourra utiliser l'exercice 6 page 26.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Les cellules en mitose sont celles dont les chromosomes sont visibles (ADN condensé, voir activités pratiques 1). Ce sont donc les trois cellules du centre de la plus grande image (diagonale du bas à gauche vers le haut à droite), ainsi que celles des images **b**, **d**, **e** et **f**.

Dans les cellules en interphase, le noyau est bien délimité et coloré mais les chromosomes ne sont pas visibles car l'ADN n'est pas condensé : ce sont les six cellules du haut de la grande photographie et les deux photographies **a** et **c**.

**Doc. 1 :** L'ordre chronologique est : **c / f / e / b / d / a**.

- **c** : Cellule dont l'enveloppe nucléaire est présente, sans chromosome visible (interphase).
- **f** : Les chromosomes sont visibles dans le noyau, dont l'enveloppe tend à disparaître.
- **e** : Les chromosomes sont alignés à l'équateur de la cellule (les fibres composant le fuseau de division sont visibles).
- **b** : Les chromosomes s'écartent de l'équateur et se partagent en deux lots, l'un se dirigeant vers la gauche et l'autre vers la droite de la photo.
- **d** : Deux lots de chromosomes sont constitués à chacun des pôles de la cellule.
- **a** : Une cloison transversale est apparue, séparant la cellule-mère en deux cellules-filles contenant chacune un des lots de chromosomes formés à l'étape précédente.

**Doc. 1 et 2 :** Voir le bilan et le schéma bilan des pages 20 à 23, notamment pour nommer les différentes phases de la mitose.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Au cours de la division cellulaire, l'ADN se condense et les chromosomes s'individualisent. Les chromosomes se placent ensuite dans un même plan (« équateur de la cellule »). Puis, chaque chromosome se clive longitudinalement de telle sorte que les deux chromatides de chaque chromosome migrent chacune vers un pôle de la cellule. Enfin, le cytoplasme se sépare pour constituer les deux cellules et l'ADN se décondense dans chacun des deux noyaux. Ainsi, chaque cellule hérite du même bagage chromosomique (même nombre et mêmes types de chromosomes) : le caryotype initial est conservé.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas** : vidéo (montage de microphotographies) « La mitose ».
- **Observer des chromosomes au microscope optique** (Les SVT au lycée – Jean-Jacques Auclair) : <http://jean-jacques.auclair.pagesperso-orange.fr/travaux/chromo/chromo1.htm>

## Le mécanisme de la réPLICATION de l'ADN (p. 16-17)

Connaissances	Capacités et attitudes
Au cours de la phase S, l'ADN subit la réPLICATION semi-conservative. En absence d'erreur, ce phénomène préserve, par copie conforme, la séquence des nucléotides.	Mettre en oeuvre une méthode (démarche historique) et/ou une utilisation de logiciels et/ou une pratique documentaire permettant de comprendre le mécanisme de réPLICATION semi-conservative.

### 1. Les intentions pédagogiques

Le « partage » des chromosomes constaté lors de l'activité précédente pose le problème de l'obtention de chromosomes « doubles », à deux chromatides, à partir de chromosomes « simples », à une chromatide, préalable indispensable à la réalisation de la mitose.

Rappelons qu'à ce stade, les élèves savent que chaque chromatide contient une molécule d'ADN : la problématique n'est donc pas de découvrir la duplication de l'ADN mais de comprendre comment cette duplication du matériel génétique est assurée.

La démarche proposée dans cette activité est en grande partie historique : le mécanisme de la réPLICATION imaginé par Watson et Crick dès 1953 est présenté schématiquement dans le **document 1**, et sa validation ultérieure par l'expérience de Taylor constitue le document 3.

En effet, comme on peut le constater dans la célèbre publication de Watson et Crick concernant la structure de l'ADN (voir ci-dessous « Ressources complémentaires »), c'est bien la découverte de la structure de l'ADN qui a immédiatement suggéré une hypothèse concernant le mécanisme de réPLICATION semi-conservatif. Celui-ci est présenté dans une version simplifiée (les fragments d'Okazaki ne sont pas mentionnés), conformément aux instructions du programme. Dans ce mécanisme, les deux brins d'ADN sont copiés simultanément sous l'action de l'ADN-polymérase. De plus, on en est ici au stade d'un principe proposé comme hypothèse : l'important est de faire comprendre que chaque brin de la molécule initiale sert de matrice pour la constitution d'un brin néoformé.

Le **document 2** apporte des compléments tangibles, confortant la réalité de ce phénomène. On présente d'abord la figure classique de l'œil de réPLICATION, avec un détail d'une des fourches de réPLICATION permettant de comprendre le mode d'action de l'ADN-polymérase. Une activité expérimentale de modélisation moléculaire est réalisable, afin de montrer le complexe enzymatique de réPLICATION en action.

Le **document 3** revient sur les aspects historiques : il s'agit d'expliquer aux élèves comment on a pu prouver la réalité du mécanisme hypothétique imaginé par Watson et Crick. Les expériences de Taylor (réalisées en 1957 sur des plantes comme *Vicia faba* et *Bellevalia romana*, donc des organismes eucaryotes) sont quasiment contemporaines de celles réalisées par Meselson et Stahl en 1958 sur des procaryotes. Le document expose l'une des expériences de Taylor mais, si l'on préfère, il est tout à fait possible d'utiliser l'expérience de Meselson et Stahl qui figure en exercice page 28.

L'expérience de Taylor est complexe : elle ne peut être comprise d'élèves de Première que si l'on a déjà établi l'hypothèse du mécanisme semi-conservatif. Elle nécessite une étude approfondie des conditions expérimentales et la réalisation de schémas des différents stades.

Au préalable, il faut avoir bien compris :

- qu'une chromatide correspond à une molécule d'ADN ;
- qu'une molécule d'ADN est formée de deux brins complémentaires.

Le vocabulaire doit être bien maîtrisé (ne pas confondre brin d'une molécule d'ADN et chromatide).

Ainsi, la mise en relation des conditions expérimentales avec les connaissances sur la constitution des chromosomes (activité 1) et les autoradiographies historiques de Taylor abouti à la validation du mécanisme de la réPLICATION tel qu'il est présenté dans le document 1 :

- Après un cycle cellulaire sur milieu « froid », chaque chromatide (donc chaque molécule d'ADN) d'un chromosome double est constituée d'un brin ancien ayant incorporé T radioactif et d'un brin néoformé ne contenant pas de T radioactif. De ce fait la radioactivité est détectable dans les deux chromatides (bien comprendre qu'il suffit que l'un seulement des brins d'une molécule d'ADN soit radioactif pour que la chromatide impressionne l'émulsion photographique).
- Après deux cycles cellulaires et donc deux réPLICATIONS sur milieu « froid », chaque chromosome double sera constitué d'une molécule d'ADN formée de deux brins non radioactifs et d'une molécule d'ADN possédant un brin radioactif et l'autre non.

Ceci est parfaitement conforme au mécanisme semi-conservatif proposé dans le document 1.

Pour aller plus loin, il est alors possible d'expliquer le mécanisme mis en œuvre dans la polymérisation en chaîne de l'ADN (PCR) : voir « Des clés pour... », page 24, et le diaporama sur la PCR proposé en ressources complémentaires dans le manuel numérique Bordas.

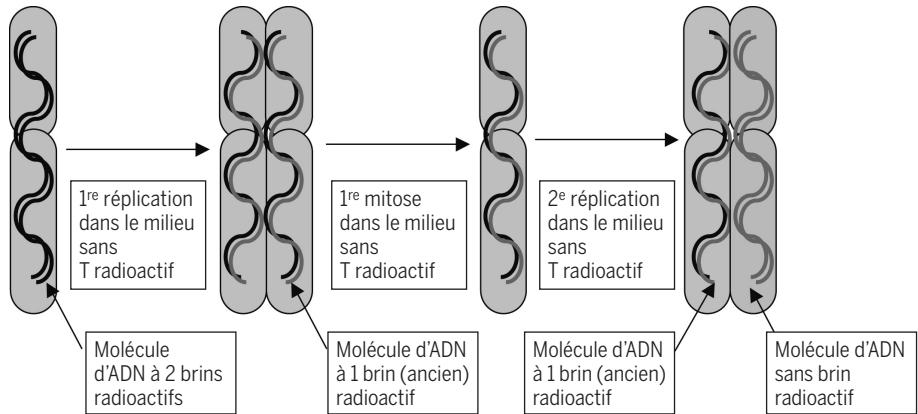
## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Le mécanisme de la réPLICATION est dit semi-conservatif car dans chacune des molécules-filles d'ADN obtenues on retrouve un brin provenant de la molécule-mère de départ et un brin nouvellement synthétisé. Seul l'un des deux brins est nouvellement formé, par complémentarité des nucléotides avec l'ancien brin, ce dernier étant donc « conservé ».

**Doc. 2 :** L'étude d'un modèle d'ADN-polymérase en action permet de distinguer le complexe enzymatique de réPLICATION, la molécule d'ADN initiale avec ses deux brins, le brin d'ADN néoformé.

**Doc. 1 et 3 :** Voir schémas page suivante.



### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La molécule d'ADN est répliquée à l'identique par un mécanisme semi-conservatif, basé sur la complémentarité des nucléotides : chaque brin de la molécule d'ADN initiale sert de matrice pour la synthèse d'un deuxième brin complémentaire.

### 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas :** Animation « La réplication de l'ADN ».
- **Manuel numérique Bordas :** Fiche documentaire « Biographie de Watson et Crick ».
- **Site ressources Bordas :** Modèle moléculaire (fichier « pdb ») de l'ADN-polymérase.
- **Manuel numérique Bordas :** Diaporama « L'amplification en chaîne par polymérase ou PCR ».
- **A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid :** “Nature” n° 171 (1953)  
<http://www.nature.com/nature/dna50/watsoncrick.pdf>

## Les étapes du cycle cellulaire (p. 18-19)

Connaissances	Capacités et attitudes
Au cours de la phase S, l'ADN subit la réPLICATION semi-conservative. Les deux cellules-filles provenant par mitose d'une cellule-mère possèdent la même information génétique.	Recenser, extraire et exploiter des informations permettant de caractériser le cycle cellulaire et ses phases.

### 1. Les intentions pédagogiques

Cette dernière activité du chapitre propose une synthèse qui permet de caractériser plus précisément les différentes phases du cycle cellulaire. Mais surtout, il paraît indispensable de bien montrer la complémentarité des phénomènes étudiés au cours des activités précédentes : on montre ainsi que l'interphase prépare la mitose et que l'ensemble de ces deux phénomènes constitue un cycle. La problématique du nécessaire contrôle d'un tel cycle sera posée, préparant ainsi l'étude des causes du cancer, envisagée dans la dernière partie du programme.

Le **document 1** permet de montrer le partage du matériel génétique au cours de la mitose en faisant appel à des informations issues de l'activité 1 (coloration de l'ADN dans le noyau d'une cellule en interphase), de l'activité 2 (déroulement de la mitose, partage des chromosomes) et de l'activité 3 (utilisation de précurseurs radioactifs de l'ADN, comme dans l'expérience de Taylor). La répartition de la radioactivité de la cellule-mère entre les deux cellules-filles illustre clairement le partage mis en évidence dans l'activité 2.

Le **document 2** permet de revenir sur la réPLICATION de l'ADN en précisant ses conséquences sur la quantité d'ADN dans les cellules. L'existence d'une phase de réPLICATION implique qu'à un instant t, il existe simultanément :

- des cellules contenant une quantité « simple » d'ADN, pour lesquelles la réPLICATION n'a pas encore débuté ;
- d'autres cellules possédant une quantité « double » dans lesquelles la réPLICATION est achevée ;
- et enfin des cellules possédant une quantité intermédiaire, pour lesquelles la réPLICATION est en cours.

C'est ce que montre ce graphique, obtenu par traitement de mesures de cytométrie en flux avec le logiciel WINMDI (voir « ressources complémentaires » ci-dessous). Il est d'ailleurs possible de réaliser une étude plus approfondie de façon à montrer comment on peut, à partir du dénombrement de cellules ayant incorporé un précurseur, évaluer la durée des phases du cycle cellulaire.

Ce graphique est à mettre en relation avec le **document 3**, graphique classique de la quantité d'ADN en fonction du temps, afin d'y repérer les différentes périodes correspondant aux trois types de cellules précités.

Le graphique du document 3 permet aussi de situer la mitose par rapport à la réPLICATION, et de constater leur alternance, aboutissant à la notion de cycle cellulaire.

Les documents 2 et 3 sont aussi à rapprocher du **document 4**, qui présente le cycle cellulaire avec ses différentes phases. On peut alors associer les différentes phases du

cycle (G<sub>1</sub> / S / G<sub>2</sub> / mitose) aux périodes A, B, C, D du graphique du document 3. Les durées des différentes phases pourront également être reliées aux données de cytométrie en flux pour constater leur cohérence.

Enfin, l'existence de « points de contrôle » est mentionnée, introduisant ainsi l'idée que le déroulement du cycle cellulaire n'est pas automatique, qu'il est régulé. Cette notion n'est pas à détailler mais elle est importante pour envisager dans la dernière partie du programme (chapitre 3, activités 4 et 5 p. 286-289) le processus de cancérisation.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** L'expérience du document 1 confirme le partage du matériel génétique de la cellule-mère entre les deux cellules-filles. En effet, la cellule de la photo a présente un ADN totalement radioactif (après culture sur milieu radioactif pendant plusieurs cycles cellulaires) ce qui aboutit à un grand nombre de taches noires. Comme la culture se poursuit sur milieu non radioactif, les nouveaux nucléotides incorporés lors de la réPLICATION ne sont pas radioactifs. Les taches noires visibles sur l'autoradiographie proviennent donc bien de l'ADN de la cellule-mère, et l'on constate qu'elles sont moins nombreuses, et en quantité équivalente dans les deux cellules. Elles ont donc hérité chacune d'une moitié de l'ADN de la cellule-mère.

**Doc. 2 et 3 :** On note sur le graphique obtenu par cytométrie en flux qu'une majorité des cellules contient une quantité d'ADN de 2 UA. Un autre pic, moins important, est observé pour 4 UA, et un nombre plus faible de cellules contient une quantité d'ADN intermédiaire.

Les cellules ayant une quantité simple d'ADN (2UA) sont celles qui sont en phase A sur le graphique du document 3. Comme cette phase est la plus longue, il est logique qu'à un instant t, on dénombre plus de cellules dans cet état.

Les cellules dont la quantité d'ADN varie entre 2 et 4 UA sont les cellules correspondant à la phase B, au cours de laquelle l'ADN est répliqué.

Enfin, les cellules qui ont une quantité double d'ADN (4 UA) sont celles qui ont terminé la réPLICATION, mais pas encore subi la mitose : elles correspondent à la phase C. Elles sont moins nombreuses car cette phase est plus courte.

**Doc. 3 et 4 :** On parle de cycle cellulaire car à l'issue d'une interphase suivie d'une mitose, on obtient deux cellules-filles qui sont dans le même état que la cellule-mère initiale. Le phénomène peut ainsi se répéter : à une interphase (comprenant les phases G<sub>1</sub>, S puis G<sub>2</sub>) succède une mitose, suivie d'une interphase, etc.

**Doc. 1 à 4 :** Le document 1 correspond à la mitose.

Dans le document 2, les cellules les plus nombreuses (1<sup>er</sup> pic) sont en phase G<sub>1</sub>, le second pic correspond aux cellules en phase G<sub>2</sub>, et les cellules ayant une quantité d'ADN intermédiaire sont en phase S.

Dans le document 3, la période A correspond à la phase G<sub>1</sub>, la période B correspond à la phase S, la période C à la phase G<sub>2</sub> et la période D correspond à la mitose.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les principales étapes d'un cycle cellulaire sont l'interphase et la mitose. L'interphase est découpée en une phase G<sub>1</sub> de durée très variable, une phase S pendant laquelle l'ADN est répliqué et une phase G<sub>2</sub> qui précède la mitose.

### 3. Ressources complémentaires

- **Étude du cycle cellulaire** – Exploitation de données de cytométrie en flux avec le logiciel WinMdi (Les SVT au lycée – Jean-Jacques Auclair) :  
<http://jean-jacques.auclair.pagesperso-orange.fr/cycle%20cellulaire/winmdi.htm>
- **Suivi de la quantité d'ADN au cours d'un cycle cellulaire par cytofluorométrie** (ACCES- INRP) :  
<http://acces.inrp.fr/acces/logiciels/externes/winmdi/winmdi-et-cycle-cellulaire/accycle.htm>

La correction des exercices « **Tester ses connaissances** » figure dans le manuel de l’élève, p. 350.

## 6 Une substance anticancéreuse

- a. Faux. Au contraire cette substance empêche le déroulement de la mitose.
- b. Faux. Le taxol ne détruit pas les cellules.
- c. Vrai. En stoppant la mitose, le taxol s’oppose à la multiplication cellulaire.
- d. Vrai. En empêchant la rétraction des fibres du fuseau, le taxol rend l’anaphase impossible. La mitose est donc bloquée en métaphase.

## 7 Le déroulement de la mitose d’une cellule animale

1.
  - d. Interphase
  - b. Prophase
  - a. Métaphase
  - e. Anaphase
  - f. Télophase
2. Se reporter au schéma bilan page 23.
3.
  - d. Interphase :** Étape pendant laquelle les chromosomes sont décondensés et pendant laquelle se déroule la réPLICATION de l’ADN.
  - b. Prophase :** Condensation de l’ADN pour former des chromosomes bien individualisés.
  - a. Métaphase :** Regroupement des chromosomes dans le plan équatorial de la cellule.
  - e. Anaphase :** Migration des deux lots de chromatides vers chacun des deux pôles de la cellule.
  - f. Télophase :** Séparation des deux cellules-filles, reformation du noyau avec décondensation des chromosomes.

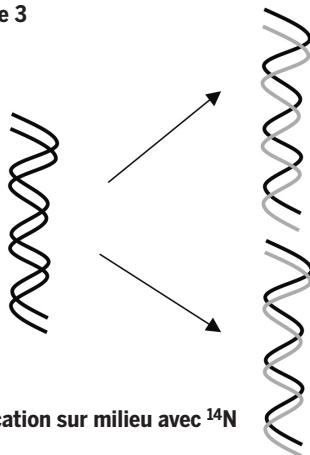
## 8 Un antibiotique en action

L’étude du modèle moléculaire montre que la quinone vient se loger sur la gyrase précisément dans le site destiné à fixer et dérouler l’ADN. On peut donc penser que la quinone empêche ainsi la gyrase d’effectuer son action. De ce fait, l’ADN ne peut être localement déroulé et ne pourra être répliqué. La cellule ne pourra donc pas se diviser en deux cellules contenant chacune une copie de l’information génétique. Comme la gyrase est spécifique des bactéries, c’est une substance qui bloque la multiplication bactérienne.

## 9 L’expérience de Meselson et Stahl

1. Si l’on admet le modèle de réPLICATION semi-conservative :
  - dans **le tube 3**, toutes les molécules d’ADN comportent un brin d’ADN avec  $^{15}\text{N}$  et un brin d’ADN avec  $^{14}\text{N}$ . Toutes les molécules d’ADN ont donc la même densité, intermédiaire entre celle des molécules d’ADN avec  $^{15}\text{N}$  et celles des molécules d’ADN avec  $^{14}\text{N}$ .

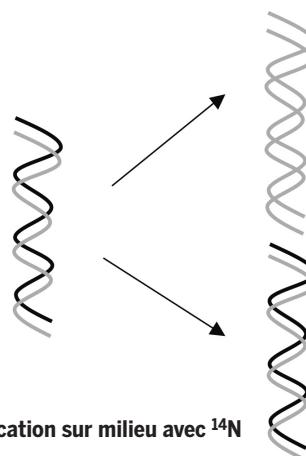
**Tube 3**



**Duplication sur milieu avec  $^{14}\text{N}$**

- dans le **tube 4**, la moitié des molécules d'ADN comportent un brin d'ADN avec  $^{15}\text{N}$  et un brin d'ADN avec  $^{14}\text{N}$ , l'autre moitié comporte des molécules d'ADN comportant que des brins avec  $^{14}\text{N}$ .

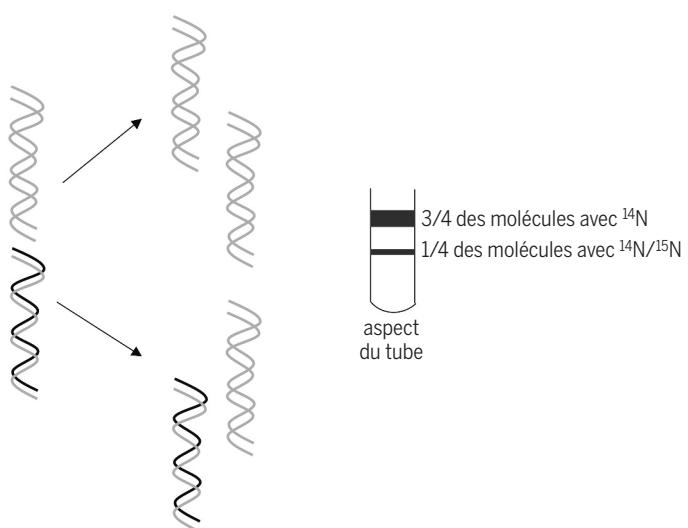
**Tube 4**



**2<sup>e</sup> duplication sur milieu avec  $^{14}\text{N}$**

Les résultats obtenus sont donc parfaitement en accord avec le modèle de réPLICATION semi-conservative de l'ADN.

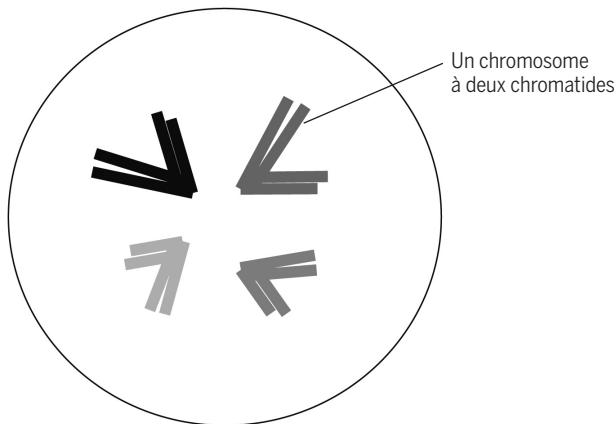
2.



## 10 La mitose vue sous un angle inhabituel

1. Cette phase est la métaphase car les chromosomes sont tous regroupés dans un même plan.

2.



Métagamme de la mitose (vue polaire)

## 11 L'observation de chromosomes particuliers

Les chromosomes polyténiques sont au moins 10 fois plus gros que les chromosomes habituellement observés.

# Variabilité génétique et mutation de l'ADN

## Activités pratiques

1

### L'origine d'une variabilité de l'ADN (p. 32-33)

Connaissances	Capacités et attitudes
Pendant la réPLICATION de l'ADN surviennent des erreurs SPONTANÉES et rares, dont la fréquence est augmentée par l'action d'AGENTS MUTAGÈNES. L'ADN peut être aussi endommagé en dehors de la réPLICATION.	RECENSER, exploiter et interpréter des bases de données pour mettre en évidence l'influence d'agents mutagènes sur des populations humaines (UV, benzène, etc.).

#### 1. Les intentions pédagogiques

L'existence d'une variabilité de l'ADN est un fait qui a déjà été établi en classe de seconde. Le premier objectif de cette activité est donc très précis : en s'appuyant notamment sur les connaissances du chapitre 1 de la partie 1, il s'agit avant tout d'expliquer une origine possible à cette variabilité de l'ADN. Puisque les élèves ont vu que l'ADN était intégralement répliqué au cours de l'interphase, on comprend aisément qu'une erreur d'appariement puisse survenir de temps en temps au cours de la réPLICATION (aucun système de copie n'est infaillible). La question de la fréquence de ces erreurs se pose alors. Le **document 1** explique clairement que des erreurs spontanées peuvent surve nir au cours de la réPLICATION de l'ADN, même si leur fréquence est faible. L'influence d'agents mutagènes comme le benzène, qui augmentent la fréquence de ces erreurs d'appariement, sera facilement comprise à l'aide du modèle moléculaire présenté ici.

Le pictogramme qui figure à côté du texte associé à ce document pourra être utilisé pour sensibiliser les élèves aux questions de sécurité au laboratoire : des produits comme le benzène doivent être clairement étiquetés et leur utilisation est soumise à des règles très précises. À noter que l'étiquetage des produits chimiques évolue : le pictogramme présenté ici est celui qui doit désormais être utilisé pour désigner des produits dangereux pour la santé (produits cancérogènes, mutagènes, toxiques pour les organes, la reproduction, etc.).

Le règlement CLP, *Classification, Labelling and Packaging*, définissant de nouvelles règles européennes de classification, d'étiquetage et d'emballage des produits chimiques, est entré en vigueur le 20 janvier 2009.

À ce stade de l'étude, on évitera autant que possible d'utiliser le terme de « mutation » (il sera cependant difficile de l'éviter totalement) : en effet, il s'agit ici de déterminer quels sont les mécanismes à l'origine d'une variabilité de l'ADN. Cependant, comme on le verra dans l'activité suivante, ces erreurs sont souvent réparées : il est donc préférable de réserver le terme de mutation aux erreurs qui ne seront pas réparées, donc inscrites durablement dans le programme génétique cellulaire, et qui pourront, par conséquent, être transmises aux cellules-filles.

Le **document 2** présente les effets des rayonnements, principaux agents mutagènes auxquels sont soumises les populations humaines. Les dangers associés aux rayons X pourront être rapprochés du document (photographie du haut), page 30 (« pour s'interroger »).

L'examen du modèle moléculaire met en évidence un effet des UV : des liaisons covalentes se forment entre nucléotides adjacents, créant ainsi ce que l'on appelle des dimères. De tels dimères empêchent le bon fonctionnement de l'ADN-polymérase. Ce modèle moléculaire est disponible en vidéo sur le **manuel numérique Bordas** ; le fichier « pdb » est proposé en téléchargement sur le **site ressources**.

Le **document 3** propose différentes données permettant de faire une étude plus poussée mettant en évidence les dangers des rayonnements UV dans une des régions du globe terrestre les plus concernées, l'Australie. Un lien de cause à effet lien pourra être établi avec les problématiques liées à l'environnement (amincissement de la couche d'ozone).

L'exercice 6 page 46 pourra être utilisé en complément ainsi que les informations de la page « Des clés pour... aller plus loin » page 44, qui concernent, cette fois-ci, la France.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** La mutation de l'ADN est un phénomène rare car une erreur d'appariement au cours de la réPLICATION de l'ADN n'intervient qu'avec une fréquence très faible : seulement une erreur pour 10 millions de nucléotides répliqués. Cependant, étant donné le nombre de nucléotides dans l'ADN d'une cellule (6,4 milliards de paires de nucléotides), on comprend qu'après chaque réPLICATION, l'ADN d'une cellule comporte nécessairement plusieurs erreurs : la mutation de l'ADN est donc un phénomène très banal.

**Doc. 1 et 2 :** Les agents mutagènes ne provoquent pas directement une modification de la séquence des nucléotides de l'ADN. Ils modifient l'ADN de telle sorte que le fonctionnement de l'ADN-polymérase est perturbé : ainsi, ils augmentent la fréquence des erreurs au cours de la réPLICATION. Les agents mutagènes ont donc pour effet d'augmenter la fréquence des mutations.

**Doc. 3 :** En Australie, le nombre de cancers de la peau (mélanomes) est plus important que dans d'autres pays et ce nombre a augmenté au cours des dernières décennies. Or, comme l'indique la carte, l'Australie se caractérise par une forte intensité du rayonnement ultraviolet parvenant au sol (du fait notamment de l'amincissement de la couche d'ozone). On peut donc penser que cette forte exposition aux UV provoque une augmentation de la fréquence des mutations de l'ADN des mélanocytes, cause de l'augmentation des cas de cancers de la peau.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les mutations sont dues à des erreurs se produisant spontanément au cours de la réPLICATION de l'ADN. Des altérations de la molécule d'ADN peuvent aussi se produire en dehors des périodes de réPLICATION. Un agent mutagène est un agent (substances chimiques comme le benzène, rayons UV, etc.) dont l'action augmente la fréquence des mutations.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas** : vidéo de l'ADN altéré par les UV.
- **Site ressources Bordas** : fichier « pdb » d'une molécule d'ADN altérée par les UV.
- **Dossier de l'INRS (nouvel étiquetage des produits chimiques)** :  
[http://www.inrs.fr/htm/frame\\_constr.html?frame=/INRS-PUB/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/A%20735/%24File/Visu.html](http://www.inrs.fr/htm/frame_constr.html?frame=/INRS-PUB/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/A%20735/%24File/Visu.html)
- **Sécurité Solaire** :  
<http://www.soleil.info/la-securite-solaire/espace-presse/banque-images/index-uv1.html>
- **Australian Bureau of Meteorology (index UV)** : <http://www.bom.gov.au/uv/index.shtml>
- **Météo France (index UV)** :  
[http://france.meteofrance.com/france/meteo?PREVISIONS\\_PORTLET.path=previsionsuv](http://france.meteofrance.com/france/meteo?PREVISIONS_PORTLET.path=previsionsuv)

## L'influence d'une irradiation par les UV (p. 34-35)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>Pendant la réPLICATION de l'ADN surviennent des erreurs SPONTANÉES et rares, dont la fréquence est augmentée par l'action d'agents mutagènes. L'ADN peut aussi être ENDOMMAGÉ en dehors de la réPLICATION.</p> <p>Le plus souvent l'erreur est réPARÉE par des systèmes ENZYMATIQUES. Quand elle ne l'est pas, si les modifications N'EMPÈCHENT PAS la survie de la cellule, il apparaît une MUTATION, qui sera TRANSMISE si la cellule se divise.</p>	Concevoir et réaliser un protocole pour analyser l'influence de l'irradiation d'une culture de levures par des UV (suivi du taux de mortalité).

### 1. Les intentions pédagogiques

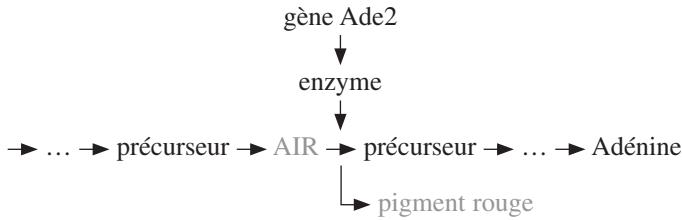
Cette activité reprend dans les grandes lignes ce qui était déjà pratiqué auparavant en classe de Seconde (ancien programme). Cependant, l'objectif est double : en effet, on pourra mettre en évidence d'une part l'effet mutagène, d'autre part l'effet létal d'une exposition de culture de levures au rayonnement ultraviolet.

Le **document 1** permet de distinguer clairement deux souches de levures de la même espèce (*Saccharomyces cerevisiae*) : le déterminisme génétique de la couleur prise par les colonies de levures pourra être simplement déduit du fait que cette couleur se transmet au cours des divisions cellulaires lorsque les levures des deux souches sont mises en culture. Ce constat n'est cependant qu'une approximation très grossière. Il sera néanmoins suffisant pour mener à bien cette activité.

À ce stade, il apparaît donc totalement inutile d'entrer dans les détails de la voie de biosynthèse responsable de cette coloration et des gènes qui la gouvernent, d'autant que les mécanismes biochimiques en cause peuvent être complexes et interagissent avec le milieu (dioxygène et température notamment). Il serait vain de vouloir donner plus d'explications car les élèves n'ont pas encore les connaissances concernant les relations génotype/phénotype permettant une compréhension plus précise des mécanismes en cause.

Pour le professeur, il peut cependant être utile de disposer des informations suivantes afin d'optimiser les conditions de réussite de cette activité.

- Les levures normales sont de couleur blanche.
- Les levures mutantes sont de couleur rouge car elles portent une version mutée du gène Ade2 (en toute rigueur, on devrait donc les noter Ade2<sup>-</sup> mais par commodité, elles sont le plus souvent dénommées Ade2). Or, ce gène code pour une enzyme de la chaîne de biosynthèse de l'adénine. Si le milieu est carencé en adénine, les levures engagent la chaîne des réactions biochimiques qui devraient normalement permettre la biosynthèse de l'adénine mais dans ce cas, celle-ci est stoppée. En effet, du fait de la mutation du gène Ade2, le composé intermédiaire Amino Imidazole Ribotide (noté « AIR ») n'est plus transformé, il s'accumule et s'oxyde en pigment rouge (à noter que ce pigment étant toxique, les colonies de levures rouges sont parfois plus petites) :



- L'exposition aux UV de levures Ade2 augmente la fréquence de mutations qui rétablissent le phénotype blanc. Il peut s'agir de véritables mutations réverses qui rétablissent le fonctionnement normal du gène Ade2, mais il peut aussi s'agir de diverses mutations affectant d'autres gènes codant pour les enzymes de la chaîne de biosynthèse de l'adénine (pas de formation d'Amino Imidazole Ribotide) ou encore de mutations affectant les gènes de la chaîne d'oxydations respiratoires (pas d'oxydation de l'Amino Imidazole Ribotide en pigment rouge).

- À noter :

- Les levures Ade2 ne poussent pas si le milieu est totalement carencé en adénine. Si le milieu est riche en adénine, elles n'engagent pas la chaîne de biosynthèse de l'adénine et prennent alors une couleur blanche. Elles ne prennent une couleur rouge que lorsque le milieu ne couvre pas tous les besoins nécessaires en adénine.
- L'apparition de la couleur rouge du pigment nécessite un délai (4-5 jours), une température optimale (28 à 30 °C) et la présence de dioxygène (ne pas utiliser de parafilm). De plus, le pigment rouge est dégradé et commence à disparaître au bout d'une dizaine de jours environ.

Le manuel propose les grandes lignes d'un protocole expérimental. Il sera possible d'associer les élèves à sa conception. Cependant, cette manipulation nécessite le respect très strict de certaines précautions. Le **manuel numérique Bordas** propose un diaporama précis et complet qui permet aux élèves de réaliser cette activité en toute autonomie et sécurité.

On trouvera, à la page 49, un exercice d'évaluation des capacités expérimentales ici mises en œuvre, exercice qui complète cette activité en montrant l'efficacité de protections solaires (lunettes et crème) sur des levures sensibles aux UV.

Le **document 2** présente quelques résultats avec trois photographies de qualité, directement exploitables (possibilité de dénombrement) : il peut donc servir de document de substitution si les résultats obtenus par les élèves ne s'avèrent pas satisfaisants. Deux possibilités d'exploitation et de présentation des résultats sont suggérées (tableau et graphe).

L'étude comparée des séquences génétiques des deux souches de levures est présentée dans l'activité pratique 3 (document 2 page 37). Elle pourra donc être réalisée pour compléter cette approche expérimentale.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** On constate que les levures blanches étalées sur la première boîte de Petri ont donné des colonies de couleur blanche. De même, les levures rouges étalées sur la deuxième boîte de Petri ont donné des colonies de couleur rouge. En effet, chaque levure déposée sur le milieu de culture a formé par divisions cellulaires successives un clone cellulaire correspondant à une colonie. La conservation de la couleur initiale montre que la division cellulaire est une reproduction conforme, transmettant les caractéristiques génétiques de la cellule-mère (ici la couleur) aux cellules-filles.

**Doc. 2 :** On constate, dans tous les cas, que des colonies de levures se sont formées mais que des colonies blanches sont apparues. Plus le temps d'exposition est élevé, moins il y a de colonies au total, mais la proportion de colonies blanches est plus importante.

**Doc. 3 :** L'apparition de colonies blanches s'explique par une mutation de l'information génétique des colonies rouges. Le graphique montre que le pourcentage de colonies blanches augmente en fonction du temps d'exposition aux UV.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'irradiation de la culture de levures rouges par les UV produit deux effets :

- une diminution du nombre global de colonies, c'est l'effet létal, des levures ont été tuées par l'exposition aux UV ;
- une augmentation de la fréquence de colonies de levures mutantes blanches, c'est l'effet mutagène.

## 3. Ressources complémentaires

■ **Kit mutagenèse Sordalab (Souche Ade2 et milieu de culture) :**  
<http://www.sordalab.com/catalogue/produit.php?numprod=451>

■ **Manuel numérique Bordas :** diaporama présentant le protocole expérimental précis permettant aux élèves de réaliser l'expérience de façon autonome.

## Réparation de l'ADN et mutations (p. 36-37)

Connaissances	Capacités et attitudes
Le plus souvent l'erreur est réparée par des systèmes enzymatiques. Quand elle ne l'est pas, si les modifications n'empêchent pas la survie de la cellule, il apparaît une mutation, qui sera transmise si la cellule se divise.	Utiliser des logiciels pour caractériser des mutations.

### 1. Les intentions pédagogiques

Cette activité introduit une nouveauté par rapport à ce qui était couramment enseigné en lycée : en effet, on ne peut passer sous silence l'existence d'un contrôle et d'une réparation de l'ADN. En fait, il n'y a véritablement mutation que lorsqu'une erreur échappe aux systèmes de réparation de l'ADN. Ceci explique que la fréquence réelle des mutations est largement inférieure à la fréquence des erreurs de réPLICATION.

Le **document 1** présente simplement le principe de ce contrôle et de cette réparation de l'ADN. En fait, il existe de multiples systèmes enzymatiques : leur étude détaillée et systématique ne relève évidemment pas du programme de Première. L'étude d'un modèle moléculaire peut néanmoins s'avérer judicieuse de façon à montrer concrètement que des enzymes sont susceptibles de se lier à l'ADN pour le réparer. Il s'agit ici d'une photolyase réparant un dimère de thymine : cet exemple a été choisi de façon à poursuivre l'étude de l'altération de l'ADN par les UV amorcée au cours des activités précédentes. Le **manuel numérique Bordas** propose une séquence vidéo de ce même modèle. Le fichier « pdb », utilisable avec un logiciel de visualisation moléculaire, est téléchargeable sur le [site ressources Bordas](#).

Un schéma présente, de façon volontairement simplifiée, les étapes de ce contrôle et de cette réparation. Là également, le **manuel numérique** en propose une version animée. Enfin, il convient de s'interroger sur le devenir d'une erreur non réparée en envisageant ce qui résulte de la réPLICATION suivante : on constate alors que le brin d'ADN possédant l'erreur conduira à la formation d'une molécule d'ADN possédant une paire de nucléotides différent de la séquence initiale. On obtient ainsi une mutation ponctuelle, inscrite dans le patrimoine génétique d'une cellule et donc transmissible aux cellules-filles (ce sera l'objet de l'activité pratique 4).

Le **document 2** propose une autre approche consistant à repérer l'existence de mutations par comparaison de séquences nucléotidiques : cette étude, menée avec un logiciel de traitement de séquences nucléotidiques (Anagène ou GénieGen), permet de caractériser les trois principaux types de mutations ponctuelles présentées par le **document 3**. À noter que l'un des exemples permet de prolonger l'étude menée chez les levures en comparant deux versions du gène Ade2.

Les séquences nucléotidiques utilisées ici sont disponibles en téléchargement sur le [site ressources Bordas](#).

### 2. Les pistes d'exploitation

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Il est primordial que les cellules possèdent des systèmes efficaces de réparation de l'ADN de façon à corriger les erreurs inévitablement commises au cours de la réPLICATION

de l'ADN ou encore les diverses altérations de l'ADN. En effet, sans ces systèmes, la fréquence des mutations serait beaucoup plus élevée et leurs conséquences, néfastes pour les cellules (effet létal, effet mutagène), seraient beaucoup plus importantes.

**Doc. 1 :** Il y a véritablement mutation de l'ADN lorsqu'une altération de l'ADN échappe aux systèmes enzymatiques de contrôle et de réparation de l'ADN.

**Doc. 2 :** Les logiciels de traitement de séquence comportent une fonction de comparaison mettant en évidence les différences entre les séquences nucléotidiques.

Ainsi, il apparaît que les deux séquences du gène Ade2 de la levure diffèrent au niveau du nucléotide 103.

Pour les allèles du gène de la globine-bêta :

- la séquence de l'allèle bêta-S montre une différence avec la séquence de l'allèle bêta-A au niveau du nucléotide 20 ;
- la séquence de l'allèle bêta-Th1 montre un décalage avec la séquence de l'allèle bêta-A à partir du nucléotide 20 ;
- la séquence de l'allèle bêta-Th2 montre un décalage avec la séquence de l'allèle bêta-A à partir du nucléotide 28.

**Doc. 2 et 3 :** La différence entre les deux allèles du gène Ade2 de la levure est une mutation par substitution (substitution de G en T en position 103). Il en est de même pour la différence entre les allèles bêta-S et bêta-A du gène de la globine-bêta (substitution du nucléotide A en T en position 20). L'allèle bêta-Th1 résulte d'une mutation par délétion du nucléotide A en position 20. L'allèle bêta-Th2 résulte d'une mutation par addition d'un nucléotide C en position 28.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'ADN est réparé grâce à des enzymes qui vérifient les erreurs commises au cours de la réPLICATION, remplacent les nucléotides mal appariés ou réparent les lésions de l'ADN. Néanmoins, certaines erreurs échappent aux systèmes de réparation et constituent des mutations : ainsi, dans une séquence d'ADN, il peut y avoir substitution, délétion ou addition d'une paire de nucléotides.

## 3. Ressources complémentaires

### ■ Manuel numérique Bordas :

- vidéo du modèle moléculaire d'une photolyase réparant un dimère de thymine ;
- animation illustrant le principe du contrôle et de la réparation de l'ADN par un système enzymatique ;
- fiche documentaire « La maladie de Huntington : une enzyme de réparation de l'ADN en cause ».

### ■ Logiciel « Anagène » (SCEREN-CNDP/INRP) :

<http://www2.cndp.fr/lesScripts/bandeau/bandeau.asp?bas=http://www2.cndp.fr/svt/anagene/accueil.htm>

### ■ Logiciel « GenieGen » (Académie d'Amines) :

[http://pedagogie.ac-amiens.fr/svt/spip/rubrique.php3?id\\_rubrique=40](http://pedagogie.ac-amiens.fr/svt/spip/rubrique.php3?id_rubrique=40)

### ■ Site ressources Bordas :

fichiers téléchargeables du modèle moléculaire d'une photolyase, des séquences nucléotidiques du gène Ade2 chez la levure et de quatre allèles du gène de la globine-bêta humaine.

## Mutations et biodiversité (p. 38-39)

Connaissances	Capacités et attitudes
Une mutation survient soit dans une cellule somatique (elle est ensuite présente dans le clone issu de cette cellule) soit dans une cellule germinale (elle devient alors héréditaire). Les mutations sont la source aléatoire de la diversité des allèles, fondement de la biodiversité.	Recenser et exploiter des informations permettant de caractériser la diversité allélique d'une population.

### 1. Les intentions pédagogiques

À partir du moment où une erreur n'est pas réparée et qu'une mutation est inscrite dans le patrimoine génétique d'une cellule, il est logique de s'intéresser au devenir possible d'une mutation. Dans cette activité, l'objectif essentiel sera de faire comprendre que si une mutation peut avoir des conséquences très négatives pour un individu, le phénomène de mutation est essentiel comme générateur de la biodiversité allélique d'une espèce. En fait, le risque individuel associé au phénomène de mutation est le « prix à payer » pour l'existence d'une biodiversité génétique à l'échelle d'une population ou d'une espèce.

Une première distinction fondamentale à faire est celle qui existe entre mutation somatique et mutation germinale. Le **document 1** présente un exemple spectaculaire de mutation somatique : une cellule somatique mutée a été à l'origine d'un secteur mutant correspondant ici à la moitié de cette pomme. Certains seront peut-être dubitatifs devant cette photographie, (suspectant un maquillage « Photoshop » !). Son authenticité est pourtant avérée : cette pomme a été récoltée par M. Ken Morrish, un arboriculteur du Devon, en septembre 2009 (des informations complémentaires peuvent facilement être obtenues, voir par exemple ci-dessous un lien vers un article de la BBC).

De fait, l'existence de secteurs mutants affectant « géométriquement » une partie de l'organisme n'est pas rarissime chez les végétaux : à partir d'une cellule mutée, il se forme un clone de cellules mutées restant groupées, à proximité les unes des autres (par exemple un rameau, un pétalement ou un secteur de pétalement d'une fleur, une portion d'un fruit, etc.).

Il convient de bien préciser que les graines ne sont pas concernées : un simple rappel de l'organisation de la fleur vue au collège peut permettre de préciser l'origine différente des « pépins » (pollen et pistil) et du « fruit » (réceptacle de la fleur). Cette mutation n'est donc pas transmissible à la descendance et ne concerne que cette pomme.

Le **document 2** explique à quelles conditions une mutation peut être transmise à la descendance de l'individu. La condition est double : il faut d'une part que la mutation se produise dans une cellule du tissu germinal mais aussi que la cellule mutée soit effectivement à l'origine d'un nouvel individu, donc participe à la fécondation. Alors toutes les cellules du nouvel individu seront porteuses de la mutation. À noter que dans ce cas, l'individu chez qui la mutation s'est produite n'est en général pas concerné par les effets directs de la mutation.

L'intérêt du **document 3** est d'expliquer qu'une néomutation devient héréditaire. Apparue pour la première fois chez un individu, une mutation peut ensuite être transmise de

génération en génération. Bien noter que dans ce document, les deux séquences d'ADN représentées pour chaque individu ne sont pas les deux brins d'une molécule d'ADN mais les deux séquences des deux allèles situés sur les deux chromosomes homologues : un seul brin d'ADN est représenté pour chaque allèle. Le phénomène initial de néomutation n'a rien d'exceptionnel : dans le cas de la myopathie de Duchenne par exemple, on estime que l'anomalie génétique est due dans 30 % des cas à une néomutation (elle n'existe chez aucun des deux parents).

Le **document 4** présente l'intérêt de donner une estimation chiffrée. Ces informations ont été publiées dans l'article « *Origine du polymorphisme de l'ADN, revue INRA Productions Animales, 2000, hors-série Génétique moléculaire* » (voir lien ci-dessous). Pour l'homme, la « formule de calcul » prend en compte l'âge car les mitoses à partir des spermatogonies se produisent tout au long de la vie : le risque de mutations augmente donc avec l'âge. Il ne s'agit pas ici de comprendre dans le détail la façon dont ce calcul est effectué mais de faire simplement constater que finalement tout spermatozoïde, tout ovule, donc tout nouvel individu, est nécessairement porteur d'un certain nombre de mutations.

L'exemple présenté par le **document 5** illustre parfaitement la notion, difficile mais essentielle, à appréhender et qui est l'objectif principal de cette activité. Le choix de la diversité des allèles HLA est un bon exemple, d'une part car cette diversité est particulièrement importante, d'autre part parce qu'elle illustre bien l'unicité génétique des individus et donc la biodiversité génétique des populations.

Les différences de fréquence entre les différentes populations n'ont pas de véritable signification biologique : elles soulignent l'aspect aléatoire du phénomène de mutation.

Données chiffrées, graphiques ou cartes similaires à ceux publiés ici peuvent être obtenus en consultant la base de données « *The Allele Frequency Net Database* » (lien ci-dessous).

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Un organisme peut porter une mutation dans toutes ses cellules si cette mutation est présente dans la cellule-œuf. Elle a été apportée par l'un des gamètes et s'est donc produite dans une cellule germinale de l'un des parents, à l'origine du gamète ayant participé à la fécondation.

**Doc. 3 :** L'apparition du cas de cancer à la deuxième génération est due à une mutation affectant le gène P53, gène qui exerce normalement un rôle protecteur contre le cancer. Comme l'anomalie décelée chez cet individu n'existe pas chez ses deux parents, on peut affirmer qu'il s'agit d'une néomutation, apparue dans une cellule germinale de l'un des deux parents. Cette mutation devient alors transmissible (héritaire) : l'individu qui en a hérité l'a transmise à son fils.

**Doc. 3 et 4 :** De nouveaux allèles peuvent apparaître à partir d'un allèle préexistant qui subit une mutation dans une cellule germinale. La nouvelle version du gène pourra alors être transmise à la descendance de l'individu et devient héritaire, transmissible de génération en génération.

**Doc. 5 :** C'est en effet grâce au phénomène de mutation que de nouveaux allèles peuvent se constituer et ensuite se transmettre. Ainsi, dans une espèce, il existe souvent de nombreux allèles différents pour un même gène, comme ici pour les gènes HLA. C'est donc bien le phénomène de mutation qui est à l'origine de la biodiversité génétique des espèces.

## Synthèse : réponse au problème à résoudre

La diversité des allèles d'un gène, qui caractérise les différentes populations, provient des mutations qui peuvent affecter un gène initial, créant ainsi différentes versions de ce gène.

### 3. Ressources complémentaires

- Des informations complémentaires sur la curieuse pomme, présentée par le document 1 :  
[http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk\\_news/england/devon/8275419.stm](http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/england/devon/8275419.stm)
- L'origine des différentes parties d'une pomme :  
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Fruits/pomme.htm>
- L'origine du polymorphisme de l'ADN (INRA Prod. Anim., HS 2000, 37-43) :  
<http://www.inra.fr/productions-animaux/spip.php?article728&PHPSESSID=35ef5b88212de1fd0720d2f0ed965545>
- « *The Allele Frequency Net Database* » :  
<http://www.allelefrequencies.net/>

La correction des exercices 1 à 4 figure dans le manuel de l'élève, p. 350.

## 6 « Slip, Slop, Slap, Seek, Slide »

(dans la première impression du manuel, une faute de frappe figure dans le titre : le dernier mot est bien « Slide » et non « Side »).

**a.** Faux. Cette campagne de prévention s'adresse aussi aux adultes. Même si les jeunes enfants sont particulièrement vulnérables, les dangers des UV solaires concernent les personnes de tout âge.

**b.** Vrai.

**c.** Vrai.

**d.** Faux. Dans l'hémisphère Nord aussi, le rayonnement UV peut parfois être très intense. Il existe aussi des bulletins d'alerte aux UV en France par exemple.

## 5 Une mutation qui favorise les mutations

**1.** Les individus atteints de *Xeroderma pigmentosum* ont un risque très élevé de développer un cancer de la peau.

Ils sont plus sensibles à l'effet mutagène des UV : 24 h après une exposition aux UV, le nombre de dimères de thymine présents dans leurs cellules est beaucoup plus élevé que chez les individus sains, surtout si la dose reçue est importante. Par exemple, pour une dose de 100, le nombre de dimères de thymine est 7 fois plus élevé chez les individus atteints de *Xeroderma pigmentosum*.

Le second graphique montre que, chez un individu sain, la quantité de thymine présente à l'état de dimère diminue très rapidement : ceci est dû à la réparation de l'ADN effectué par les enzymes de réparation de l'ADN qui détectent et corrigent ces anomalies. Chez les individus atteints de *Xeroderma pigmentosum*, la quantité de thymine présente à l'état de dimère est la même au début mais reste constante. Ceci montre que le *Xeroderma pigmentosum* est dû à un déficit de la réparation de l'ADN.

**2.** Chez les deux malades, on constate que le gène qui permet de produire l'enzyme XPF réparatrice de l'ADN est modifié : un ou plusieurs nucléotides de la séquence sont différents. Il s'agit de mutations par substitution de nucléotides. Comme cette enzyme intervient dans la réparation des dimères de thymine, on peut penser qu'elle est modifiée chez les personnes atteintes et qu'elle n'accomplit plus correctement son rôle. Les mutations dues aux UV ne sont alors plus réparées. L'individu est donc beaucoup plus sensible à l'effet mutagène des UV.

## 8 Un labrador au phénotype rare

**1.** Il s'agit ici d'un cas de mutation somatique car la mutation n'affecte qu'une partie (non germinale) de l'animal. L'oreille possède l'allèle E alors que le reste du pelage ne le possède pas. S'il s'agissait d'une mutation germinale héritée par Spotty de l'un des gamètes de ses parents, toutes ses cellules posséderaient l'allèle muté.

**2.** Cette mutation a dû se produire au cours du développement embryonnaire de Spotty dans une cellule qui a été à l'origine de toutes les cellules qui apparaissent colorées (pelage au niveau de l'oreille).

## 9 Une étude statistique des mutations affectant un gène

1. La séquence de delF508 diffère de la séquence CFTR à partir du nucléotide 1 522 : on constate un décalage de trois nucléotides correspondant à une délétion des trois nucléotides T consécutifs en position 1 522, 1 523, 1 524.

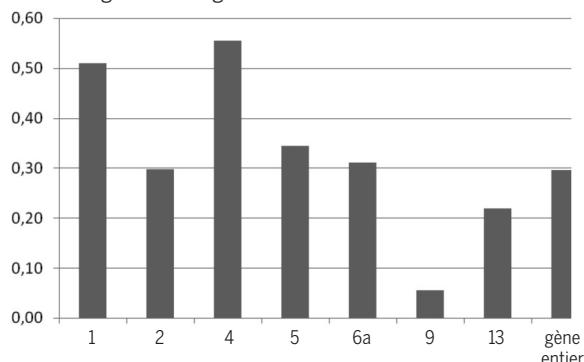
La séquence GR42X diffère de la séquence CFTR par la substitution du nucléotide G en T en position 1 624. De telles différences sont dues à des mutations de la séquence initiale. Il s'agit probablement d'erreurs commises pendant la réPLICATION de l'ADN et qui ont ensuite échappé aux systèmes de contrôle et de réparation.

2.

Segments du gène CFTR	1	2	4	5	6a	9	13	Gène entier
Longueur (en paires de nucléotides)	53	111	216	90	164	182	724	4 444
Nombre de mutations différentes	27	33	120	31	51	10	159	1 312
Rapport Nombre de mutations/ Longueur du segment	0,51	0,30	0,56	0,34	0,31	0,05	0,22	0,30

3.

Nombre de mutations/Longueur du segment

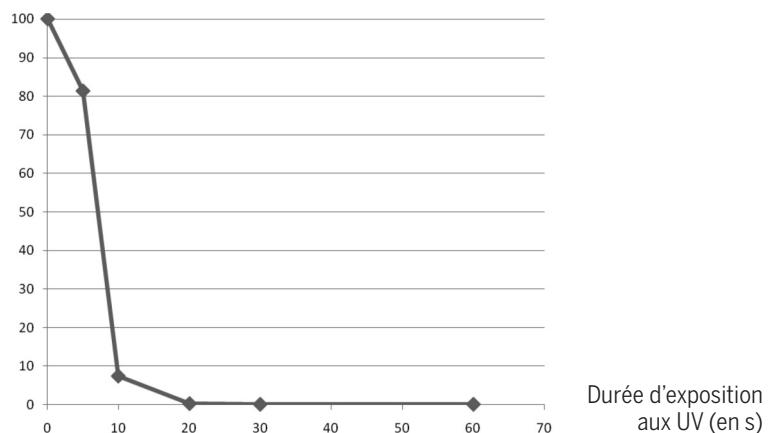


Les mutations ne sont pas uniformément réparties dans le gène : le segment 6a par exemple se caractérise par une fréquence de mutations très faible par rapport aux autres segments.

## 10 Tester l'efficacité des protections solaires

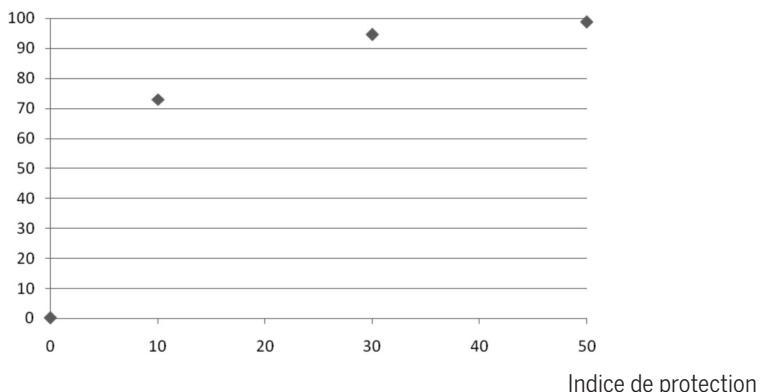
Effet de l'irradiation de la culture par les UV, sans crème solaire

Pourcentage de levures survivantes



### Efficacité d'une protection par crème solaire (irradiation de 20 s)

Pourcentage de levures survivantes



# L'expression du patrimoine génétique

## Activités pratiques

1

### La découverte des relations entre protéines et ADN (pages 52-53)

Connaissances	Capacités et attitudes
Les portions codantes de l'ADN comportent l'information nécessaire à la synthèse de chaînes protéiques issues de l'assemblage d'acides aminés.	Recenser, extraire et exploiter des informations permettant de caractériser les protéines comme expression primaire de l'information génétique.

#### 1. Les intentions pédagogiques

Cette activité pratique a pour objectif d'une part de familiariser les élèves avec l'organisation des protéines et l'importance des acides aminés (notion fondamentale pour comprendre les implications du phénotype à l'échelle moléculaire), d'autre part d'établir la relation entre la succession des nucléotides d'un gène et celle des acides aminés de la protéine correspondante (colinéarité gène/protéine).

L'étude de la structure de l'hémoglobine (**document 1**) s'inscrit dans un rappel des échelles d'organisation du vivant abordées en classe de Seconde. L'objectif est d'aboutir à la notion selon laquelle les protéines sont des macromolécules constituées d'une succession de molécules élémentaires : les acides aminés. Cette organisation pourra être mise en parallèle avec celle de l'ADN, déjà connue. Sur un plan historique, l'hémoglobine a été un sujet d'étude essentiel pour la démonstration de la relation « un gène/une protéine » par le séquençage partiel de l'hémoglobine sicklémique par Vernon Ingram (1956). Cet exemple sera repris au chapitre suivant.

L'importance du rôle des protéines en relation avec leur composition en acides aminés et leur structure est la notion essentielle abordée dans le **document 2**. Ce document permet ainsi de généraliser les observations précédentes. L'étude de la structure d'autres protéines, en relation avec leur séquence et leur fonction peut être envisagée (insuline par exemple : voir « Ressources complémentaires » ci-dessous).

Quelques étapes historiques de la démonstration de la relation entre gène et protéine sont reprises dans le **document 3**. Beadle et Tatum ont été les premiers à mettre au point un protocole expérimental rigoureux pour établir les gènes mis en jeu dans des chaînes métaboliques. Le concept « un gène, une enzyme » avait déjà été formulé par le médecin britannique Archibald Garrod (1909) au travers de l'étude de maladies métaboliques humaines. Ces résultats expérimentaux étant difficiles à interpréter sans formation en génétique formelle, le document insiste davantage sur les expériences de Yanofsky (voir les ressources complémentaires ci-dessous) qui ont permis de démontrer l'hypothèse de la colinéarité entre gène et protéine. Ces expériences ont nécessité le travail d'équipes nombreuses pendant plusieurs années afin d'établir la séquence de l'enzyme d'une part et d'autre part la carte génétique des recombinations

bactériennes. Il est à noter que comme l'une des cartes est une carte génétique et l'autre un séquençage, le rapport de proportionnalité entre les distances n'est pas parfait mais correspond à la meilleure trace accessible, plus de dix ans avant que le séquençage de l'ADN soit disponible. Par ailleurs, Yanofsky estimera plus tard avoir eu de la chance de travailler sur un gène bactérien à l'époque où le morcellement des gènes eucaryotes n'était pas encore connu !

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Une protéine est une molécule de grande dimension constituée d'une succession d'acides aminés, repliée dans l'espace. L'ADN est constitué de deux chaînes de nucléotides complémentaires, enroulées en hélice. Ces deux macromolécules sont des chaînes de petites molécules. Leur organisation spatiale est par contre différente.

**Doc. 2 :** Les protéines ont diverses propriétés qui dépendent de l'ordre précis dans lequel sont enchainés leurs acides aminés. Un plan de fabrication est donc nécessaire pour que les cellules produisent des protéines.

**Doc. 3 :** Un gène code pour une protéine. La position des mutations dans l'ADN correspond à la position des acides aminés modifiés dans la séquence de la protéine. La suite des nucléotides d'un gène code pour la suite des acides aminés de la protéine correspondante.

**Doc. 1 à 3 :** Un gène est une portion d'ADN contenant les informations nécessaires pour qu'une cellule produise un enchaînement précis d'acides aminés afin de former une protéine.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Une protéine est une succession linéaire d'acides aminés. Cette succession est déterminée par l'information contenue dans un gène, c'est-à-dire une suite de nucléotides de l'ADN. Ainsi, la séquence des nucléotides d'un gène contrôle la séquence des acides aminés d'une protéine.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas :** deux vidéos « La structure de l'hémoglobine », « La structure de l'insuline ».
- **Site ressources Bordas :** modèles moléculaires de l'hémoglobine, de la  $\beta$ -globine.
- **Journal of Biological Chemistry :** article de synthèse, par Yanofsky, au sujet de ses travaux autour de l'hypothèse énoncée par Beadle « *One gene, one enzyme* » (voir en 7<sup>e</sup> page la carte complète des mutations de la tryptophane synthase) :  
<http://www.jbc.org/content/278/13/10859.full.pdf+html>

## Le transfert de l'information génétique (pages 54-55)

Connaissances	Capacités et attitudes
Chez les eucaryotes, la transcription est la fabrication, dans le noyau, d'une molécule d'ARN pré-messager, complémentaire du brin codant de l'ADN.	Mettre en œuvre une méthode (démarche historique) et/ou une utilisation de logiciels et/ou une pratique documentaire permettant d'approcher le mécanisme de la transcription, et de la traduction.

### 1. Les intentions pédagogiques

L'objectif principal de cette activité est de découvrir la transcription de l'ADN en ARN.

Cependant, la notion d'ARN « pré-messager » suppose de comprendre déjà la notion d'ARN messager. C'est pourquoi, pour que ce processus soit bien compris des élèves de Première, les auteurs ont choisi de présenter d'abord l'existence et le rôle de l'ARN messager, d'expliquer classiquement la transcription puis la traduction, avant de revenir, au cours de l'activité 5, sur l'étape de la maturation de l'ARN pré-messager.

La première page s'attache à faire comprendre le rôle et les propriétés de l'ARNm, tandis que la seconde révèle son mécanisme de synthèse.

La localisation de la synthèse protéique (**document 1**), est mise en évidence par un marquage fluorescent. L'objectif est de comprendre que chez les eucaryotes, l'ADN est compartimenté dans le noyau tandis que la synthèse protéique prend place dans le cytoplasme.

Pour information : la publication originale, d'où est tirée cette photographie (voir ressources complémentaires ci-dessous), est une étude de la localisation de la synthèse de l'actine dans des cellules de myoblaste. Le gène a été modifié pour que les premiers acides aminés du polypeptide intègrent un motif (tétracystéine) dont les propriétés catalytiques révèlent une couleur rouge (coloration au ReAsH). C'est le commencement de la traduction qui est donc révélé ici. La couleur verte est due à un motif GFP qui est placé à la suite dans la construction génétique (permet de suivre le trajet de la protéine d'actine formée).

Le **document 2** permet de formuler une hypothèse quant au problème de la différence de compartimentation entre l'information génétique et son lieu d'expression, en mettant en évidence le lieu de synthèse de l'ARN et sa migration dans le cytoplasme. Cette hypothèse peut être confirmée en comparant la structure de l'ADN avec celle d'un ARN correspondant. Ainsi, le **document 3** présente une comparaison entre un modèle d'un fragment d'ARN messager et un fragment d'ADN correspondant. La correspondance entre la séquence de l'ARN et celle du brin non transcrit est confirmée par la comparaison des séquences du début du gène de la bêta-globine. L'utilisation d'un logiciel de visualisation moléculaire pourra montrer la différence chimique entre le ribose de l'ARN et le désoxyribose de l'ADN. Enfin, on pourra remarquer que les filaments d'ARN peuvent adopter des conformations très variables (et différentes de l'hélice de l'ADN). La similarité entre les séquences d'ARN et d'ADN permet d'introduire l'idée d'une copie de l'un des brins d'ADN.

Le mécanisme de cette transcription de l'ADN est étudié au travers du **document 4**. La micrographie électronique replace le phénomène dans son contexte biologique et

temporel. Le modèle d'ARN-polymérase associée à un ADN double brin et un ARN en cours de synthèse montre, à l'aide de la coloration par nucléotides choisie, la complémentarité entre la séquence du brin d'ADN transcrit et celle de l'ARNm.

Le nucléotide en cours d'addition au niveau du site catalytique indique l'orientation de la réaction. Le schéma explicatif facilite l'interprétation du phénomène.

Pour information, ce modèle correspond à l'ARN-polymérase du bactériophage T7, qui est beaucoup plus petite et simple que les ARN-polymérases bactériennes et eucaryotes, mais est considérée comme un modèle pertinent pour l'étude en laboratoire des mécanismes moléculaires de la transcription.

À noter que l'expression de « brin codant », utilisée dans le programme, est à éviter, car elle prête à confusion et il n'y a d'ailleurs pas unanimité quant à sa signification, y compris dans les publications scientifiques (en général d'ailleurs, le brin qualifié de codant est plutôt le brin non transcrit). Le manuel utilise donc les termes de « brin transcrit » et de « brin non transcrit », sans ambiguïté.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** L'ADN est localisé dans le noyau tandis que la synthèse des protéines qu'il contrôle est située dans le cytoplasme. Le problème est donc de savoir comment l'information codée par l'ADN est transmise au cytoplasme, où sont assemblés les acides aminés.

**Doc. 2 et 3 :** L'ARN est synthétisé dans le noyau et au bout d'une heure et demie se retrouve intégralement dans le cytoplasme. D'autre part, l'ARN contient la même information que le brin non transcrit de l'ADN d'un gène. Il pourrait donc véhiculer l'information génétique du noyau vers le cytoplasme.

**Doc. 3 et 4 :** L'ARN est formé par l'assemblage de nucléotides complémentaires du brin transcrit de l'ADN grâce à l'action de l'ARN polymérase. L'ARN contient ainsi la même séquence de nucléotides que le brin non transcrit.

**Doc. 4 :** La transcription commence au début du gène et se poursuit progressivement jusqu'à la fin du gène. Ainsi, les ARNm formés sont de plus en plus longs au fur et à mesure de l'avancée de la transcription.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'information de l'ADN nécessaire à la synthèse d'une protéine est transmise au cytoplasme sous la forme d'ARNm. L'ARNm est formé dans le noyau au cours de la transcription par l'action de l'ARN-polymérase. L'ARNm produit est une séquence de nucléotides, synthétisée par complémentarité avec le brin d'ADN transcrit. Après transcription, l'ARN migre dans le cytoplasme au niveau du site de synthèse des protéines.

## 3. Ressources complémentaires

### ■ Manuel numérique Bordas :

- vidéos « ARN messager », « ARN-polymérase » ;
- animation « La transcription ».

### ■ Site ressources Bordas : modèles moléculaires de l'ARN messager, de l'ARN-polymérase.

### ■ Publication sur la localisation de la traduction : The Rockefeller University Press,

doi: 10.1083/jcb.200512137

<http://jcb.rupress.org/content/175/1/67.abstract>

## Le langage génétique (pages 56-57)

Connaissances	Capacités et attitudes
La séquence des nucléotides d'une molécule d'ADN représente une information. Le code génétique est le système de correspondance mis en jeu lors de la traduction de cette information.	Mettre en œuvre une méthode (démarche historique) et/ou une utilisation de logiciels et/ou une pratique documentaire permettant de comprendre comment le code génétique a été élucidé.

### 1. Les intentions pédagogiques

Cette double page propose d'abord une démarche historique : il ne s'agit pourtant pas de redécouvrir le code génétique mais de comprendre quelques aspects de la méthodologie qui a permis d'établir le système de correspondance entre acides aminés et nucléotides.

Historiquement, plusieurs hypothèses ont été formulées quant à la nature du code génétique (voir page 66, « Des clés pour... mieux comprendre l'histoire des sciences », le premier code proposé par Gamow). L'expérience de Crick décrite dans le **document 1** (voir « ressources complémentaires ci-dessous) a permis de montrer que le code génétique est non recouvrant et qu'il est formé de triplets de nucléotides. On pourra montrer à travers l'exemple d'une phrase du type « TON AMI LEO EST ICI » que l'insertion d'une lettre en gardant le même découpage des mots (3 lettres) rend la suite du message incompréhensible, ce qui n'est pas le cas lorsque l'insertion est celle d'un nombre de lettres multiple de 3. À la même époque, Nirenberg réalise les expériences décisives citées dans le **document 2** en travaillant sur des fractions cytoplasmiques différentes, recréant *in vitro* un milieu de traduction contrôlé (voir « ressources complémentaires » ci-dessous). Les résultats originaux exprimés en dosage de radioactivité dans les protéines formées ont ici été rapportés aux témoins de chaque expérience, de façon à différencier ce qui est un dosage significatif de ce qui ne l'est pas. Ces résultats valident le code génétique présenté dans le **document 3**. Le **document 4** permet un réinvestissement des notions acquises lors de l'étude de la transcription et propose une étude des conséquences des mutations en appliquant le code génétique. Les exceptions à l'universalité du code génétique sont abordées dans l'exercice 8 page 69.

Une version « circulaire » du code génétique est proposée dans le guide pratique page 343.

### 2. Les pistes d'exploitation

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 3 :** Lorsque le nombre de nucléotides insérés ou supprimés n'est pas un multiple de trois, le message génétique n'est plus interprété correctement. La taille des codons est donc de trois nucléotides.

**Doc. 2 :** Le codon UUU correspond à l'incorporation de la phénylalanine et pas d'un autre acide aminé. Les codons AAA et CCC ne correspondent pas à la phénylalanine.

**Doc. 3 et 4 :** Le 7<sup>e</sup> triplet TTC au lieu de CTC. L'ARN correspondant sera AAG au lieu de GAG, soit une lysine en position 7 à la place d'un acide glutamique.

À partir du 10<sup>e</sup> triplet, insertion d'un nucléotide G. Le premier triplet AGA est remplacé par GAG, soit, sur l'ARN correspondant, UCU au lieu de CUC, et donc leucine au lieu de sérine. Tous les acides aminés suivants sont également modifiés, puisque la lecture de tous les codons se trouve décalée.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'information contenue dans la séquence de l'ARNm détermine la séquence de la protéine formée grâce à un système de correspondance : trois nucléotides successifs forment un codon auquel correspond un acide aminé déterminé, toujours le même. Le système de correspondance entre les codons et les acides aminés est le code génétique.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas** : fiche documentaire « Recherche et santé : le prix Nobel de chimie 2009 »
- **Expériences de Crick** : lecture pour la remise du prix Nobel (1962) sur le site [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/medicine/laureates/1962/crick-lecture.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1962/crick-lecture.html)
- **Article original dans la revue *Nature*** (General nature of the genetic code for proteins) : <http://www.nature.com/nature/focus/crick/pdf/crick192.pdf>
- **Expériences de Nirenberg et Matthaei, article original dans la revue *Proceedings of the National Academy of Science*** : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC223178/?tool=pubmed>

## La traduction de l'ARN messager en protéine (pages 58-59)

Connaissances	Capacités et attitudes
Après une éventuelle maturation, l'ARN messager est traduit en protéines dans le cytoplasme.	Mettre en œuvre une méthode (démarche historique) et/ou une utilisation de logiciels et/ou une pratique documentaire permettant d'approcher le mécanisme de la transcription, et de la traduction.

### 1. Les intentions pédagogiques

Dans un souci de simplification, les auteurs ont choisi de présenter d'emblée l'étape de la traduction, sans aborder encore à ce stade la question de la maturation de l'ARN. Cette étape sera présentée au cours de l'activité 5.

Le code génétique étant à présent connu, le but de cette activité est de présenter le déroulement biologique de la traduction, de façon simplifiée, puisque le rôle des ARNt et l'existence des ARNr sont placés hors des limites du programme. Le **document 1** situe la traduction dans son contexte biologique et présente le rôle des ribosomes. L'organisation du polysome pourra être mise en parallèle avec celle des unités de réPLICATION du document 4 page 55. La structure tridimensionnelle du ribosome est complexe et probablement trop difficile à réaliser avec les logiciels de visualisation moléculaire utilisés en classe. Sur cette image, c'est une vue simplifiée qui est présentée, après en avoir effacé les protéines ribosomales (ne subsistent que les ARNt, ARNr et ARNm). La légende « système de lecture des codons » correspond en fait aux ARNt. La localisation du site catalytique serait donc au point d'insertion de ces ARNt dans la grosse sous-unité. Le polypeptide en cours de formation est exporté via un tunnel non visible ici qui traverse la grosse sous-unité.

Les mécanismes génétiques mis en jeu pour l'initiation et la terminaison de la traduction sont abordés au travers des comparaisons de séquence du **document 2** : en comparant diverses séquences, on constate l'existence systématique d'un premier codon AUG. L'examen des fins de séquence met en évidence le rôle des codons « non-sens » (ou codons « stop »). Enfin, le schéma fonctionnel du **document 3** resitue les phénomènes étudiés dans leur dimension temporelle. Ce schéma pourra être mis en relation avec la microphotographie du polysome (Doc. 1b).

### 2. Les pistes d'exploitation

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 3 :** La traduction nécessite un ARNm, un (ou plusieurs) ribosome(s) ainsi que des acides aminés. La photographie b montre que plusieurs ribosomes réalisent simultanément la traduction d'un même ARNm.

**Doc. 2 :** Tous les ARN messagers commencent par le même codon AUG. Par ailleurs, les protéines formées contiennent un acide aminé de moins que le nombre de codons de l'ARNm. Ce dernier codon est un codon STOP, c'est-à-dire un codon pour lequel il n'y a pas d'acide aminé correspondant.

**Doc. 1 et 3 :** Un polysome permet de produire plusieurs protéines simultanément à partir d'un même ARN messager. Toutes ces protéines sont donc identiques entre elles, puisque assemblées à partir de la même information.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'information portée par l'ARNm est « lue », codon après codon, par un ribosome qui associe l'acide aminé correspondant au reste de la protéine déjà synthétisée. La traduction débute au niveau d'un codon d'initiation AUG et s'arrête après rencontre d'un codon stop.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas** : animation « La traduction ».

## Du génome au « protéome » (pages 60-61)

Connaissances	Capacités et attitudes
Un même ARN pré-messager peut subir, suivant le contexte, des maturations différentes et donc être à l'origine de plusieurs protéines différentes.	Mettre en œuvre une méthode (démarche historique) et/ou une utilisation de logiciels et/ou une pratique documentaire permettant d'approcher le mécanisme de la transcription, et de la traduction.

### 1. Les intentions pédagogiques

En conformité avec le programme qui introduit la notion de diversité des produits de l'expression d'un gène, cette double page présente une problématique de la génétique d'aujourd'hui : après le séquençage des génomes, il s'agit de caractériser son expression, c'est-à-dire ce que l'on appelle, par analogie avec le génome, le « protéome ».

C'est donc dans le cadre de cette problématique que la question de la maturation de l'ARN prend tout son intérêt.

En effet, chez les eucaryotes, le gène n'est pas directement transcrit en ARN messager mais en un « ARN pré-messager » qui devra subir une opération qualifiée de maturation.

On pourra déjà faire constater que l'ARN messager est en fait systématiquement plus court que l'ADN du gène auquel il correspond (ou que l'ARN pré-messager qui est une copie conforme de l'ADN). La comparaison graphique des séquences apportée par le **document 1** a pour but de mettre en évidence les portions identiques (exons) et les portions différentes (introns) entre ARNm et ARN pré-messager. Le guide pratique (page 343) présente une explication plus détaillée du principe du dotplot et de son interprétation. Sur le plan manipulatoire, le dotplot réalisé par le logiciel Anagène nécessite un temps de calcul important. Il est donc adapté pour l'étude de gènes courts possédant peu d'introns. Sans entrer dans les détails de cette opération logicielle, il suffit de constater qu'il n'y a identité entre les séquences d'ADN et d'ARNm que par tronçons.

Une autre approche consiste à étudier une image d'hybridation entre l'ADN d'un gène et l'ARN messager correspondant (voir exercice 10 page 70). Malgré les apparences, le dotplot est cependant une mise en évidence plus directe.

Le **document 2** pourra être utilisé comme une aide à la lecture du dotplot et à son interprétation. Il permet d'introduire le vocabulaire propre à l'épissage.

L'intérêt de l'épissage au niveau de la diversité des protéines produites est donné par l'exemple de la tropomyosine dans le **document 3**. Cet exemple permet de montrer d'une part qu'un grand nombre de protéines peuvent être produites à partir d'un même gène, par épissage alternatif de l'ARN pré-messager et d'autre part que l'épissage des gènes varie selon les types cellulaires. On pourra remarquer que les cinq exons colorés en marron sont représentés dans tous les variants produits.

L'importance de l'épissage alternatif dans la complexification de l'expression génétique est abordée dans le **document 4**. Sans verser dans une explication finaliste simpliste du cours de l'évolution, ce document montre différentes stratégies génétiques qui peuvent expliquer en partie le hiatus entre le nombre de gènes et la complexité

des organismes (par exemple, on pourra faire constater que le nombre de gènes du génome humain n'est effectivement pas particulièrement élevé). On pourra montrer que du point de vue adaptatif, l'expression des gènes a un coût probablement déterminant pour la survie d'un organisme unicellulaire. En revanche, pour un animal pluricellulaire, la flexibilité apportée par l'épissage alternatif peut se traduire par un avantage sélectif. Certains auteurs avancent l'idée selon laquelle la polyplioïdie chez les organismes végétaux pourrait être la marque d'un mécanisme adaptatif comparable : cet aspect sera d'ailleurs envisagé en classe de Terminale.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** L'ARN pré-messager est beaucoup plus long (1638 pb contre 444 pb) que l'ARNm. Trois portions (entre 100 et 200, entre 300 et 500, puis entre 1 400 et 1 500 pb) sont communes entre les deux séquences et forment l'intégralité de l'ARNm. Les quatre autres portions ne sont pas retrouvées dans l'ARN messager.

**Doc. 1 et 2 :** Les portions du dotplot révélées par des diagonales correspondent aux exons. Les segments entre les exons successifs correspondent aux introns.

**Doc. 3 :** Ces deux ARNm diffèrent par un seul exon : l'exon n° 3 est présent dans la tropomyosine du muscle strié, tandis qu'il est substitué par l'exon n° 2 dans la tropomyosine du muscle lisse. Ainsi, par l'élimination ou l'incorporation de certains exons, un même gène peut former des protéines différentes.

**Doc. 4 :** Le génome de levure contient une densité de gène plus importante, avec peu d'introns. À l'inverse, le génome humain a une densité de gènes faible, contenant une proportion d'introns très importante. Le génome de drosophile est intermédiaire.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'ARNm est issu de l'épissage de l'ARN pré-messager, ce dernier résultant directement de la transcription : des séquences (les introns) sont supprimées, tandis que les séquences restantes (les exons) sont raboutées les unes aux autres. Dans la majeure partie des cas, les exons retenus pour former l'ARNm peuvent varier selon le contexte où le gène s'exprime, aboutissant à la formation de protéines différentes.

## 3. Ressources complémentaires

- Logiciel Anagène 2 (version nécessaire pour le tracé de DotPlots).
- Application en ligne Dotlet : <http://myhits.isb-sib.ch/cgi-bin/dotlet>

La correction des exercices 1 à 4 figure dans le manuel de l'élève, p. 350.

## 6 La redondance du code génétique

Cet exercice est une application de l'utilisation du code génétique en effectuant la démarche inverse de celle habituellement mise en œuvre : trouver les codons associés à un acide aminé. Il nécessite aussi de pouvoir lire un modèle moléculaire pour retrouver sa séquence.

La bonne réponse est **e** : 2 (Tyr) × 4 (Gly) × 4 (Gly) × 2 (Phe) × 6 (Leu) = 384

## 7 Du gène au polypeptide

Ocytocine :

- ARNm : UGCUACAUCCAGAACUGCCCCUGGGC
- Protéine : Cys-Tyr-Ile-Gln-Asn-Cys-Pro-Leu-Gly

ADH :

- ARNm : UGCUACUUCCUGAACUGCCCAAGAGGA
- Protéine : Cys-Tyr-Phe-Leu-Asn-Cys-Pro-Arg-Gly

## 8 Code génétique : des exceptions à la règle

Cet exercice permet de discuter de la question de l'universalité du code génétique, telle qu'elle est envisagée dans le programme. L'idée générale est que ces variantes du code génétique sont en fait des évolutions du code génétique universel retrouvé chez tous les autres êtres vivants. Afin de ne pas rajouter de notion supplémentaire (ADN extranucléaire et génome mitochondrial), les codes génétiques mitochondriaux ne sont pas traités.

1. Chez quelques êtres vivants, la signification d'un à deux codons (en général des codons stop) est modifiée par rapport au code génétique habituel.
2. Le code génétique est quasiment universel : ces variantes sont des exceptions qui ne concernent que quelques êtres vivants. Comme ces variantes ne sont pas partagées, on peut supposer qu'elles dérivent toutes du code génétique commun à toutes les autres espèces. Il n'existe pas de code génétique qui n'aurait pas cette origine commune.

## 9 Un épissage alternatif record

Cet exercice permet d'appliquer la notion d'épissage alternatif et de discuter de l'un de ses avantages (à noter que la protéine DSCAM serait impliquée dans le mécanisme combinatoire empêchant un neurone de réaliser une synapse avec lui-même).

1. Le nombre de combinaisons différentes possibles serait de :

$12 \times 48 \times 33 \times 2 = 38\,016$ .

2. L'épissage alternatif permet donc de produire plusieurs protéines différentes à partir d'un même gène.

## 10 Une expérience d'hybridation entre ADN et ARNm

Cette observation de microscopie électronique classique nécessite, pour pouvoir être interprétée, d'avoir bien compris les notions de complémentarité entre ADN et ARN, ainsi que d'être en mesure de prévoir les conséquences du morcellement des gènes.

1. Les boucles correspondent à des zones où l'ARN et l'ADN diffèrent, tandis que les segments entre les boucles correspondent à des séquences complémentaires entre l'ADN et l'ARNm correspondant.
2. Les séquences complémentaires correspondent aux exons. L'existence de boucles s'explique par le fait que les introns ont été supprimés de la séquence de l'ARNm et ne peuvent donc pas s'hybrider avec l'ADN.

## 11 Le fonctionnement d'un antibiotique

1. La tétracycline se fixe sur la petite sous-unité du ribosome au niveau d'un site proche de la localisation de l'ARNm. On peut constater que l'ARNm est dans ce cas absent. On peut donc supposer que la tétracycline empêche la fixation de l'ARNm.
2. Un virus se reproduit en utilisant la machinerie de la cellule hôte. Donc, dans une cellule eucaryote (chez l'Homme par exemple), un virus utilisera pour sa reproduction des ribosomes eucaryotes sur lesquels la tétracycline n'agit pas. Cet antibiotique est donc inefficace vis-à-vis de la reproduction d'un virus.

## 12 Les conséquences d'une mutation sur la fabrication d'une protéine

*À noter que les séquences comparées ici ne comportent pas le codon d'initiation.*

1. La comparaison simple fait apparaître un très grand nombre de différences, à partir du nucléotide 25. Une comparaison par alignement avec discontinuité montre cependant que la différence entre ces deux séquences peut se réduire à une seule, en décalant la séquence d'un nucléotide au niveau 25. On peut donc considérer que l'allèle Tha 7 provient tout simplement d'une mutation de l'allèle normal, par délétion du nucléotide 25.
2. Les deux séquences diffèrent complètement à partir du niveau de la mutation (9<sup>e</sup> acide aminé). Mais surtout, la protéine Tha 7 est écourtée et ne comporte que 21 acides aminés contre 146 pour la globine normale. En effet, à partir de la délétion, il y a un décalage du « cadre de lecture » des codons. Ceci conduit à de nombreuses différences à partir de ce point et, au niveau du 22<sup>e</sup> codon, à la lecture d'un codon UGA, c'est-à-dire un codon stop : la synthèse protéique est alors arrêtée à ce niveau.

# Génotype, phénotype et environnement

## Activités pratiques

1

### Le phénotype se définit à différentes échelles (pages 74-75)

Connaissances	Capacités et attitudes
Le phénotype macroscopique dépend du phénotype cellulaire, lui-même induit par le phénotype moléculaire.	Recenser, extraire et exploiter des informations (à partir d'un exemple comme la drépanocytose ou le <i>Xeroderma pigmentosum</i> ) permettant de caractériser les différentes échelles d'un phénotype.

#### 1. Les intentions pédagogiques

Au travers des deux exemples préconisés par le programme officiel, cette activité a pour objectif de familiariser les élèves avec la mise en relation des différentes échelles du phénotype. L'analyse du **document 1** permet de recenser les symptômes de la drépanocytose à l'échelle de l'organisme. Le **document 2** apporte des informations quant aux causes cellulaires et moléculaires de la maladie. L'exemple de la drépanocytose sera repris dans les deux activités suivantes du chapitre (expression génétique, influence de l'environnement sur le phénotype moléculaire).

L'exemple de la maladie *Xeroderma pigmentosum*, traité dans le **document 3**, permet d'étendre les premières conclusions, en reliant cette fois-ci une prédisposition au développement de mélanomes à un défaut du système de réparation des altérations de l'ADN par les UV. L'expression « Les enfants de l'ombre » est souvent utilisée dans les médias car ces enfants doivent effectivement vivre à l'abri du rayonnement solaire (l'expression « Les enfants de la Lune », que l'on peut aussi rencontrer, est le titre d'un documentaire et également celui d'une association : voir « ressources complémentaires » ci-dessous).

Les connaissances concernant les mécanismes et les conséquences de ces mutations acquises aux cours du **Chapitre 2** pourront être utilement réinvesties ici (voir notamment l'exercice 7 page 47).

En mettant en parallèle ces deux exemples, on peut alors définir la notion centrale de ce chapitre, celle du phénotype moléculaire.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 à 3

	Phénotype drépanocytaire	Phénotype <i>Xeroderma pigmentosum</i>
Phénotype macroscopique	Anémie chronique, risque élevé d'accidents vasculaires, crises drépanocytaires (douleurs articulaires, anémie aiguë).	- Hypersensibilité de la peau aux UV (brûlures de la peau, de la cornée). - Peau sèche et tachetée.
Phénotype cellulaire	Hématies déformées (en fauille) et en faible nombre.	Cancer de la peau précoce : cellules épidermiques à division incontrôlée.
Phénotype moléculaire	Hémoglobine formant des fibres insolubles.	Enzymes de réparation de l'ADN inefficaces.

Doc. 1 à 3 :

- Exemple du phénotype drépanocytaire :

Les molécules d'hémoglobine forment des fibres qui déforment les hématies. Les hématies circulent moins bien, entraînent une anémie et un risque d'accident vasculaire.

- Exemple de *Xeroderma pigmentosum* :

Les enzymes de réparation de l'ADN sont inefficaces après une exposition de l'ADN aux UV. Des mutations s'accumulent et touchent des gènes dont la mutation entraîne une multiplication incontrôlée. Un cancer de la peau peut alors se développer.

**Doc. 2 et 3 :** Ces deux maladies touchent des protéines. Or, les protéines sont le produit de l'expression des gènes. Ces deux maladies sont dues à une altération des gènes codant les chaînes de l'hémoglobine dans le premier cas, les enzymes de réparation de l'ADN dans le deuxième cas : ce sont des maladies génétiques.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Le phénotype à l'échelle moléculaire, c'est-à-dire les protéines synthétisées à partir de l'expression d'un allèle, détermine certaines caractéristiques phénotypiques à l'échelle cellulaire et par conséquent à l'échelle de l'organisme.

## 3. Ressources complémentaires

- **Matériel :** Frottis sanguin normal et drépanocytaire.
- **BioTic INRP :**
  - à propos de *Xeroderma pigmentosum* :  
<http://www.inrp.fr/Acces/biotic/gpe/dossiers/xeroderma/html/points.htm>,
  - à propos de la drépanocytose :  
<http://www.inrp.fr/Acces/biotic/gpe/dossiers/drepanocytose/html/synthese.htm>
- **Association de malades atteints de *Xeroderma pigmentosum* :**  
<http://asso.orpha.net/AXP/index2.htm>
- **Les « enfants de la Lune », documentaire réalisé par Feriel Ben Mahmoud et Nicolas Daniel en 2008, diffusé pour la première fois en France en octobre 2009 sur France 5 :**  
<http://lesenfantsdelalune.blogspot.com/>
- **Manuel numérique Bordas :** fiche documentaire « *Xeroderma pigmentosum* »

## Phénotype moléculaire et expression génétique (pages 76-77)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>L'ensemble des protéines qui se trouvent dans une cellule (phénotype moléculaire) dépend :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- du patrimoine génétique de la cellule (une mutation allélique peut être à l'origine d'une protéine différente ou de l'absence d'une protéine) ;</li> <li>- de la nature des gènes qui s'expriment sous l'effet de l'influence de facteurs internes et externes variés.</li> </ul>	<p>Recenser, extraire et exploiter des informations (à partir d'un exemple comme la drépanocytose [...]) permettant de différencier les rôles de l'environnement et du génotype dans l'expression d'un phénotype.</p>

### 1. Les intentions pédagogiques

Cette activité a pour objectif de mettre en relation le phénotype cellulaire défini précédemment avec les gènes exprimés dans une cellule. Deux aspects sont ainsi présentés : le premier concerne le rapport entre mutation des gènes et phénotype moléculaire ; le second touche à l'expression différentielle des gènes selon les types cellulaires et au cours du temps.

La comparaison des séquences nucléotidiques et peptidiques de la bêta-globine (**document 1**) prolonge la découverte du phénotype drépanocytaire (activités pratiques 1). La localisation de la mutation génétique et de sa conséquence sur la séquence protéique (réalisée avec un logiciel de traitement de séquences), se poursuit logiquement par la recherche de sa localisation spatiale dans le modèle tridimensionnel de l'hémoglobine. L'utilisation d'un logiciel de modélisation moléculaire met en évidence qu'il n'y a pas de changement dans l'organisation de l'hémoglobine qui pourrait expliquer cette anomalie. En revanche, la mise en évidence de la position des valines mutées dans un dimère d'hémoglobine drépanocytaire montre que l'une d'elle est située au point de contact, en vis-à-vis de deux acides aminés hydrophobes (**document 1**). Ainsi, les acides aminés valine, résultant de la mutation, ont tendance à créer des points d'accroche entre les molécules d'hémoglobine, ce qui est à l'origine de la formation des polymères fibreux.

Le **document 2** montre un aspect de la différenciation cellulaire avec des types cellulaires aisément observables : les cellules sanguines (même si, en toute rigueur, hématies et plaquettes ne sont pas des cellules au sens strict, le raisonnement sur l'expression des gènes peut être appliqué à leurs précurseurs). À chaque type cellulaire présenté est associé un exemple significatif de protéine spécifique. Le nombre de signaux impliqués dans la différenciation cellulaire des précurseurs est important et l'on pourra se référer au besoin à des sources d'information plus exhaustives. L'érythropoïétine est citée ici comme exemple d'une de ces substances agissant sur la différenciation cellulaire. L'essentiel est de montrer que toutes les cellules d'un même organisme possèdent la même information génétique mais qu'elles n'en expriment qu'une fraction. Le rôle des facteurs de transcription sera traité au cours de l'activité pratique suivante.

L'aspect temporel de l'expression génétique est abordé au travers de l'exemple des gènes de globine dans le **document 3**. Les mécanismes de cette régulation génétique sont complexes et imparfaitement connus. Ils pourraient jouer sur la compaction de la

chromatine, par une action de protéines régulatrices sur les histones et leur positionnement (enroulement de la chromatine). On pourra relier l'intérêt de la production de différentes globines au cours du temps au mode de vie et de respiration de l'embryon, du fœtus et du nouveau-né.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Le codon GAG, en position 6 sur le gène de la bêta-globine, est remplacé par le codon GTG. Ainsi, la chaîne peptidique formée contient une valine en position 6 au lieu d'un acide glutamique.

**Doc. 1 :** La valine, acide aminé hydrophobe, établit un contact entre deux molécules d'hémoglobine. Alors que les molécules d'hémoglobine sont normalement dissoutes dans le cytoplasme, il se forme au contraire dans ce cas des polymères fibreux et insolubles.

**Doc. 2 :** Les cellules contiennent les mêmes gènes, mais au cours de leur différenciation, des signaux activent l'expression de certains gènes ou inhibent l'expression d'autres gènes.

**Doc. 3 :** Il existe dans l'espèce humaine plusieurs gènes de globine, qui ne s'expriment que pendant une période précise de la vie. Le contrôle de l'expression des gènes permet donc un changement du phénotype moléculaire au cours de la vie.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Le phénotype moléculaire caractérisant une cellule correspond à l'ensemble des protéines que renferme cette cellule à un instant donné. Le phénotype moléculaire dépend donc des allèles possédés par un individu mais aussi de la régulation de l'expression des gènes, dans l'espace et dans le temps : dans toute cellule, à un moment donné, seuls certains gènes s'expriment.

## 3. Ressources complémentaires

- **Matériel :** Frottis sanguin, frottis de moelle osseuse.
- **Site ressources Bordas :** Séquences d'ADN codant du gène de la bêta-globine normale et drépanocytaire. Modèles moléculaires correspondant à un modèle de dimère d'hémoglobine drépanocytaire, à une molécule d'hémoglobine non mutée (à fin de comparaison).
- **Manuel numérique Bordas :** vidéo « Hémoglobine drépanocytaire ».
- **Biologie moléculaire de la cellule** (Alberts) : régulation de l'expression des gènes de globine.

## L'influence de l'environnement sur le phénotype (pages 78-79)

Connaissances	Capacités et attitudes
L'ensemble des protéines qui se trouvent dans une cellule (phénotype moléculaire) dépend de la nature des gènes qui s'expriment sous l'effet de l'influence de facteurs internes et externes variés.	Recenser, extraire et exploiter des informations [...] permettant de différencier les rôles de l'environnement et du génotype dans l'expression d'un phénotype.

### 1. Les intentions pédagogiques

Deux aspects de l'action de l'environnement sur le phénotype cellulaire sont envisagés en classe de Première : l'influence de l'environnement sur l'expression des gènes elle-même et l'influence de l'environnement sur les molécules « produits de l'expression des gènes ».

Pour traiter le premier aspect, l'exemple choisi est le modèle d'induction des gènes du métabolisme du lactose qui a en partie valu l'attribution du prix Nobel à Jacob, Monod et Lwoff (voir « Des clés pour... mieux comprendre l'histoire des sciences », page 66). L'analyse du **document 1** montre le phénomène d'induction génétique de l'expression du gène Lac Z (commande la synthèse de la  $\beta$ -galactosidase) en présence de lactose. Il s'agit ici seulement de mettre en évidence qu'un gène s'exprime davantage sous l'influence d'un facteur de l'environnement.

Le **document 2** présente un modèle moléculaire qui témoigne du recrutement de l'ARN-polymérase bactérienne par la protéine CAP. Pour information, la protéine CAP est activée par la fixation du second messager AMPc, en absence de glucose et présence de lactose. Ceci entraîne un changement de conformation et la fixation de la protéine CAP sur l'ADN qui se courbe alors en augmentant l'affinité de l'ARN-polymérase pour le promoteur du gène. La zone de couleur rouge sur l'image correspond à la TATA box. Le phénomène est complexe dans ses détails et n'est donc pas l'objet de cette étude. Cependant, on pourra utilement en retenir que les facteurs de transcription sont des protéines qui peuvent agir sur l'expression des gènes comme des « interrupteurs » en fonction des signaux reçus de l'environnement. Il n'est pas fait mention ici du deuxième système de régulation de l'opéron lactose par inhibition de la transcription (fixation du répresseur sur le site d'initiation de la transcription).

Le **document 3** reprend l'exemple de la drépanocytose en mettant en relation les propriétés de polymérisation de l'hémoglobine HbS selon les conditions du milieu (ici oxygénation et concentration en HbS), avec les recommandations adressées aux malades en prévention des crises. À cette fin, il peut être utile de préciser que la polymérisation de l'hémoglobine est un phénomène dynamique qui, a priori, ne se produit pas dans le corps humain compte-tenu du débit sanguin (le temps nécessaire à la polymérisation de l'hémoglobine désoxygénée est supérieur à la durée de trajet du sang depuis les organes périphériques jusqu'aux poumons).

### 2. Les pistes d'exploitation

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** La bactérie étudiée est capable d'utiliser du glucose et du lactose. Cependant, elle n'est en mesure d'utiliser le lactose que si elle a été mise en contact avec celui-ci

et si le glucose n'est pas disponible. Cela s'explique par le fait qu'elle ne transcrit le gène lac Z (permettant d'utiliser le lactose) que si le lactose est le seul substrat présent dans le milieu.

**Doc. 1 et 2 :** Taux faible de glucose et présence de lactose → changement d'activité de la protéine CAP → se lie sur l'ADN avant le gène lac z → fixation de l'ARN polymérase → transcription des gènes lac Z, lac Y et lac A → production des protéines nécessaires au métabolisme du lactose.

**Doc. 3 :** D'après les conseils adressés aux malades, le degré d'oxygénation (lié à l'activité sportive, à l'altitude, etc.) et l'hydratation (liée à la température, l'activité sportive, etc.) sont des facteurs externes qui peuvent influer sur le phénotype drépanocytaire.

**Doc. 3 :** Lorsque la concentration en dioxygène est faible, la proportion d'hématies en fauille est maximale (proche de 100 %). Ceci explique qu'il faille veiller à maintenir une bonne oxygénation du sang. Lorsque la concentration en hémoglobine  $\beta$ s est doublée, de 0,2 à 0,4  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , le délai de formation des fibres est réduit  $10^6$  fois. Ceci est à relier aux mises en garde contre la déshydratation.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les facteurs environnementaux peuvent modifier le phénotype cellulaire en induisant des modifications dans la quantité ou la nature des gènes exprimés par une cellule ou bien en modifiant les propriétés physico-chimiques des protéines produites par l'expression des gènes.

## 3. Ressources complémentaires

- **Régulation de l'opéron lactose :** laboratoire Biologie et Multimédia Université Paris V  
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/operonlactose/>
- **Répression enzymatique chez la levure : Didier Pol** (site <http://www.didier-pol.net/1IND-LEV.html#rep-cat> ou manuel de TP page 67-68)
- **Propriétés de l'hémoglobine HbS** (article original en anglais) :  
Sicklecellhemoglobinpolymerization » WA Eaton 1990 in Advances in ProteinChemestry.

La correction des exercices 1 à 4 figure dans le manuel de l'élève, p. 350-351.

## 6 Le mode d'action d'une hormone sexuelle

*Cet exercice est une application du modèle de l'induction génique. Il nécessite d'avoir compris le mécanisme par lequel un facteur environnemental peut agir sur l'expression d'un gène et de savoir « lire » le schéma fonctionnel présenté.*

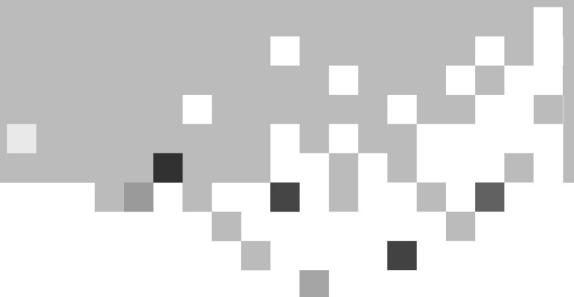
- a. Faux. L'œstradiol n'est pas nécessaire à la production de la protéine A.
- b. Faux. Le récepteur est présent dans la cellule.
- c. Faux. L'œstradiol n'agit pas sur la protéine B.
- d. Faux. L'œstradiol n'agit pas sur le gène.
- e. Vrai.
- f. Vrai.
- g. Vrai.
- h. Faux. N'agit pas sur le génotype.

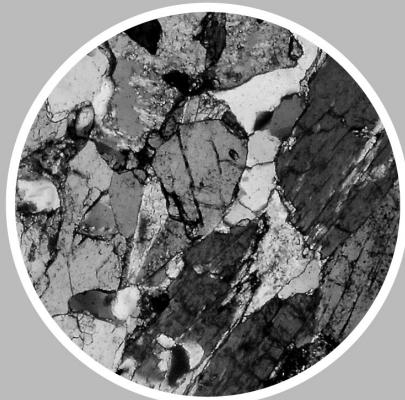
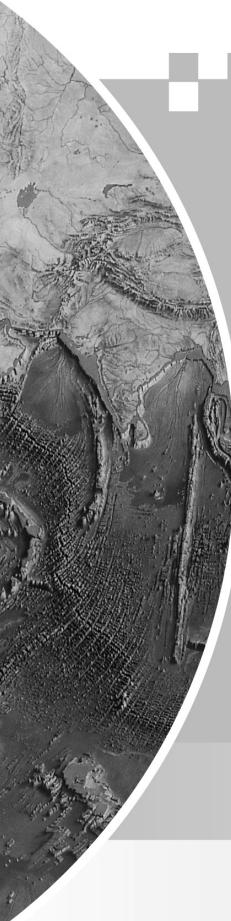
## 7 L'origine de l'albinisme

- 1. La substitution d'un nucléotide G en A modifie le codon 178 TGG, codant pour Trp, en codon TAG qui est un codon stop. Ceci conduit à la synthèse d'une protéine tyrosinase écourtée (177 acides aminés au lieu de 530) qui n'accomplit plus sa fonction et ne permet donc pas de réaliser la synthèse de la mélanine. Les cellules de la peau sont alors dépigmentées.
- 2. La couleur de la peau est une caractéristique macroscopique (phénotype macroscopique) qui dépend de la production de mélanine par les mélanocytes (phénotype cellulaire) elle même dépendante de l'équipement enzymatique de ces cellules (phénotype moléculaire).

## 8 La couleur des hortensias

- 1. La couleur des fleurs d'hortensias dépend de caractéristiques génétiques et du pH du sol.
- 2. Ce même pied présente des fleurs de couleurs différentes. Leur génotype est identique, donc leurs différences s'expliquent par l'influence de facteurs environnementaux tels que le pH.





2

Partie

# La tectonique des plaques : histoire d'un modèle

Chapitre 1	La naissance d'une théorie : la dérive des continents .....	79
Chapitre 2	De la dérive des continents à la tectonique des plaques .....	90
Chapitre 3	La tectonique des plaques : un modèle qui s'enrichit .....	101

## 2 La tectonique des plaques : histoire d'un modèle

### Les objectifs généraux de cette partie

Selon les textes officiels, il ne s'agit pas de redécouvrir les grandes lignes du modèle de la tectonique des plaques qui sont connues depuis le collège mais, en s'appuyant sur une démarche historique, de comprendre comment ce modèle a peu à peu été construit au cours de l'histoire des sciences et de le compléter. On se limite à quelques étapes significatives de l'histoire de ce modèle.

L'exemple de la tectonique des plaques donne l'occasion de comprendre la notion de modèle scientifique et son mode d'élaboration. Il s'agit d'une construction intellectuelle hypothétique et modifiable. Au cours du temps, la communauté scientifique l'affine et le précise en le confrontant en permanence au réel. Il a une valeur prédictive et c'est souvent l'une de ces prédictions qui conduit à la recherche d'un fait nouveau qui, suivant qu'il est ou non découvert, conduit à étayer ou modifier le modèle. La solidité du modèle est peu à peu acquise par l'accumulation d'observations en accord avec lui. Les progrès techniques accompagnent le perfectionnement du modèle tout autant que les débats et controverses.

*NB : à partir de l'exemple de la tectonique des plaques, les élèves seront conduits à comprendre quelques caractéristiques du mode de construction des théories scientifiques.*

Cette partie du programme permet de développer un certain nombre de compétences :

- **Des connaissances :**

- la structure interne du globe déduite de la propagation des ondes sismiques ;
- le concept de lithosphère et d'asthénosphère ;
- la distinction des deux types de croûtes terrestres tant au niveau de leurs propriétés physiques que de leur pétrologie ;
- le mécanisme de l'expansion des fonds océaniques ;
- le modèle global de la tectonique des plaques tel qu'il est établi aujourd'hui, en particulier le rôle des failles transformantes ;
- l'apport des techniques modernes (GPS, tomographie sismique...) à l'enrichissement du modèle de la tectonique des plaques ;
- les mécanismes de la création de nouveau plancher océanique au niveau des dorsales.

- **Des capacités :** cette partie du programme permet de mettre en œuvre diverses activités expérimentales, manipulatoires. Les élèves seront amenés à appliquer des protocoles expérimentaux, ExAO entre autres (propagation des ondes sismiques, modélisation des anomalies magnétiques du fond océanique), utiliser des logiciels (par exemple pour établir les conditions de formation d'un magma au niveau des dorsales par fusion partielle des péridotites), à réaliser des observations (lames minces de roches...).

Les élèves pratiqueront les étapes essentielles de la démarche d'investigation : observation, questionnement, formulation d'hypothèses, expérimentation, raisonnement, communication sous forme de tableaux ou de graphes.

- **Des attitudes :** dans cette partie, les élèves auront l'occasion de réfléchir à la façon dont une théorie, au départ très contestée, se transforme progressivement en un modèle

admis par l'ensemble de la communauté scientifique ; comment également ce modèle s'enrichit progressivement grâce aux apports des techniques modernes renforçant ainsi son efficacité prédictive.

Cette deuxième partie du programme est découpée en trois chapitres :

- le **chapitre 1**, à forte connotation historique, permet de comprendre les difficultés d'acceptation des premières idées de mobilité des continents et comment des observations fondées sur des techniques nouvelles ont permis de dépasser les obstacles du bon sens apparent,
- le **chapitre 2** permet de comprendre comment les données paléomagnétiques et sismiques ont permis de confirmer le modèle de l'expansion océanique ;
- le **chapitre 3** montre comment le modèle de l'expansion océanique est renforcé par son efficacité prédictive : âge des sédiments en contact avec le plancher océanique d'autant plus vieux qu'ils sont éloignés de la dorsale, vitesses de déplacement des plaques confirmées par les données GPS...

## Une correspondance entre le programme officiel et les chapitres du manuel

Connaissances	Les chapitres du manuel
<p><b><i>La naissance de l'idée</i></b></p> <p>Au début du xx<sup>e</sup>, les premières idées évoquant la mobilité horizontale s'appuient sur quelques constatations :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- la distribution bimodale des altitudes (continents/océans),</li><li>- les tracés des côtes,</li><li>- la distribution géographique des paléoclimats et de certains fossiles.</li></ul> <p>Ces idées se heurtent au constat d'un état solide de la quasi-totalité du globe terrestre établi, à la même époque, par les études sismiques. L'idée de mobilité horizontale est rejetée par l'ensemble de la communauté scientifique.</p> <p>La différence d'altitude observée entre continents et océans reflète un contraste géologique.</p> <p>Les études sismiques et pétrographiques permettent de caractériser et de limiter deux grands types de croûtes terrestres : une croûte océanique essentiellement formée de basalte et de gabbro et une croûte continentale constituée entre autres de granite.</p> <p>La croûte repose sur le manteau, constitué de péridotite.</p>	<p><b>chapitre 1</b></p> <p><b>La naissance d'une théorie : la dérive des continents</b> (pages 84-109)</p> <p><b>Les activités pratiques</b></p> <p><b>Act. 1</b> Wegener et la théorie de la dérive des continents</p> <p><b>Act. 2</b> Le rejet de la théorie de Wegener</p> <p><b>Act. 3</b> La découverte de discontinuités à l'intérieur du globe</p> <p><b>Act. 4</b> Deux croûtes distinguées par les ondes sismiques</p> <p><b>Act. 5</b> Les roches de la «Terre solide»</p>

Connaissances	Les chapitres du manuel
<p>Au début des années 1960, les découvertes de la topographie océanique et des variations du flux thermique permettent d'imaginer une expansion océanique par accrétion de matériau remontant à l'axe des dorsales, conséquence d'une convection profonde.</p> <p>La mise en évidence de bandes d'anomalies magnétiques symétriques par rapport à l'axe des dorsales océaniques, corréables avec les phénomènes d'inversion des pôles magnétiques (connus depuis le début du siècle) permet d'éprouver cette hypothèse et de calculer des vitesses d'expansion.</p> <p>Au voisinage des fosses océaniques, la distribution spatiale des foyers des séismes en fonction de leur profondeur s'établit selon un plan incliné.</p> <p>Les différences de vitesse des ondes sismiques qui se propagent le long de ce plan, par rapport à celles qui s'en écartent, permettent de distinguer : la lithosphère de l'asthénosphère. L'interprétation de ces données sismiques permet ainsi de montrer que la lithosphère s'enfonce dans le manteau au niveau des fosses dites de subduction.</p> <p>La limite inférieure de la lithosphère correspond généralement à l'isotherme 1 300 °C.</p> <p>À la fin des années soixante, la géométrie des failles transformantes océaniques permet de proposer un modèle en plaques rigides. Des travaux complémentaires parachèvent l'établissement de la théorie de la tectonique des plaques en montrant que les mouvements divergents (dorsales), décrochants (failles transformantes) et convergents (zones de subduction) sont cohérents avec ce modèle géométrique.</p> <p>Des alignements volcaniques, situés en domaine océanique ou continental, dont la position ne correspond pas à des frontières de plaques, sont la trace du déplacement de plaques lithosphériques au dessus d'un point chaud fixe, en première approximation, dans le manteau.</p>	<p><b>chapitre 2</b></p> <p><b>De la dérive des continents à la tectonique des plaques</b> (pages 110-133)</p> <p><b>Les activités pratiques</b></p> <p><b>Act. 1</b> L'hypothèse d'une expansion océanique</p> <p><b>Act. 2</b> Un apport déterminant : le paléomagnétisme</p> <p><b>Act. 3</b> Paléomagnétisme et expansion des fonds océaniques</p> <p><b>Act. 4</b> La distinction lithosphère - asthénosphère</p> <p><b>Act. 5</b> Des plaques rigides qui se déplacent sur une sphère</p> <p><b>Act. 6</b> Un premier modèle global : la tectonique des plaques</p>
<p>Le modèle prévoit que la croûte océanique est d'autant plus vieille qu'on s'éloigne de la dorsale. Les âges des sédiments en contact avec le plancher océanique (programme de forage sous-marins J.O.I.D.E.S.) confirment cette prédiction et les vitesses prévues par le modèle de la tectonique des plaques.</p> <p>Le modèle prévoit des vitesses de déplacements des plaques (d'après le paléomagnétisme et les alignements de volcans intraplaques). Avec l'utilisation des techniques de positionnement par satellites (GPS), à la fin du xx<sup>e</sup> siècle, les mouvements des plaques deviennent directement observables et leurs vitesses sont confirmées.</p> <p>En permanence, de la lithosphère océanique est détruite dans les zones de subduction et produite dans les dorsales.</p> <p>La divergence des plaques de part et d'autre de la dorsale permet la mise en place d'une lithosphère nouvelle à partir de matériaux d'origine mantélique.</p> <p>Dans les zones de subduction, les matériaux de la vieille lithosphère océanique s'incorporent au manteau.</p> <p>Objectifs et mots-clés. Il s'agit de construire une représentation graphique synthétique du modèle global et de fournir aux élèves les données essentielles sur le fonctionnement d'une dorsale type.</p>	<p><b>chapitre 3</b></p> <p><b>La tectonique des plaques, un modèle qui s'enrichit</b> (pages 134-155)</p> <p><b>Les activités pratiques</b></p> <p><b>Act. 1</b> L'expansion océanique confirmée par les forages</p> <p><b>Act. 2</b> Les données GPS confirment la mobilité des plaques</p> <p><b>Act. 3</b> Une vue globale de la cinématique du globe</p> <p><b>Act. 4</b> La dynamique de la lithosphère précisée</p> <p><b>Act. 5</b> L'origine de la lithosphère océanique élucidée</p>

# La naissance d'une théorie : la dérive des continents

## Activités pratiques

1

### Wegener et la théorie de la dérive des continents (pages 90-91)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>Au début du xx<sup>e</sup> les premières idées évoquant la mobilité horizontale s'appuient sur quelques constatations :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la distribution bimodale des altitudes (continents/océans),</li> <li>- les tracés des côtes,</li> <li>- la distribution géographique des paléoclimats et de certains fossiles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recenser, extraire et organiser des informations à partir documents historiques.</li> <li>- Organiser des informations afin d'établir une relation entre les observations de Wegener et la mobilité horizontale des continents.</li> </ul>

#### 1. Les intentions pédagogiques

Au début du xx<sup>e</sup> siècle, Wegener a construit sa théorie de la dérive des continents à partir d'arguments provenant de différents domaines scientifiques. Il s'agit ici de détailler ces arguments et de montrer en quoi Wegener fut un scientifique visionnaire et « révolutionnaire » par son approche pluridisciplinaire des questions géologiques du moment.

Le **document 1** décrit les idées du début du xx<sup>e</sup> siècle concernant l'origine des chaînes de montagnes et des bassins océaniques à la surface de la Terre (voir page 88). Ce document montre en quoi Alfred Wegener est en opposition avec les conceptions de l'époque.

Les **documents 2** et **3** apportent les principaux arguments de Wegener sur lesquels il appuie sa théorie de la dérive des continents. L'objectif ici est de montrer aux élèves les différents domaines scientifiques des arguments et la pertinence des observations. Un extrait des écrits de Wegener permet de comprendre sa démarche.

Le **document 4** a pour objectif de montrer que Wegener, en s'appuyant cette fois sur les analyses statistiques des altitudes terrestres, distingue une croûte océanique dense d'une croûte continentale plus légère. Les élèves peuvent donc comprendre que la théorie de la contraction de la Terre admise à l'époque pour expliquer les reliefs en surface est remise en cause.

À travers ces activités, les élèves appréhendent la façon dont peut s'élaborer une théorie scientifique.

#### 2. Les pistes de travail

##### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** L'existence d'un océan entre deux continents est expliquée à l'époque par un effondrement des masses continentales entre ces continents. La mobilité verticale

des continents est donc admise. Cependant, le principe de l'isostasie s'oppose à de tels déplacements et Wegener s'appuie sur ce principe pour réfuter la théorie de la contraction de la Terre.

**Doc. 2 :** On observe ici une correspondance quasi parfaite des côtes, des formations rocheuses anciennes (boucliers), de la répartition des fossiles de l'ère primaire. Ces arguments, avancés par Wegener permettent de penser que les continents africain et sud-américain étaient probablement réunis à l'ère primaire.

**Doc. 3 :** La répartition actuelle des dépôts glaciaires d'âge primaire devient cohérente en réunissant les continents concernés comme sur le schéma présenté.

**Doc. 4 :** La distribution bimodale des altitudes terrestres renforce l'idée d'un déplacement horizontal des masses continentales légères (SiAl) sur une couche plus dense (SiMa) formant les fonds océaniques.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

Les données scientifiques présentées par Wegener (données géologiques, paléontologiques, paléoclimatiques et statistiques avec la distribution des altitudes terrestres) vont toutes dans le sens d'un déplacement horizontal des continents depuis l'ère Primaire.

## **3. Ressources complémentaires**

### **■ Manuel numérique Bordas :**

- animation montrant la « dérive des continents » sur une mappemonde avec illustration des arguments de Wegener ;
- fiche documentaire « Biographie de Wegener ».

### **■ Site Planète Terre ENS Lyon :** l'état des connaissances à l'époque de Wegener, la naissance de la théorie de la dérive des continents et son rejet.

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-derive-continents-wegener.xml>

### **■ Bibliographie**

- A. Hallam, *Une révolution dans les Sciences de la Terre*, Éd. Points Science, 1976.
- G. Gohau, *Histoire de la tectonique, des spéculations sur les montagnes à la tectonique des plaques*, Ed. Vuibert, 2010.

## Le rejet de la théorie de Wegener (pages 92-93)

Connaissances	Capacités et attitudes
Ces idées se heurtent au constat d'un état solide de la quasi-totalité du globe terrestre établi, à la même époque, par les études sismiques. L'idée de mobilité horizontale est rejetée par l'ensemble de la communauté scientifique.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recenser, extraire et organiser des informations afin de documents historiques.</li> <li>– Comprendre la nature provisoire, en devenir, du savoir scientifique.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Le **document 1** a pour but :

- de repérer sur un sismogramme les différents types d'ondes sismiques et d'indiquer l'existence d'ondes de volume ;
- de décrire les études sismiques, réalisées au début du xx<sup>e</sup> siècle, qui exploitent les trajectoires supposées des ondes sismiques de volume à l'intérieur du globe terrestre. Ce document montre donc que les sismologues du début du xx<sup>e</sup> siècle (principalement Gutenberg) prouvent que la Terre est solide jusqu'à 2 900 km de profondeur.

Le **document 2** indique en quoi la théorie de Wegener fut rejetée par la communauté scientifique de l'époque et principalement par le géophysicien Jeffreys. Les élèves comprennent que les connaissances de l'époque sur la dynamique du globe terrestre ne sont pas suffisantes pour accepter une théorie pourtant basée sur de solides arguments.

Le **document 3** a pour objectif d'indiquer aux élèves que des avancées scientifiques, ici la découverte de la radioactivité par Marie Curie, peuvent enrichir une théorie. Ainsi, Holmes, partisan de la théorie de Wegener, va proposer un modèle dans lequel le moteur de la dérive des continents serait des mouvements de convection au sein du manteau, eux-mêmes ayant pour origine la chaleur issue de la désintégration d'éléments radioactifs. Un extrait d'un discours de Jeffreys relate la façon dont ce modèle est lui aussi rejeté.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Les études sismiques montrent que la Terre interne est solide jusqu'à une grande profondeur, au moins 2 900 km. Ainsi, du fait de la très grande résistance de cette « Terre solide », les forces invoquées par Wegener pour déplacer les continents en surface sont très insuffisantes.

**Doc. 2 :** Wegener propose trois forces principales susceptibles de déplacer des continents en surface : la rotation de la Terre, l'effet de marée et la force d'Eötvös. Pour Jeffreys, ces forces sont très nettement insuffisantes pour vaincre la résistance de la Terre. Sans moteur convaincant, la théorie de la dérive des continents est alors rejetée.

**Doc. 3 :** Le modèle proposé par Holmes intègre la découverte de la radioactivité par Marie Curie. Pour Jeffreys, l'idée d'une convection mantellique n'est pas convaincante. Il qualifie « d'extraordinaires » les conditions permettant à ce mécanisme d'expliquer la dérive des continents. Il ne donne donc aucune validité scientifique à ce modèle.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

La Terre étant solide jusqu'à une grande profondeur, elle présente une résistance beaucoup trop élevée pour être déformée par les forces invoquées par Wegener.

### **3. Ressources complémentaires**

- **Manuel numérique Bordas** : Fiche documentaire « La controverse Wegener-Jeffreys ».
- **Bibliographie** : A. Hallam, *Une révolution dans les Sciences de la Terre*, Éd. Points Science, 1976.

## La découverte de discontinuités à l'intérieur du globe (pages 94-95)

Connaissances	Capacités et attitudes
Les études sismiques au début du xx <sup>e</sup> siècle mettent en évidence la présence de discontinuités à l'intérieur du globe : la discontinuité de Moho entre la croûte et le manteau, la discontinuité de Gutenberg entre le manteau et le noyau.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recenser, extraire et organiser des informations afin de documents historiques.</li> <li>- Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique.</li> <li>- Manipuler des modèles scientifiques.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Concernant la structure interne du globe, les élèves ont vu au collège la distinction entre la lithosphère et l'asthénosphère. Ici, il s'agit de préciser ce modèle avec la mise en évidence d'enveloppes terrestres majeures : croûte, manteau, noyau. La connaissance des enveloppes croûte et manteau est indispensable aux élèves pour appréhender la suite du chapitre.

Le **document 1** illustre l'utilisation d'un modèle permettant une analogie entre les propriétés des ondes lumineuses et celles des ondes sismiques lorsqu'elles arrivent sur une surface séparant deux milieux dans lesquels les vitesses de propagation des ondes sont différentes. Ce modèle permettra aux élèves de comprendre le comportement des ondes de volume P et S lors de leur passage à l'intérieur du globe.

Le **document 2** décrit une utilisation possible du logiciel Sismolog. En utilisant ce logiciel, les élèves appréhendent les trajectoires des ondes sismiques P à l'intérieur du globe. Ces modélisations sont mises en lien avec les travaux historiques de Gutenberg et Lehmann. Les élèves en déduisent deux discontinuités majeures de la Terre profonde.

À l'aide des **documents 3, 4 et 5** les élèves visualisent comment, à partir d'enregistrements sismiques, Mohorovicic mit en évidence au début du xx<sup>e</sup> siècle, une discontinuité entre la croûte et le manteau, appelée depuis Moho. L'intérêt de l'utilisation de l'outil mathématique est ici mis en exergue.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Les ondes sismiques se propagent dans le globe terrestre comme les ondes lumineuses le font dans les milieux transparents. Concernant leur trajectoire, on parle de rais sismiques par analogie aux rais lumineux. Enfin, sur une surface séparant deux milieux dans lesquels les vitesses de propagation des ondes sont différentes (surface de discontinuité), les ondes sismiques comme les ondes lumineuses sont réfléchies et réfractées selon les lois de Descartes.

**Doc. 2 :** À partir de l'étude des trajectoires des ondes sismiques à l'intérieur du globe terrestre, deux discontinuités sont mises en évidence : une à 2 900 km de profondeur séparant le manteau du noyau externe (discontinuité de Gutenberg) et une à 5 100 km de profondeur séparant le noyau externe et la graine (discontinuité de Lehmann).

**Doc. 3, 4 et 5 :** À la suite d'un séisme situé au sud de Zagreb, Mohorovicic constate la succession de deux trains d'ondes P sur les sismogrammes obtenus dans les stations

éloignées du séisme. Il en déduit que certaines ondes ont suivi un trajet direct (ondes Pg) alors que d'autres sont passées dans des milieux plus profonds où elles ont été accélérées (ondes Pn) avant de regagner la surface – en avance – par rapport aux ondes directes. La connaissance des propriétés des ondes qui se propagent parallèlement à une surface de discontinuité lorsqu'elles arrivent avec un angle d'incidence précis (incidence limite), a permis à Mohorovicic de mettre en évidence une discontinuité entre la croûte et le manteau à 54 km de profondeur sous la Croatie.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'étude de la trajectoire des ondes sismiques de volume, avec les phénomènes de réfraction et de réflexion sur des surfaces de discontinuité, a permis de mettre en évidence différentes discontinuités à l'intérieur du globe terrestre : le Moho entre la croûte et le manteau (entre 7 et 70 km de profondeur), la discontinuité de Gutenberg entre le manteau et le noyau à 2 900 km de profondeur et celle de Lehmann entre le noyau externe et la graine à 5 100 km de profondeur.

## 3. Ressources complémentaires

- **Matériel** : nécessaire pour modéliser le trajet des ondes sismiques dans deux milieux différents.
- **Logiciel Sismolog (Ed. Chrysis)**
- **Site ressources Bordas** : histoire de la science des tremblements de terre Jean-Paul Poirier, Professeur au laboratoire de Géomatériaux.  
<http://www.ipgp.fr/pages/060802.php>

## Deux croûtes distinguées par les ondes sismiques (pages 96-97)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La différence d'altitude observée entre continents et océans reflète un contraste géologique.</p> <p>Les études sismiques permettent de caractériser et de limiter deux grands types de croûtes terrestres : une croûte océanique et une croûte continentale.</p> <p>La croûte repose sur le manteau.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recenser, extraire et organiser des informations afin d'établir une relation entre les données sismiques et la distinction croûte continentale - croûte océanique.</li> <li>- Exprimer et exploiter des résultats en utilisant les technologies de l'information et de la communication.</li> <li>- Percevoir le lien entre sciences et techniques.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

À partir de l'analyse statistique des altitudes terrestres, Wegener avait distingué une croûte continentale et une croûte océanique formant la croûte terrestre. L'objectif est de montrer comment des techniques actuelles, ici des données sismiques récentes, permettent de valider cette distinction.

Le **document 1** décrit une activité expérimentale réalisable en classe par les élèves. Il s'agit de mesurer la vitesse de propagation d'ondes sismiques dans des roches de nature différente. Cette activité nécessite l'utilisation de barres de roches d'environ un mètre de longueur et de  $5 \times 5$  cm de section. Les deux capteurs piézométriques sont reliés à un cordon jack branché à la prise « son » de l'ordinateur. Le logiciel Audacity permet de visualiser l'arrivée des ondes au niveau des deux capteurs avec un certain décalage qui peut être mesuré sur l'écran (*Attention : une erreur s'est glissée dans le tirage des spécimens destinés aux professeurs, l'échelle des temps n'est pas en dix millièmes de seconde mais en cent millièmes de seconde ; cette erreur est corrigée dans le tirage du manuel destiné aux élèves*). Connaissant la distance séparant les deux capteurs et le temps mis par les ondes pour effectuer cette distance, les élèves calculent la vitesse des ondes. Pour une barre de granite par exemple, la vitesse trouvée est d'environ  $4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ce calcul réalisé dans des barres de roches de nature différente montre des vitesses différentes. Un tableau rappelle les vitesses mesurées par les géophysiciens dans les roches constituant les enveloppes terrestres : croûte continentale, croûte océanique et manteau. Il est alors possible de discuter des limites du modèle avec les élèves.

Le **document 2** aborde une technique moderne, la sismique réflexion, qui permet d'établir un profil des structures profondes et d'y superposer les vitesses des ondes P mesurées. L'objectif ici est de montrer qu'une distinction nette est possible entre croûte continentale, croûte océanique et manteau. À noter tout de même, qu'au niveau du golfe du Lion, la zone qui prolonge la croûte continentale est considérée par les géologues comme de la croûte intermédiaire et non de la croûte océanique.

*Attention : sur le profil sismique, les petits carrés gris indiquant les vitesses ne sont pas correctement placés, il faut tous les descendre de 5 mm (cette erreur est corrigée dans le tirage du manuel destiné aux élèves).*

### 2. Les pistes de travail

#### Information déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Dans le modèle présenté, le paramètre qui influence la vitesse de propagation des ondes sismiques est la nature des roches. Les roches ayant une densité différente, la vitesse des ondes sismiques varie.

**Doc. 2 :** Au niveau de la marge du golfe du Lion, différentes vitesses d'ondes sismiques sont enregistrées. En associant ces vitesses avec l'interprétation du profil et les vitesses mesurées dans différentes roches, on distingue trois couches :

- au nord-ouest, une couche où les vitesses sont de l'ordre de  $6,2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , formée de granite : il s'agit de la croûte continentale ;
- vers le sud-est, une couche moins épaisse avec des vitesses de l'ordre de  $6,7$  à  $6,8 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , formée de basaltes et gabbro ; il s'agit de la croûte océanique ;
- une couche sous-jacente où les vitesses sont un peu supérieures à  $8 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  et constituée de péridotite : c'est le manteau supérieur.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La vitesse de propagation des ondes sismiques dépend, en particulier, de la densité des milieux traversés. Les roches ayant des densités différentes, il est possible de distinguer des enveloppes terrestres en fonction des roches qui les constituent. Ainsi, la croûte océanique constituée de basaltes et de gabbros présente des vitesses d'ondes sismiques supérieures à celles qui sont mesurées dans la croûte continentale constituée de granite.

## 3. Ressources complémentaires

### ■ Manuel numérique Bordas :

Vidéo « Mesure de la vitesse de propagation des vibrations dans des roches de nature différentes » (dispositif avec « Audacity »).

■ Power Point d'une conférence de Michel Seranne (CNRS-Université de Montpellier II) :  
L'ouverture du Golfe du Lion et la géodynamique de la Méditerranée Occidentale.  
<http://www.gm.univ-montp2.fr/spip/IMG/pdf/MargeGolfeLion.pdf>

■ Lien : présentation du principe de la sismique réflexion (site IFREMER).  
[http://www.ifremer.fr/drogm\\_uk/Realisation/Vulgar/Sismique/sismic.htm](http://www.ifremer.fr/drogm_uk/Realisation/Vulgar/Sismique/sismic.htm)

## Les roches de la Terre solide (pages 98-99)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La différence d'altitude observée entre continents et océans reflète un contraste géologique.</p> <p>Les études pétrographiques permettent de caractériser et de limiter deux grands types de croûtes terrestres : une croûte océanique essentiellement formée de basalte et de gabbro et une croûte continentale constituée entre autres de granite.</p> <p>La croûte repose sur le manteau, constitué de péridotite.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recenser, extraire et organiser des informations afin d'établir une relation entre les données pétrographiques et la distinction croûte continentale – croûte océanique.</li> <li>– Observer à l'aide du microscope polarisant.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Dans l'activité précédente, les élèves ont compris que la distinction croûte continentale et croûte océanique suggérée par Wegener était confortée par les données sismiques actuelles. L'objectif est de montrer que les données pétrographiques valident aussi cette distinction.

Les **documents 1 à 4** illustrent l'étude macroscopique et microscopique des roches constituant les enveloppes terrestres, granite pour la croûte continentale, basalte et gabbro pour la croûte océanique et péridotite pour le manteau supérieur. Cette activité conduit les élèves à identifier les minéraux et les éléments chimiques majeurs de ces roches et donc des enveloppes considérées.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 à 4 :** Croûtes continentale et océanique se distinguent par les roches qui les constituent et donc par les minéraux suivants :

- pour la croûte continentale, quartz, feldspaths et micas ;
- pour la croûte océanique, feldspaths et pyroxènes ;
- pour le manteau, olivines et pyroxènes.

D'un point chimique, Si et Al sont les éléments principaux de la croûte continentale, Si et Mg ceux de la croûte océanique et Si, Fe et Mg ceux du manteau.

#### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Wegener avait vu juste en distinguant deux types de croûtes terrestres. En effet, si l'on met à part l'oxygène qui est majoritaire dans tous les minéraux :

- les continents, formés essentiellement de granite, contiennent en majorité du silicium (Si) et de l'aluminium (Al), le SiAl pour Wegener ;
- la croûte océanique contient en majorité du silicium et du magnésium (Mg), le SiMa pour Wegener.

En revanche, le modèle actuel diffère de la pensée de Wegener. La croûte continentale est certes moins dense que la croûte océanique, mais elle repose sur le manteau supérieur, et non sur la croûte océanique.

### 3. Ressources complémentaires

#### ■ Manuel numérique Bordas :

- Outil interactif d'aide à la « lecture » de lames minces de roches observées au microscope.

La correction des exercices « **Tester ses connaissances** » figure dans le manuel de l’élève, p. 351.

## 6 | La vitesse des ondes sismiques

Cet exercice peut être proposé en relation avec le document 1 page 92. Il permet de préciser les propriétés des différents types d’ondes sismiques.

Les bonnes réponses sont : **a ; c ; d.**

## 7 | La profondeur du Moho sous les Alpes

1. Voir schéma document 5 page 95.

2. La profondeur du Moho à partir de chaque séisme :

- |                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| – Séisme 2 : 32,4 km | Séisme 3 : 41,1 km |
| – Séisme 4 : 24,9 km | Séisme 5 : 38,3 km |
| – Séisme 6 : 39,4 km | Séisme 7 : 26,2 km |
| – Séisme 8 : 22,6 km |                    |

3. La profondeur du Moho est ici variable. L’épaisseur moyenne de la croûte continentale est de 30 km. On constate qu’au niveau des reliefs élevés des Alpes, la croûte continentale est épaisse (séismes 2, 3, 5 et 6). En bordure de ces reliefs élevés, la croûte continentale est amincie (séismes 4, 7 et 8).

## 8 | Dérive des continents et biodiversité

Les continents étaient réunis en une masse unique appelée Pangée jusqu’à la fin du Trias, il y a 200 Ma. La faune et la flore présentaient alors une certaine homogénéité. La fracturation de la Pangée en plusieurs masses continentales a créé un isolement d’une partie de la faune et de la flore. On constate alors une augmentation du nombre de familles animales, passant de 200 il y a – 200 Ma à 700 il y a – 65 Ma. Une relation peut donc être établie entre la dérive des continents et une augmentation de la biodiversité. La dérive génétique, étudiée en classe de Seconde, peut expliquer cette augmentation du nombre de groupes liée à l’isolement géographique d’une partie des populations animales et végétales.

## 9 | La structure de la Lune interne

Schéma représentant la structure interne de la Lune déduite des données sismiques. On constate une première accélération de la vitesse des ondes P et S vers 50 – 60 km de profondeur avec des vitesses similaires à celle du globe terrestre : il peut s’agir d’une croûte comparable à celle de la Terre. Un ralentissement de la vitesse des ondes P et S est visible vers 300 km jusqu’à 500 km de profondeur puis les vitesses augmentent à nouveau et se stabilisent vers 1 000 km de profondeur. De 60 à 1 000 km de profondeur, il s’agirait du manteau lunaire.

Au-dessous de 1 000 km, on observe un ralentissement des ondes S marquant la présence d’un noyau.

## 10 Une roche énigmatique à la surface de la Terre

L'observation d'une lame mince de lherzolite montre la présence majoritaire de minéraux d'olivine, associés à quelques pyroxènes. La comparaison de la composition chimique d'une lherzolite avec celle d'un basalte, d'un gabbro et d'une péridotite montre :

- une relative pauvreté en  $\text{SiO}_2$ , en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{CaO}$  comme la péridotite ;
- une relative richesse en  $\text{MgO}$  comme la péridotite.

La lherzolite est donc une roche appartenant à la famille des péridotites qui sont les roches qui constituent le manteau terrestre. La présence d'une telle roche est donc surprenante en surface de la Terre. Un contexte tectonique particulier, lié à l'orogenèse pyrénéenne, a permis à cette roche mantellique d'affleurer aujourd'hui. À l'étang de Lerz (d'où le nom lherzolite), on « marche sur le manteau ».

# De la dérive des continents à la tectonique des plaques

## Activités pratiques

1

### L'hypothèse d'une expansion océanique (pages 112-113)

Connaissances	Capacités et attitudes
Au début des années 1960, les découvertes de la topographie océanique et des variations du flux thermique permettent d'imaginer une expansion océanique par accrétion de matériau remontant à l'axe des dorsales, conséquence d'une convection profonde.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recenser, extraire et organiser des informations à partir de documents historiques.</li> <li>– Organiser des informations afin d'établir une relation entre les différentes découvertes scientifiques et la théorie de Hess.</li> <li>– Comprendre la nature provisoire, en devenir, du savoir scientifique.</li> </ul>

#### 1. Les intentions pédagogiques

À l'issue du premier chapitre, les élèves ont compris comment Wegener a imaginé sa théorie de la dérive des continents et le rejet de cette théorie par la communauté scientifique de l'époque. Nous nous situons ici quelques dizaines d'années plus tard, après la Seconde Guerre mondiale et nous allons voir qu'une meilleure connaissance des océans a permis de réactualiser et de préciser les idées de Wegener.

Les **documents 1 et 2** permettent aux élèves d'établir un lien entre les avancées technologiques et les découvertes scientifiques. En effet, on décrit ici la technique utilisée pendant les campagnes océanographiques afin d'effectuer des relevés de la topographie des fonds océaniques ainsi que les résultats obtenus. L'origine de ces reliefs ne fut pas expliquée dans un premier temps.

Le **document 3** illustre la répartition du flux géothermique à la surface de la Terre. L'objectif ici est de montrer que ces mesures ont permis d'attribuer un rôle important au phénomène de convection mantellique imaginé par Holmes dans la dynamique globale de la Terre.

À l'aide du **document 4**, on montre que l'ensemble des nouvelles données scientifiques de l'époque ont amené Hess à proposer la théorie du « double tapis roulant ». Les élèves peuvent alors comparer cette théorie avec celle de Wegener.

#### 2. Les pistes de travail

##### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** À l'aide de sonars, il est possible d'établir des relevés topographiques des fonds océaniques. Les reliefs mis en évidence au fonds des océans, en particulier les dorsales océaniques, ont grandement participé à la construction du modèle de la

tectonique des plaques avec l'idée d'une expansion des fonds océaniques à partir de ces dorsales.

**Doc. 3 :** Le manteau semble plus chaud à l'aplomb des dorsales et de certains bassins situés à l'intérieur des arcs insulaires. L'existence d'inégalités thermiques au sein du manteau terrestre suggère un rôle important joué par la convection.

**Doc. 4 :** La théorie de Wegener et celle de Hess-Dietz admettent l'existence d'une croûte continentale plus légère se déplaçant horizontalement à la surface de la Terre. Cependant, Hess pense que les continents, solidaires du manteau supérieur, seraient transportés sur une sorte de double tapis roulant et non en fendant les fonds océaniques comme le suggérait Wegener. De plus, pour Hess et Dietz, la croûte océanique ne supporterait pas les continents mais se formerait au niveau de dorsales et disparaîtrait au niveau des fosses, d'où l'expression « sea floor spreading ». Enfin, Hess propose comme moteur à cette mobilité horizontale des continents l'évacuation, par le phénomène de convection, de la chaleur du manteau issue de désintégations nucléaires.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La mise en évidence des dorsales océaniques présentant un flux géothermique très élevé, associée à l'idée d'une convection mantellique énoncée par Holmes, a conduit Hess et Dietz à proposer l'hypothèse d'une expansion des fonds océanique en « double tapis roulant ».

## 3. Ressources complémentaires

- Site Planète Terre ENS Lyon : l'histoire de la tectonique des plaques.  
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-histoire-tectonique-plaques.xml>

## Un apport déterminant : le paléomagnétisme (pages 114-115)

Connaissances	Capacités et attitudes
La découverte du paléomagnétisme et d'une dérive apparaente des pôles va faire renaître l'idée d'une mobilité horizontale des continents.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recenser, extraire et organiser des informations à partir de documents historiques</li> <li>– Recenser, extraire et organiser des informations afin d'établir une relation entre le paléomagnétisme et la mobilité des continents.</li> <li>– Utiliser les TICE.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Nous allons voir que la découverte du paléomagnétisme a été fondamentale dans l'avancée des idées sur la mobilité horizontale des continents. Afin de comprendre ces découvertes, il est nécessaire de connaître les caractéristiques du champ magnétique terrestre actuel. C'est l'objet des documents 1 et 2.

Le **document 1** invite les élèves à déterminer la position des pôles Nord géographique et magnétique à l'aide de Google Earth. Il s'agit de préciser les coordonnées en latitude et longitude des pôles. On montre que ces deux pôles ne sont pas confondus mais proches l'un de l'autre. Une estimation de la distance les séparant est possible.

Le **document 2** expose toutes les caractéristiques du champ magnétique terrestre actuel en précisant l'orientation de l'aiguille d'une boussole selon les lignes de champ.

À l'aide du **document 3**, les élèves comprennent qu'une roche contenant des minéraux particuliers peut garder en mémoire les caractères du magnétisme terrestre du lieu et de l'époque de sa formation. Les caractéristiques de ce magnétisme fossile sont mesurables et peuvent être exploitées pour déterminer la position d'un paléopôle à une époque donnée et en un lieu donné.

Le **document 4** expose deux cas : la position du paléopôle en différents lieux mais à une époque précise et la position du paléopôle en un même lieu mais à différentes époques. En considérant qu'il ne peut y avoir qu'un seul pôle Nord magnétique à une époque donnée, les élèves perçoivent l'importance du paléomagnétisme dans la réactualisation de l'idée d'une mobilité horizontale des continents.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Les pôles Nord magnétique et géographique sont localisés précisément à l'aide de Google Earth avec le fichier « magnetisme1S.kmz ». Les latitudes et les longitudes sont précisées. Les deux pôles ne sont pas confondus et sont distants d'environ 600 km. Une étude similaire est possible avec les pôles Sud.

**Doc. 2 :** Dans l'hémisphère Nord comme dans l'hémisphère Sud, l'aiguille de la boussole pointe en direction du pôle Nord magnétique.

**Doc. 3 :** Une roche telle qu'un basalte dévie l'aiguille d'une boussole. La présence de ce magnétisme fossile au sein de ces roches est exploitée.

**Doc. 4 :** Le document **a** décrit la position du paléopôle déterminée à partir d'échantillons de même âge mais prélevés sur des continents différents. On constate que pour cette époque plusieurs paléopôles sont trouvés. Or il ne peut y avoir qu'un seul pôle Nord magnétique à une époque donnée. Ce sont donc les continents sur lesquels ont été réalisés les prélèvements qui se sont déplacés.

L'étude des paléopôles présentés sur le document **b** permet de penser que les deux continents (Amérique et Afrique) étaient réunis jusqu'à - 250 Ma. Ensuite, ils se sont séparés et ont dérivé pour occuper leur position actuelle.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

En considérant qu'il ne peut y avoir qu'un seul pôle Nord (ou un seul pôle Sud) magnétique à une époque donnée, la seule façon d'établir une correspondance entre les différents paléopôles trouvés est d'imaginer une mobilité horizontale des continents.

## 3. Ressources complémentaires

- Site de l'**Institut de Physique du Globe de Paris : le paléomagnétisme**. Une vidéo d'un entretien avec Y. Gallet et des articles expliquant le paléomagnétisme :  
<http://www.ipgp.fr/pages/0214.php>
- Le site de l'**Université de Kyoto apportera de nombreux renseignements sur :**
  - le magnétisme terrestre <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>
  - les variations d'intensité de ce magnétisme « *Animation of secular variation in geomagnetic total intensity for the last 400 years* » <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/anime/index.html>
- **Bibliographie**
  - A. Hallam, *Une révolution dans les Sciences de la Terre*, Éd. Points Science, 1976.

## Paléomagnétisme et expansion des fonds océaniques (pages 116-117)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La mise en évidence de bandes d'anomalies magnétiques symétriques par rapport à l'axe des dorsales océaniques, corrélables avec les phénomènes d'inversion des pôles magnétiques (connus depuis le début du siècle) permet d'éprouver cette hypothèse et de calculer des vitesses d'expansion.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Organiser des informations afin d'établir une relation entre le paléomagnétisme et l'expansion des fonds océaniques.</li> <li>- Manipuler des modèles scientifiques.</li> <li>- Percevoir le lien entre sciences et techniques.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Cette activité est en lien étroit avec la précédente : le paléomagnétisme, avec l'étude des paléopôles, a apporté un argument majeur en faveur d'une mobilité horizontale des continents. Nous allons voir ici que le paléomagnétisme des fonds océaniques va être déterminant.

Le **document 1** expose les techniques utilisées dans les années 1950 pour enregistrer le magnétisme des fonds marins. L'interprétation par les élèves des enregistrements obtenus nécessite des précisions concernant l'existence d'inversions du champ magnétique terrestre au cours des temps géologiques. Les élèves peuvent aussi constater une symétrie de part et d'autre de la dorsale des anomalies magnétiques.

Le **document 2** a pour objectif de rendre moins abstrait les enregistrements décrits dans le document 1. On illustre ici une manipulation réalisable par les élèves à l'aide d'un modèle simple. Les aimants sont disposés de façon à ce que l'enregistrement du champ magnétique montre des variations avec des valeurs positives et des valeurs négatives. Il s'agit d'établir un lien avec les enregistrements décrits dans le document 1.

Le **document 3** expose les relations qui ont été établies dans les années 1960 entre différentes données : les anomalies magnétiques des fonds océaniques (en « peau de zèbre »), le calendrier des inversions magnétiques et l'âge des basaltes des fonds océaniques. À partir de ces relations, les élèves constatent une symétrie par rapport à l'axe de la dorsale de l'ensemble de ces données. Ils peuvent alors calculer une vitesse d'expansion des fonds océaniques dans cette région de l'Atlantique Nord.

Le **document 4** permet de revenir à une approche historique avec la description des travaux de Vine et Matthews. Les élèves comprennent comment ces deux chercheurs ont rapproché les données du paléomagnétisme avec l'idée de Hess du « double tapis roulant ». Ainsi, l'idée de l'expansion des fonds océaniques était acceptée.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** La présence d'anomalies magnétiques enregistrées au fond des océans est à relier avec la mise en évidence d'inversions du champ magnétique au cours des temps géologiques et l'existence dans les basaltes (les aimants dans le modèle) d'un magnétisme fossile. Une anomalie positive s'explique par l'addition du champ magnétique actuel avec le champ paléomagnétique de même polarité (aimants « normaux » dans le modèle). Une anomalie négative s'explique par la présence d'un champ paléo-

magnétique de polarité inverse (aimants « inverses » dans le modèle) qui se soustrait au champ actuel.

**Doc. 3 :** La mise en relation des données du paléomagnétisme avec l'âge des basaltes des fonds océaniques permet de calculer une vitesse d'expansion. Le résultat trouvé ici pour l'Atlantique Nord est d'environ 1,8 cm par an de part et d'autre de la dorsale soit une vitesse d'expansion de 3,6 cm par an.

**Doc. 4 :** Les travaux de Vine et Matthews permettent de comprendre que le plancher océanique se met en place à partir de magma remontant à l'axe de la dorsale. En refroidissant, ce magma acquiert une aimantation dont la polarité est normale ou inverse selon la période. Ainsi, en s'éloignant de l'axe de la dorsale les anomalies magnétiques + et – alternent et l'âge des fonds océaniques augmente.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les données majeures du paléomagnétisme décrites sont les inversions du champ magnétique terrestre au cours des temps géologiques et les anomalies magnétiques au fond des océans formant des bandes parallèles entre elles et symétriques par rapport à l'axe de la dorsale. Ces données, mises en relation avec l'âge des basaltes des fonds océaniques, ont apporté la preuve que le plancher océanique est en perpétuelle expansion.

## 3. Ressources complémentaires

- Matériel : Teslamètre ; différents aimants.

## La distinction lithosphère – asthénosphère (pages 118-119)

Connaissances	Capacités et attitudes
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Au voisinage des fosses océaniques, la distribution spatiale des foyers des séismes en fonction de leur profondeur s'établit selon un plan incliné.</li> <li>– Les différences de vitesse des ondes sismiques qui se propagent le long de ce plan, par rapport à celles qui s'en écartent, permettent de distinguer : la lithosphère de l'asthénosphère.</li> <li>– L'interprétation de ces données sismiques permet ainsi de montrer que la lithosphère s'enfonce dans le manteau au niveau des fosses dites de subduction.</li> <li>– La limite inférieure de la lithosphère correspond généralement à l'isotherme 1 300 °C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recenser, extraire et organiser des informations à partir de modèles.</li> <li>– Exprimer et exploiter des résultats, à l'écrit, à l'oral, en utilisant les technologies de l'information et de la communication.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

En classe de Quatrième, les élèves ont déjà abordé la distinction lithosphère – asthénosphère et la notion de plaques lithosphériques rigides se déplaçant sur l'asthénosphère moins rigide. Il s'agit ici de montrer aux élèves les données qui ont permis aux scientifiques de proposer une telle distinction.

Les **documents 1** et **2** apportent des arguments scientifiques qui ont amené à imaginer, dans les zones de subduction, le plongement d'une zone froide dans un manteau plus chaud.

Le **document 1** illustre l'importance de l'étude des ondes sismiques. Les élèves comprennent qu'un lien est établi entre la propagation des ondes sismiques dans les zones de subduction et la densité des milieux traversés.

Le **document 2** montre une modélisation des isothermes au niveau des zones de subduction déduite de la mesure du flux géothermique dans ces zones. Ce modèle est en accord avec les données du document 1.

Le **document 3** apporte une touche historique avec les travaux de Wadati – Benioff concernant la répartition des foyers sismiques dans les zones de subduction et les interprétations d'Oliver et Isacks. On comprend ici la distinction entre une lithosphère rigide et l'asthénosphère ductile.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** La vitesse des ondes sismiques dépend en partie de la densité des milieux traversés. Les anomalies thermiques déduites de l'étude des enregistrements des ondes permettent de repérer une zone froide à l'aplomb de la fosse océanique et une zone chaude sous l'arc volcanique.

**Doc. 2 :** Le modèle des isothermes déduit des mesures du flux géothermique dans les zones de subduction montre une zone froide qui plonge sous la zone volcanique. Cette zone froide est à l'origine de l'accélération des ondes sismiques (séisme superficiel du doc. 1).

**Doc. 3 :** La présence sous le continent, au niveau du Japon, de foyers sismiques en grande profondeur, disposés selon un plan incliné, sur une épaisseur d'environ 100 km, est interprétée comme une couche rigide qui s'enfonce dans le manteau. Cette couche rigide et froide (doc. 1 et 2) appelée lithosphère est distinguée de l'asthénosphère ductile, la base de la lithosphère correspondant à l'isotherme 1 300 °C.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'étude des ondes sismiques et du flux géothermique dans les zones de subduction montre la présence d'anomalies thermiques avec une zone froide qui plonge dans le manteau plus chaud. Ces données sont en accord avec celles tirées de la présence et de la répartition des foyers sismiques en profondeur qui montrent une zone rigide de 100 km d'épaisseur qui s'enfonce dans le manteau. Ainsi, lithosphère rigide et froide est distinguée de l'asthénosphère ductile et plus chaude.

## 3. Ressources complémentaires

- **Logiciel :** Sismolog (Ed. Chrysis)
- **Site de l'Institut de Physique du Globe de Paris :** Banque de données des derniers séismes de magnitude supérieure à 6,3 : <http://geoscope.ipgp.fr/>

### Activités pratiques

5

## Des plaques rigides qui se déplacent sur une sphère (pages 120-121)

Connaissances	Capacités et attitudes
À la fin des années soixante, la géométrie des failles transformantes océaniques permet de proposer un modèle en plaques rigides.	<ul style="list-style-type: none"><li>– Recenser, extraire et organiser des informations afin d'établir une relation entre les failles transformantes et le déplacement des plaques rigides.</li><li>– Manipuler des modèles scientifiques.</li></ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

En classe de Quatrième, les élèves ont vu que la partie externe de la Terre est formée de plaques lithosphériques rigides animées de mouvements à l'origine des déformations. Ces déplacements ont été jusque-là décrits sur un planisphère. Or, ces déplacements s'effectuent sur le globe terrestre, c'est-à-dire sur une surface sphérique. Il s'agit ici de comprendre comment des plaques rigides se déplacent sur une sphère en exposant les découvertes historiques associées.

Le **document 1** présente la géométrie des failles transformantes, tranchées profondes perpendiculaires à l'axe des dorsales océaniques.

Le **document 2** situe les foyers sismiques le long d'une dorsale océanique. L'objectif ici est de montrer une continuité entre l'axe des dorsales et une partie des failles transformantes. Ainsi, les élèves comprennent que ces failles correspondent à des frontières de plaques en coulissement.

Le **document 3** propose une manipulation réalisable en classe à l'aide d'un globe terrestre (sur lequel apparaît le relief des fonds océaniques), d'un papier calque et d'un

compas. Cette manipulation est à mettre en relation avec le **document 4** qui expose l'hypothèse « plaquiste » de Morgan en 1967 en lien avec la cinéétique eulérienne. On comprend ici que l'étude des failles transformantes permet de reconstituer le déplacement des plaques rigides sur le globe.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Les failles transformantes décalent l'axe des dorsales océaniques. Il s'agit d'une frontière de plaque en coulissement.

**Doc. 2 :** Les failles transformantes ne présentent une activité sismique que sur la partie qui décale l'axe des dorsales. Cette localisation appuie le fait que ces failles transformantes sont des frontières de plaques en coulissement.

**Doc. 3 et 4 :** Les failles transformantes sont assimilées à des petits cercles centrés sur le même axe. Ainsi, le déplacement des plaques rigides sur le globe correspond à une rotation autour d'un axe, dit axe eulérien, passant par le centre de la Terre. Les pôles de rotation appelés pôles eulériens (distincts des pôles géographiques) permettent de reconstituer les déplacements des plaques.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La découverte des failles transformantes par Wilson a permis de comprendre et de reconstituer le déplacement de plaques rigides sur le globe terrestre. Ainsi, l'hypothèse « plaquiste » proposée par Morgan avec le déplacement de plaques lithosphériques à la surface du globe a pu être argumentée.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas :** Animation présentant les failles transformantes et le mouvement des plaques autour de leur pôle de rotation.
- **Site ressources Bordas :** lien pour une vidéo présentant la découverte du rift océanique (extrait de l'opération Famous) : les pillows-lavas, les failles, l'environnement.  
Document Cerimes : <http://www.cerimes.fr/la-banque-dimages/les-pillow-lava.html>

### Activités pratiques

### 6

## Un premier modèle : la tectonique des plaques (pages 122-123)

Connaissances	Capacités et attitudes
<ul style="list-style-type: none"><li>- Des travaux complémentaires parachèvent l'établissement de la théorie de la tectonique des plaques en montrant que les mouvements divergents (dorsales), décrochants (failles transformantes) et convergents (zones de subduction) sont cohérents avec ce modèle géométrique.</li><li>- Des alignements volcaniques, situés en domaine océanique ou continental, dont la position ne correspond pas à des frontières de plaques, sont la trace du déplacement de plaques lithosphériques au dessus d'un point chaud fixe, en première approximation, dans le manteau.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Comprendre la nature provisoire, en devenir, du savoir scientifique.</li><li>- Recenser, extraire et organiser des informations afin d'établir une relation entre le volcanisme de point chaud et la théorie de la tectonique des plaques.</li></ul>

## 1. Les intentions pédagogiques

Cette double page montre comment, à la fin des années 1960, l'ensemble des données ont été regroupées dans une théorie appelée tectonique des plaques. Cette théorie, acceptée à présent par la communauté scientifique, a été enrichie par la découverte des points chauds qui semblaient, *a priori*, ne pas s'y intégrer.

Le **document 1** décrit les travaux de jeunes chercheurs, en particulier Le Pichon, qui aboutissent à proposer un premier modèle global avec une surface terrestre découpée en six plaques lithosphériques ainsi que les mouvements aux frontières.

Les **documents 2 et 3** exposent le volcanisme de point chaud. On montre ici comment l'explication de ce volcanisme, qui bien qu'étant le plus souvent intraplaque, s'intègre tout de même au modèle de la tectonique des plaques.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** En intégrant l'ensemble des données géologiques de l'époque (données sismiques, volcaniques, paléomagnétiques, cinétiques...), les chercheurs Morgan, Mc Kenzie et Le Pichon proposent un premier modèle où la surface de la Terre est découpée en six plaques lithosphériques. Les mouvements relatifs des plaques aux différentes frontières sont précisés : mouvements divergents aux dorsales, mouvements décrochants au niveau des failles transformantes, mouvements convergents aux fosses océaniques.

**Doc. 2 :** Le volcanisme de point chaud est, dans la plupart des cas, situé au sein même des plaques et non aux frontières des plaques. Il semble donc échapper au modèle global proposé dans le document 1.

**Doc. 3 :** La théorie des points chauds proposée par Morgan permet d'expliquer les alignements d'îles volcaniques. La direction de la plaque Pacifique au-dessus du point chaud d'Hawaï a été NNO-SSE de – 65 Ma à – 44 Ma puis NO-SE par la suite. La vitesse de déplacement de la plaque est d'environ 8,5 cm par an.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Le volcanisme intraplaque de points chauds est expliqué par Morgan. Un point chaud, quasi immobile dans le manteau profond, alimente le volcanisme de surface et perfore régulièrement la plaque lithosphérique qui se déplace au-dessus. Il en résulte des alignements d'îles volcaniques, les îles les plus éloignées du volcanisme actuel étant les plus anciennes. Ce phénomène apporte donc un argument supplémentaire à la théorie de la tectonique des plaques.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas :** Animation présentant le volcanisme de point chaud (explication de l'alignement des îles volcaniques).

La correction des exercices « **Tester ses connaissances** » figure dans le manuel de l’élève, p. 351.

## 6 | Une vitesse d’expansion variable d’un océan à l’autre

Les bonnes réponses sont : **a** et **d**.

## 7 | Le paléomagnétisme, un marqueur de la mobilité continentale

Le vecteur inclinaison de l’aimantation thermo-rémanente (ATR) du bloc A est tangent à la ligne de champ magnétique actuel du lieu. Concernant les trapps du Deccan (bloc B), le vecteur inclinaison n’est pas tangent à la ligne de champ magnétique actuel du lieu. Afin de rendre ce vecteur tangent à une ligne de champ, le bloc B doit être déplacé à environ 20° de latitude vers le sud. Le paléomagnétisme, avec l’aimantation thermo-rémanente des roches des trapps du Deccan, permet de penser que ces trapps se sont formées au niveau du point chaud de l’île de la Réunion située à 21° de latitude sud.

## 8 | La séparation du bloc corso-sarde et du continent

1. Les mesures paléomagnétiques montrent deux directions différentes pour l’axe passant les pôles magnétiques de l’époque. Or, à une époque donnée (ici le Permien), il ne peut y avoir qu’une seule direction pour cet axe. La seule façon de les faire correspondre est de ramener la Corse contre la côte provençale.
2. À partir du point A, l’isobathe – 2000 m longe les côtes provençale et languedocienne ainsi que les côtes de la Corse et de la Sardaigne. Le bassin algéro-provençal prend donc une forme en V.
3. Les données paléomagnétiques et bathymétriques amènent donc à penser que le bloc corso-sarde s’est séparé de la France à la faveur d’une rotation vers le sud-est, avec comme axe de rotation le point A.

## 9 | Une célèbre faille active : la faille de San Andreas

Les déformations associées à l’activité de la faille de San Andreas sont spectaculaires et apparaissent nettement dans le paysage. On observe de grandes fractures sur des centaines de kilomètres avec des cours d’eau et des vallées, décalés horizontalement. Parmi les trois grands types de failles distingués par les géologues, la faille de San Andreas est une faille décrochante.

Les géologues assimilent la faille de San Andreas à une faille transformante. Ces grandes failles sont des structures qui décalent l’axe des dorsales océaniques sur de grandes distances avec une importante activité sismique. En effet, la faille de San Andreas est située en continuité de la dorsale du Pacifique-Est dont on constate qu’elle décale l’axe sur plusieurs milliers de kilomètres. De plus, elle possède une importante activité sismique.

## 10 | Une microplaqué dans le Pacifique

La région étudiée se situe dans la continuité de la dorsale du Pacifique-Est à proximité de l’île de Pâques. Les géologues qualifient cette région de microplaqué « île de Pâques » pour diverses raisons. En premier lieu, elle possède une intense activité sismique sur ses contours tout comme les plaques lithosphériques de grande dimension. De plus, ses contours sont des reliefs considérés comme étant des frontières de plaques : une petite partie de la dorsale du Pacifique-Est, des failles transformantes et une zone de compression due à la rotation de la microplaqué.

# La tectonique des plaques : un modèle qui s'enrichit

## Activités pratiques

1

### L'expansion océanique confirmée par les forages (pages 136-137)

Connaissances	Capacités et attitudes
Le modèle prévoit que la croûte océanique est d'autant plus vieille qu'on s'éloigne de la dorsale. Les âges des sédiments en contact avec le plancher océanique (programme de forage sous-marins J.O.I.D.E.S) confirment cette prédition et les vitesses prévues par le modèle de la tectonique des plaques.	Saisir et exploiter des informations sur carte ou SIG.

#### 1. Intentions pédagogiques

Cet ensemble d'activités, motivantes pour les élèves, les place en position de recherche d'arguments en faveur de l'expansion océanique précédemment déduite de mesures géophysiques : données paléomagnétiques, flux géothermique et topographie des fonds océaniques.

Partant du modèle de l'expansion océanique et de leurs acquis sur la nature du plancher océanique d'une part, l'existence d'une sédimentation océanique d'autre part, les élèves peuvent trouver des conséquences prévisibles du modèle.

Les supports de ces activités permettent aussi de replacer une étape de l'histoire de la construction du modèle de la tectonique. En quelques dizaines d'années, grâce aux progrès de la technologie, l'étude du domaine sous-marin (qui représente les  $\frac{3}{4}$  de la surface du globe) a donné au modèle de la tectonique des plaques des arguments irréfutables : expansion océanique et disparition de la lithosphère ; elle a aussi permis de confirmer la dualité de nature entre la croûte océanique et continentale. La cohérence des résultats obtenus dans tous les forages fait que la théorie de la tectonique des plaques est désormais fondée sur des faits d'observation directs.

À travers le **document 1**, on s'informe des campagnes de forages des fonds océaniques permettant d'accéder au basalte et aux sédiments du plancher océanique. On souligne les aspects technologiques liés au carottage ainsi que l'accélération après la Seconde Guerre mondiale des projets des grands instituts océanographiques ainsi que la volonté internationale de mutualiser les efforts. Utilisés depuis longtemps par les prospecteurs de pétrole au niveau du plateau continental, les forages profonds débutent en 1964. Le programme de forage J.O.I.D.E.S (Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling), mis au point en 1968 par l'ensemble des laboratoires océanographiques des États-Unis, est étendu en 1974 à une collaboration internationale (France, Allemagne Fédérale, Royaume-Uni, Japon, URSS sous le nom de programme

I.P.O.D) puis en 1984 à d'autres participants (dont le Canada et l'Australie) sous le nom O.D.P (Ocean Drilling Program). Au milieu des années 1990, près de mille puits sont forés dans l'océan mondial. Ainsi, le puits 504B du programme I.P.O.D (international program for Ocean Drilling) au large du Costa Rica, sous 4 000 mètres d'eau et 400 mètres de sédiments, a traversé presque 1 200 m de croûte océanique, des basaltes aux dolérites et aux gabbros.

On utilise les résultats des sites de forage visualisables sous Google Earth (qui permet aussi de superposer la morphologie du fond des océans au niveau de la zone concernée) pour faire éprouver les conséquences prévisibles du modèle « du double tapis roulant » émis par Hess en 1960. On peut constater l'épaisseur croissante de sédiments ainsi que la profondeur croissante du toit du basalte au fur et à mesure de l'éloignement de la ride médioatlantique (sites 16 à 21) mais aussi la symétrie. Ces données permettent de construire, avec un tableur, une représentation graphique, centrée sur la ride Atlantique Sud, et figurant l'évolution de l'épaisseur de sédiments et de la profondeur du toit du basalte.

Tous les prélèvements montrent que les conséquences prévisibles du modèle sont vérifiées.

Le **document 2** permet d'éprouver la solidité du modèle de l'expansion en corrélant les vitesses d'expansion déduites des sédiments et celles déduites des inversions paléomagnétiques dans l'Atlantique Nord. On peut ainsi faire calculer pour différentes périodes les vitesses d'ouverture (Miocène, Éocène, Crétacé supérieur et inférieur ainsi que Jurassique).

Le **document 3** montre que la vitesse d'ouverture est variable selon la dorsale (sans entrer dans le détail des dorsales rapides et lentes).

Enfin, les **documents 1 à 3** offrent des supports entraînant les élèves à mieux se situer dans l'espace et dans le temps : les SIG (Google Earth), les cartes 2D construites à partir de données de forages à différentes échelles, ainsi que la construction possible d'une coupe ouest-est au niveau de l'Amérique du Sud, permettent aux élèves de changer d'échelles et de mode de visualisation.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Le processus de formation des fonds océaniques par expansion à partir des dorsales océaniques implique que ceux-ci soient de plus en plus anciens en s'éloignant des rides ; en conséquence, les accumulations sédimentaires doivent être de plus en plus anciennes et épaisses pour atteindre leur maximum en bordure des continents. Si le modèle de l'expansion océanique est valide alors les vitesses d'expansion doivent être confirmées.

Le schéma demandé doit représenter des sédiments qui s'épaissent à mesure que l'on s'éloigne de la dorsale.

**Doc. 2 :** Les valeurs trouvées montrent de bonnes corrélations : ainsi, sur la partie est de la dorsale, les valeurs d'expansion trouvées à partir des sédiments sont de  $1,53 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  (Éocène),  $1,70 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  (Crétacé supérieur) et  $1,71 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  (Crétacé inférieur). La comparaison avec les vitesses déduites de l'âge et de la position des anomalies paléomagnétiques concordent bien ( $1,52 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  pour l'Éocène,  $1,58 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  pour le Crétacé supérieur et  $1,68 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  pour le Crétacé inférieur).

**Doc. 3 :** La comparaison de la vitesse d'ouverture de différents domaines océaniques peut se réaliser en comparant la surface de sédiments de mêmes âges à l'affleurement.

Plus cette surface est importante plus la vitesse d'ouverture est élevée. La dorsale Est-Pacifique ainsi que la dorsale Indienne du sud-est sont des dorsales où la vitesse d'expansion est élevée (au contraire de la dorsale de l'Atlantique Nord ou encore la dorsale Atlantique-océan Indien). Les valeurs opposées actuelles peuvent être représentées par un taux d'ouverture de  $1,5 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$  dans le jeune océan de la mer Rouge à  $18 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$  pour la dorsale est-pacifique.

Dans l'océan Atlantique, les âges les plus anciens reconnus sont Jurassique ( $-180 \text{ Ma}$ ) puis, successivement, Crétacée et Tertiaire en se rapprochant de la ride. Il en va de même dans l'Atlantique Sud, avec cependant un décalage de temps, l'ouverture de celui-ci débutant au Crétacé inférieur ( $-140$  à  $-110 \text{ Ma}$ ). Nulle part la croûte océanique est plus vieille que le Jurassique inférieur ( $-180 \text{ Ma}$ ). Aucun forage n'a rencontré de croûte océanique paléozoïque, ni même triasique confirmant la dualité océans-continents et la jeunesse des océans qui s'oppose à la vieillesse des continents.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La possibilité d'accès direct aux roches constitutives du plancher océanique permet de confirmer le modèle de l'expansion océanique de Hess. L'âge, l'épaisseur, la succession des sédiments dans les colonnes stratigraphiques obtenues par forages confirment partout le modèle du « double tapis roulant ». L'âge et la profondeur du toit du basalte confirment aussi l'expansion. De plus, les vitesses d'ouverture déduites des sédiments concordent parfaitement avec les données géophysiques obtenues à partir des anomalies paléomagnétiques.

## 3. Ressources complémentaires

### ■ Liens sur le site ressources Bordas :

- Entretiens avec Mathilde Cannat, chercheur IPGP-CNRS, et des membres de l'équipe qui aborde les différents aspects des campagnes de géosciences marines VIDEO : <http://www.ipgp.fr/pages/062003.php>
- Données sur l'âge des sédiments : <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/crustalimages.html>
- Données cartographiques sur l'épaisseur des sédiments : <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/sedthick/sedthick.html>
- Des informations sur le site “**European Consortium for Ocean Drilling Research (ECORD)**” : <http://www.ecord.org/edu/education.html> et un accès aux forages de 1968 jusqu'en 2011 : <http://brg.ldeo.columbia.edu/logdb/>
- Atlas des formations superficielles et des données morpho-bathymétriques : <http://wwz.ifremer.fr/drogm/Cartographie/Atlas-numeriques>
- Article de Xavier Le Pichon (1977), « *1967-1977 ; ten years of marine geology and geophysics* », retracant les arguments en faveur de l'expansion océanique. Nature (Macmillan Journals), 1977-06, Vol. 267, N. 5614, p. 765-769 : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/5206/>
- Vidéo présentant une campagne de forages du « Glomar Challenger » (technique de carottage, exploitation des échantillons...). Les commentaires sont en anglais mais les images suffisent.  
[http://www.criticalpast.com/video/65675043177\\_The-Glomar-Challenger\\_Doc-M-N-A-Peterson\\_Discovery-in-the-Deep\\_Animation](http://www.criticalpast.com/video/65675043177_The-Glomar-Challenger_Doc-M-N-A-Peterson_Discovery-in-the-Deep_Animation)

## La mobilité des plaques confirmée par les données GPS (pages 138-139)

Connaissances	Capacités et attitudes
Le modèle prévoit des vitesses de déplacements des plaques (d'après le paléomagnétisme et les alignements de volcans intraplaques). Avec l'utilisation des techniques de positionnement par satellites (GPS) à la fin du XX <sup>e</sup> siècle les mouvements des plaques deviennent directement observables et leurs vitesses confirmées.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réaliser des mesures sur le terrain pour comprendre le principe du GPS.</li> <li>- Saisir et exploiter des données sur des logiciels.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Dans le cadre de l'histoire de la construction du modèle, une fois le modèle de l'expansion océanique validé par les données obtenues à partir de forages, les techniques de géopositionnement vont permettre de visualiser directement des mouvements au niveau des plaques lithosphériques.

La démarche employée entraîne les élèves à discuter un modèle établi et à la préciser. Le GPS ou Global Positioning System a été développé par le département de la défense américaine en 1978. Il permet le positionnement précis en latitude, altitude et longitude de n'importe quel lieu quelles que soient l'heure et les conditions météorologiques. Cette technique a permis de valider le déplacement identique (vitesse angulaire constante) de tous les points d'une même plaque et donc, par là même de confirmer l'existence de cette plaque. De plus, la précision des mesures (de l'ordre du millimètre) a permis de préciser les comportements des plaques à leur frontière.

À travers le **document 1**, on comprend que grâce au nombre important de satellites utilisés, cette technique permet de suivre le déplacement de tout récepteur au sol. À la différence d'autres techniques de géopositionnement comme DORIS ou ARGOS, ce sont les satellites qui émettent un signal et l'objet au sol qui reçoit. On mesure alors le temps de trajet de l'impulsion. En le multipliant par la vitesse de la lumière, on en déduit la distance entre le satellite et la station. Si trois satellites effectuent une mesure simultanée, on peut calculer n'importe quelle position par triangulation. Les données GPS liées à la tectonique des plaques ont une précision de l'ordre du millimètre. Pour mesurer un déplacement d'une plaque, on matérialise un point de manière simple. Il suffit en fait de poser un « clou », qui est un cylindre en inox. À sa verticale, une antenne est positionnée, la mesure obtenue permet de trouver la position du « clou » en latitude, longitude et altitude. Quelques centaines de récepteurs sont fixés au sol et fournissent donc des mesures en continu (réseau mondial de l'IGS : International GPS System). La relative simplicité de l'installation au sol, la multiplicité et la continuité des mesures ainsi que leur précision constituent les atouts du GPS pour l'étude du déplacement des plaques lithosphériques.

À partir d'une banque de données GPS, l'élève peut construire ou exploiter des graphiques correspondant à la latitude ou longitude de la balise en fonction du temps. Ce travail de construction vectorielle afin de déduire la résultante des vitesses longitudinale et latitudinale est l'occasion de travailler en relation avec les mathématiques.

On exploite les **documents 2 et 3** afin de montrer que les mouvements enregistrés par GPS confirment les données paléomagnétiques en Islande.

Enfin, le **document 4** permet de montrer que les données GPS concordent avec les données du volcanisme de point chaud.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** L'intérêt du GPS (ou Global Positionning System) est qu'il permet le positionnement précis de n'importe quel lieu en longitude, latitude et altitude, quelles que soient l'heure et les conditions météorologiques.

**Doc. 2 et 3 :** Les mouvements enregistrés par GPS confirment les données paléomagnétiques en Islande. Les enregistrements du **document 2** permettent de comprendre comment les données graphiques peuvent être représentées par des vecteurs dont la résultante donne la direction et la vitesse de déplacement du point (balise REYK). Une application peut alors être réalisée pour la balise HÖFN : direction NE et vitesse de  $20,5 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ . Les mouvements sont donc opposés de part et d'autre de la dorsale avec des vitesses similaires. Le **document 3** permet d'estimer la vitesse d'ouverture au niveau de la dorsale de Kolbeinsey à partir des âges des différents basaltes. Le calcul, au niveau de la partie nord de la dorsale émergée, permet d'obtenir des valeurs d'environ  $2,2 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$  ce qui concorde avec les données GPS.

La comparaison des données obtenues par des mesures géologiques sur une moyenne de 3 Ma et des données « instantanées GPS » confirme et précise les directions et vitesses de déplacements des plaques lithosphériques.

**Doc. 4 :** Le calcul du coefficient directeur des droites de latitude et de longitude ( $yb\text{-}ya / xb - xa$ ) donne les valeurs de + 3,5 pour la latitude (déplacement vers le nord) et de - 6,6 pour la longitude (déplacement vers l'ouest). En utilisant une construction vectorielle, on peut évaluer la vitesse de déplacement de la balise HILO en moyenne (sur 10 ans) à  $7,5 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$  direction nord-ouest. La vitesse de déplacement, calculée entre les îles de West Maui et de Haleakala, donne une valeur de  $7,78 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$ , celle obtenue entre les îles Walanoe et Koolau, une valeur de  $4,27 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$ , celle entre les îles Kahoolawa et Koala de  $16,5 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$ . On peut ainsi constater que la direction du déplacement est sensiblement la même mais que la vitesse varie de façon importante au cours du temps en augmentant de  $4,27$  à  $16,6 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$ . On est ainsi amené à constater que les données GPS fournissent une image « instantanée » du déplacement d'une plaque lithosphérique alors que les données du volcanisme de point chaud offrent une image de l'évolution de la vitesse de déplacement d'une plaque au cours de périodes géologiques plus longues.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les mesures GPS apportent une preuve au déplacement des plaques lithosphériques. Il ressort de ces techniques que l'on obtient des vitesses « instantanées » de déplacement des plaques parfaitement en accord avec les valeurs moyennes calculées sur plusieurs Ma à partir de données géologiques (données paléomagnétiques et volcanisme de point chaud). Le nombre important de balises au sol permet de vérifier que la vitesse angulaire de tous les points d'une même plaque est identique et donc de confirmer qu'une plaque lithosphérique est une unité rigide non déformable.

## 3. Ressources complémentaires

### ■ Site ressources Bordas :

- Ressource sur les systèmes embarqués, de leur fonctionnement à leurs principales missions en particulier le système NAVSTAR-GPS et GALILEO <http://www.educnet.education.fr/orbito/system/default.htm>
- Banque de données de la NASA sur les déplacements de 2000 balises GPS depuis environ une dizaine d'années <http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>

## Une vue globale de la cinématique du globe (pages 140-141)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>Le modèle prévoit des vitesses de déplacements des plaques (d'après le paléomagnétisme et les alignements de volcans intraplaques. Avec l'utilisation des techniques de positionnement par satellites (GPS), à la fin du xx<sup>e</sup> siècle, les mouvements des plaques deviennent directement observables et leurs vitesses confirmées.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réaliser des mesures sur le terrain pour comprendre le principe du GPS.</li> <li>- Saisir et exploiter des données sur des logiciels.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Cet ensemble d'activités est une suite directe des activités précédentes afin de généraliser à l'ensemble du globe l'apport des mesures obtenues par géopositionnement permettant ainsi d'avoir une vision globale de la cinématique des plaques et de redéfinir le nombre et le contour des principales plaques tectoniques.

Les **documents 1 et 2** montrent comment, grâce aux données GPS, le modèle initial à 6 plaques a été enrichi à 11 puis 12 plaques et comment les frontières de plaques ont été précisément définies. Il s'agit donc de montrer que la multitude des données établissant le déplacement des plaques a permis de créer des modèles de cinématique intégrant l'ensemble des méthodes de mesure aussi bien géologiques que géodésiques. Il est intéressant de montrer que, loin d'être fixiste, la vision de la tectonique des plaques évolue par la confrontation des différents modèles. Enfin, dans ce cadre, il peut être motivant de réfléchir à la validité d'un modèle à un instant donné, preuve en est, les nombreux articles et ouvrages traitant du nombre de plaques et microplaques lithosphériques à la surface du globe. La confrontation du modèle initial à 6 plaques en 1967 et d'un modèle actuel à 14 plaques peut permettre de faire émerger la problématique. Cette étude est l'occasion de distinguer les mouvements relatifs des plaques visualisés au niveau des frontières de plaques et les mouvements « réels » des plaques calculés à partir d'un repère fixe.

Les **documents 2 et 3** indiquent comment le modèle NUVEL-1 (Northwestern University VELOCITY), établi en 1990, propose une synthèse des déplacements relatifs des plaques. Construire le modèle revient à préciser le nombre et la géométrie des plaques d'une part, estimer les valeurs de leur rotation d'autre part. Plusieurs types de représentations de ce modèle sont proposés : le premier, présenté dans le **document 2**, donne, pour chaque frontière de plaque, la direction et l'amplitude du mouvement de part et d'autre de cette frontière. Il s'agit donc de mouvements relatifs dont les vitesses moyennes sont estimées sur les trois derniers millions d'années à partir de données géologiques.

Le **document 3** permet de comprendre que les mêmes données NUVEL-1 peuvent être exprimées en considérant cette fois un repère supposé fixe (par exemple les points chauds ou encore une plaque comme la plaque antarctique). On obtient alors un modèle illustrant des mouvements « absolu » moyens sur trois millions d'années. Ce modèle peut être mis en relation avec un modèle géodésique mesurant des données absolues « instantanées ».

Le système DORIS comprend un réseau permanent d'une cinquantaine de balises émettrices réparties de façon homogène à la surface de la Terre, ainsi qu'un récepteur embarqué sur satellite. Les signaux radioélectriques émis en permanence par les balises au sol, sont reçus par le satellite avec une fréquence décalée par rapport à la fréquence émise (effet Doppler). Ils fournissent ainsi une mesure de la vitesse relative du satellite par rapport à la Terre. De l'analyse de ces mesures, on déduit entre autres la trajectoire précise du satellite ainsi que la position des balises, leurs déplacements à la surface terrestre.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** On constate que six plaques « nouvelles » apparaissent par rapport au modèle initial à 6 plaques défini par Le Pichon en 1968 : il s'agit des plaques Philippines, Cocos, Caraïbes, Nazca, Arabie et Amérique du Nord/Sud. Ce sont les données GPS d'une part et les données sismiques d'autre part qui ont permis de définir ces « nouvelles plaques » aux frontières des plaques majeures, elles sont souvent caractérisées par des déplacements rapides (par exemple la plaque de Nazca).

**Doc. 2 :** Diverses frontières sont repérables par la direction et le sens des « vecteurs déplacement » : des frontières où il y a expansion océanique (divergentes), subduction ou collision (convergence) et frontières transformantes (coulissement). Des vitesses variables (indiquées au niveau des vecteurs) caractérisent les zones concernées.

**Doc. 3 :** La comparaison de ces deux modèles montre une excellente corrélation (par exemple au niveau de l'île de La Réunion mais aussi de Papeete) qui tend à prouver une certaine constance dans les vitesses et les directions des déplacements.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les données géologiques et les données géodésiques (GPS) permettent de construire des modèles cinématiques exprimant des mouvements relatifs ou absous des plaques sur une moyenne de trois millions d'années. Les données GPS et DORIS permettent de calculer des déplacements absous « instantanés ». La corrélation entre ces différents modèles est très bonne ce qui tend à prouver une certaine stabilité temporelle dans la localisation et l'intensité des mécanismes à l'origine des déplacements lithosphériques.

## 3. Ressources complémentaires

### ■ Site ressources Bordas :

- Informations sur le système DORIS <http://www.aviso.oceanobs.com/fr/doris/index.html>
- Article de Xavier Le Pichon (1970) « *Plate kinematics and tectonic* » montrant comment les premiers calculs de cinématique ont été réalisés par Le Pichon bien avant le géopositionnement *Actes Coll. ALLEGRE-MATTAUER*, 1-73. Open Access version : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/5027/>

## La dynamique de la lithosphère précisée (pages 142-143)

Connaissances	Capacités et attitudes
En permanence, de la lithosphère océanique est détruite dans les zones de subduction et produite dans les dorsales. Dans les zones de subduction, les matériaux de la vieille lithosphère océanique s'incorporent au manteau.	Recenser, extraire et organiser des informations de tomographie sismique.

### 1. Les intentions pédagogiques

Il s'agit de montrer comment, grâce à la tomographie sismique, l'intérieur du globe est devenu accessible et comment cette technique a permis de confirmer la dynamique de la lithosphère. La compréhension du principe sur lequel fonctionne la tomographie est intéressant à plusieurs titres : il permet de réinvestir les notions sur la nature et la propagation des ondes sismiques (Partie 2 – Chapitre 1), il permet de comprendre que l'obtention des anomalies de propagation repose sur l'acceptation d'un modèle sismique du globe (le modèle PREM) ce qui permet d'appréhender de façon rigoureuse les cartes tomographiques.

Cette double page d'activités permet de comprendre comment, grâce à ces techniques de tomographie sismique au début des années 1990, le devenir de la lithosphère océanique au niveau des zones de subduction a pu être précisé. On peut faire prendre conscience aux élèves que la tomographie sismique est une technique actuelle essentielle pour cartographier les mouvements mantelliques à l'origine des déplacements tectoniques et que les différentes données recueillies sont à l'origine de différents modèles de circulation mantellique. C'est une nouvelle fois la preuve que les données obtenues font évoluer le modèle.

Le **document 1** permet d'aborder sommairement la technique de tomographie (du grec *tomē*, coupe) sismique. Tout comme la tomographie médicale, elle permet d'imager l'intérieur d'une structure. La technique est fondée sur le trajet et la vitesse de propagation des ondes sismiques à l'intérieur du globe terrestre. Pour l'étude des structures superficielles, les signaux sismiques sont générés à partir d'un trou de forage, puis enregistrés par un ensemble de géophones (ou d'hydrophones) dans un second trou de forage. Pour l'étude des structures profondes, les ondes sismiques générées lors des tremblements de terre sont utilisées. Le principe de la tomographie est fondé sur le fait que la vitesse de propagation des ondes sismiques dans un matériau est relative à ses propriétés mécaniques et thermiques.

Les vitesses de propagation obtenues sont comparées aux prévisions de vitesse données par le modèle PREM (Preliminary Reference Earth Model de Dziewonski et Anderson en 1981) qui est un modèle sismologique de la Terre représentant l'évolution de la vitesse des ondes P et S en fonction de la profondeur. Par exemple, la présence d'un corps plus froid accélère les ondes sismiques qui le traversent, un corps plus chaud ralentit les ondes : on obtient donc des anomalies de propagation de vitesse par rapport à une vitesse théorique. En multipliant les stations d'enregistrement, on peut déterminer la géométrie spatiale de ces anomalies de vitesse. Par des traitements mathématiques de l'ensemble des données, une coupe et une représentation 3D de la répartition spatiale des vitesses de propagation des ondes sismiques peuvent être obtenues.

Les différents supports présentés dans les **documents 2 et 3** (cartes 2D, coupe en 2D et bloc diagramme en 3D) entraînent les élèves à travailler dans les trois dimensions de l'espace et à passer d'une représentation à une autre.

Pour analyser le **document 3**, on pourra utiliser, en la simplifiant, l'information suivante : la zone de transition entre la fin de l'asthénosphère et le début du manteau inférieur se manifeste par un changement dans la nature des minéraux (l'olivine est progressivement remplacée par la phase spinelle, elle-même remplacée par un assemblage pérovskite et magnésiowüstite à 670 km) ce qui induit une modification de la densité et de la viscosité à la transition manteau supérieur et manteau inférieur. Il semblerait donc logique que les plaques subductées ne franchissent pas cette barrière, ce qui est le cas pour la coupe au niveau de la mer Égée mais pas pour l'Amérique centrale.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** La tomographie sismique est basée sur l'étude des vitesses de propagation des ondes sismiques à l'intérieur du globe, et plus précisément sur l'existence de vitesses plus élevées (ou plus faibles) que la moyenne attendue si les matériaux traversés étaient thermiquement homogènes. Le **document 2** montre que deux zones mantelliques peuvent avoir des comportements différents. Les cartes des vitesses montrent une très bonne corrélation entre la position des régions lentes et chaudes en profondeur (rouge foncé) et la présence des dorsales océaniques en surface, qui sont les zones où les plaques lithosphériques sont fabriquées en continu à partir du manteau, par accrétion de lithosphère. Ainsi, à 100 km de profondeur sous la dorsale pacifique existe une forte anomalie négative de vitesse des ondes S traduisant l'existence d'une zone plus chaude. Au contraire, à l'aplomb de la péninsule indienne existe une zone mantellique présentant une forte anomalie positive de vitesse traduisant un matériau plus froid que l'environnant, une faible anomalie positive peut être aussi repérée au niveau du Pérou et du Chili, zone de subduction. Il est important d'insister sur le fait que la carte obtenue correspond aux anomalies à 100 km de profondeur et donc qu'une autre carte, réalisée à une profondeur plus grande montrerait une autre image du manteau.

**Doc. 3 :** On peut visualiser le devenir de la lithosphère océanique par les zones bleues indiquant une forte anomalie positive des vitesses. Au niveau de la mer Égée, la zone froide pénètre jusqu'à environ 670 km de profondeur puis elle s'incorpore au manteau. En revanche, la coupe au niveau de l'Amérique centrale montre un plongement beaucoup plus important de la lithosphère océanique jusqu'à 2900 km, c'est-à-dire jusqu'à la limite manteau inférieur et noyau.

La reconstitution en 3D de l'intérieur du manteau supérieur et inférieur indique une répartition complexe des zones froides et chaudes, plus ou moins en continuité, et suggère des mouvements verticaux mais aussi horizontaux de matière dans le manteau.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les données tomographiques sont des données essentielles pour argumenter d'une dynamique de la lithosphère. Cette dernière est créée au niveau des dorsales à partir de matériau chaud induisant, jusqu'à 200 km de profondeur, une très forte anomalie négative de la vitesse des ondes sismiques. La lithosphère disparaît dans le manteau au niveau des zones de subduction, caractérisées en profondeur par une accélération de la vitesse des ondes.

Actuellement, la tomographie sismique est un outil indispensable pour identifier les mouvements de matière dans le manteau à l'origine de la dynamique et du renouvellement de la lithosphère océanique.

### 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas** : animation présentant le principe de la tomographie sismique.
- **Site ressources Bordas** : site « les dossiers du CNRS » concernant différentes méthodes pour caractériser la disparition de la lithosphère au niveau des zones de subduction dont la tomographie.

## L'origine de la lithosphère océanique élucidée (pages 144-145)

Connaissances	Capacités et attitudes
La divergence des plaques de part et d'autre de la dorsale permet la mise en place d'une lithosphère nouvelle à partir de matériaux d'origine mantellique.	Établir le lien entre amincissement de la lithosphère, remontée, dépressurisation et fusion partielle de l'asthénosphère sous-jacente et formation d'une nouvelle lithosphère.

### 1. Les intentions pédagogiques

Il s'agit de fournir les données essentielles sur le fonctionnement d'une dorsale type en relation avec la création de la lithosphère océanique. La démarche visée consiste à mettre en relation différents paramètres géophysiques et géochimiques (le changement d'état solide-liquide, les compositions chimiques des roches, l'évolution de la pression et de la température en profondeur) avec le mouvement divergent des plaques au niveau des dorsales.

Une démarche d'investigation peut être mise en œuvre avec l'ensemble des documents proposés : elle permet de comprendre dans quelles conditions se forme la lithosphère océanique au niveau des dorsales. Pour cela, des données vues auparavant peuvent être mobilisées : flux géothermique, expansion océanique et divergence de part et d'autre de la dorsale, roches constitutives de la croûte océanique et du manteau. De nouveaux faits d'observation (faille Vema) ou expérimentaux (diagramme de fusion partielle sous presse à enclume de diamant) permettent d'envisager un scénario de formation des roches de la croûte océanique. Ce scénario peut être éprouvé grâce à un logiciel de simulation permettant de réaliser une fusion partielle de la péridotite, d'en déduire les conditions de pression et température nécessaires et de faire le lien avec le géotherme de dorsale.

On retrouve dans le **document 1** des données sur la faille Vema. Explorée en 1988 grâce aux progrès réalisés sur l'autonomie des submersibles, la zone de fracture Vema, avec une longueur de près de 320 km et une profondeur des plus importantes constitue l'une des failles les plus étudiées au monde. Du point de vue morphologique, la topographie de la zone transformante est marquée par une dépression de 5 000 mètres de profondeur. L'origine de cette faille est à rechercher dans les différences de vitesse linéaire d'écartement en relation avec la distance du pôle eulérien (chapitre 2).

On envisage dans le **document 2** des arguments en faveur de l'origine mantellique des roches de la croûte océanique. L'accent peut être mis sur la mise au point, dans les années 1965-1970, d'un instrument fondamental pour l'étude expérimentale de la fusion des matériaux : la presse à enclume de diamant. Actuellement, le domaine de pression et température accessible par cette technique couvre pratiquement tout le domaine de pression et de température que l'on rencontre à l'intérieur de la Terre et des planètes telluriques : pression jusqu'à 500 GPa (5 millions d'atmosphères) et température jusqu'à 5 000 K.

Dans le **document 3**, on montre qu'en appliquant au logiciel de simulation des conditions bien particulières de pression et de température, on obtient la fusion débutante de la péridotite.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Les différentes roches constitutives de la lithosphère océanique sont le basalte, le gabbro et la péridotite.

**Doc. 2 :** La comparaison de la péridotite, du basalte et gabbro donne une bonne corrélation pour la teneur en silicium et en oxygène. En revanche, on peut observer une teneur beaucoup plus élevée dans les basaltes et gabbros des éléments chimiques suivants : calcium, sodium, potassium (dans une moindre mesure fer) et beaucoup plus faible pour l'aluminium et le magnésium. En admettant que la péridotite est la roche source, on peut constater, par comparaison, que sa fusion partielle à 15 % produit un liquide ayant chimiquement la composition des basaltes. La différence de composition chimique entre le liquide de fusion et la péridotite source s'explique par le fait que tous les minéraux d'une roche ne fondent pas à la même température et les éléments chimiques vont avoir des comportements différents lors de la fusion. Certains éléments sont dits « hygromagmatophiles » c'est-à-dire qu'ils passent préférentiellement dans le liquide. C'est le cas des alcalins K, Na, Ca.

**Doc. 3 :** L'ensemble des couples de points pression-température (P en kbar, T en °C) forme une courbe appelée solidus regroupant les conditions minimales nécessaires au début de fusion. Quelques points peuvent être identifiés : (0,3 ; 1 100) ; (2 ; 1 120) ; (4 ; 1 150) ; (6,5 ; 1 200). On peut ensuite rechercher si ces conditions sont réunies au niveau océanique. La comparaison du géotherme océanique moyen et celui d'une dorsale montre une différence majeure. Pour des profondeurs situées entre 10 et 25 km, la température existante est beaucoup plus élevée sous une dorsale. En suivant l'évolution des conditions à l'aplomb d'une dorsale, de la profondeur vers la surface, on observe qu'il y a une baisse très importante de la pression sans qu'il y ait de diminution nette de température. Ces conditions particulières permettent de créer des conditions favorables au début de fusion partielle des péridotites.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La réponse au problème posé nécessite de faire une synthèse des différentes informations apprises. Ainsi, la divergence des plaques de part et d'autre de la dorsale (Activités pratiques 3) entraîne un amincissement de la lithosphère et une remontée locale des péridotites asthénosphériques qui subissent donc une baisse de pression sans quasi-diminution de température (références aux images de flux géothermique et de tomographie sismique à l'aplomb des dorsales). Ces conditions sont à l'origine de la fusion partielle de la péridotite et de la production d'un liquide magmatique de composition chimique différente de la roche source. Moins dense, ce liquide s'élève et s'accumule dans une chambre magmatique. La cristallisation lente en profondeur produit des gabbros alors que l'injection de magma vers la surface produit des basaltes. Enfin, la péridotite résiduelle constitue la base de cette lithosphère nouvellement formée.

## 3. Ressources complémentaires

### ■ Site ressources Bordas :

Article de D. H. Green and A. E. Ringwood (1967) : *The genesis of basaltic magmas*.

Contributions to Mineralogy and Petrology 1967b ; Volume 15, Number 2, p103-190 <http://petrology.oxfordjournals.org/content/49/4/587.full#ref-22>

### ■ Logiciel :

Pression, Température et formation des roches (Éd. JEULIN).

La correction des exercices « Tester ses connaissances » figure dans le manuel de l’élève, p. 351.

## 6 Fusion partielle de la péridotite

1. Le géotherme est représenté par une courbe qui traduit l’augmentation de la température des roches en fonction de la profondeur (et donc de la pression). À l’aplomb d’une dorsale la température moyenne en profondeur est supérieure à celle existant à l’aplomb d’une plaine abyssale ou encore d’une zone de subduction. Ceci est particulièrement marqué dans les 100 premiers kilomètres.
2. La fusion partielle de la péridotite nécessite que le géotherme recoupe les conditions de température et de pression représentées par la droite « solidus ». Seul le géotherme de dorsale permet cette fusion débutante entre 20 et 120 km de profondeur car il recoupe le solidus de la péridotite.
3. Ce document ne permet pas d’expliquer la formation de magma dans les zones de subduction car le géotherme de subduction ne recoupe à aucune profondeur le solidus de la péridotite. Ceci pose le problème de l’origine du magmatisme de subduction.

## 7 Les sédiments océaniques et l’expansion de l’Atlantique Nord

1. Ces deux forages de l’Atlantique Ouest, réalisés par carottage et distants de 710 km l’un de l’autre, montrent une succession de sédiments dont l’épaisseur et l’âge sont différents. Ainsi, le forage le plus proche de la dorsale (forage B) est constitué de 399 mètres de sédiments avant d’atteindre le basalte alors que le forage A correspond à une carotte de 720 mètres. Les sédiments les plus âgés du forage A sont représentés par le Crétacé inférieur âgé de – 105 Ma alors que les sédiments les plus vieux du forage B correspondent au Miocène terminal âgé de – 7 Ma. Les deux forages montrent sensiblement une sédimentation identique en ce qui concerne le quaternaire et le pliocène.
2. Ces sédiments confirment le modèle de l’expansion océanique. Dans ce modèle, le plancher océanique formé au niveau de la dorsale s’éloigne de part et d’autre de celle-ci en subissant une subsidence. Les sédiments surmontant le basalte correspondent aux sédiments s’étant déposés juste après le refroidissement du basalte nouvellement formé. Ainsi, plus on s’éloigne de la dorsale plus le toit du basalte est ancien ce qui confirme le modèle. L’enfoncement de la lithosphère océanique est confirmée par la profondeur de l’océan (4482 m au niveau du forage A pour seulement 3 883 m pour le forage B) ainsi que par l’épaisseur des sédiments (720 m pour A contre 399 m pour B).
3. La vitesse d’ouverture estimée à partir du forage B est de  $5 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  selon la formule  $v = d/t$ , avec  $d = 350 \times 10^5 \text{ cm}$  et  $t = 7 \times 10^6 \text{ an}$ .  
La vitesse d’ouverture estimée à partir du forage A est de  $1,01 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  selon la formule  $v = d/t$ , avec  $d = 1 060 \times 10^5 \text{ cm}$  et  $t = 105 \times 10^6 \text{ an}$ .

La vitesse d’ouverture est donc variable, la vitesse moyenne estimée à partir de nombreux relevés est de  $2,5 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$ .

## 8 Les roches lunaires

1. À partir des planches de détermination, les minéraux suivants sont identifiables : du pyroxène (minéraux bruns et bleu violacé), des feldspaths (minéraux blancs et grisâtres), de l’olivine (minéraux multicolores).

2. L'absence de microlithes et de verre ainsi que la taille réduite des cristaux permet de proposer une texture microgrenue ayant subit un refroidissement rapide mais non brutal donc relativement proche de la surface.
3. La roche terrestre qui correspond le mieux à la composition minéralogique de cette roche lunaire est le gabbro. Il s'agit donc d'un microgabbro lunaire formé non par tectonique des plaques (absente sur la Lune) mais suite à une fusion liée aux impacts météoritiques.

## 9 | Le séisme d'Haïti était-il prévisible ?

1. La construction des vecteurs permet de qualifier et de quantifier les mouvements absolus de trois balises GPS au sol : SCUB appartenant à la plaque nord-américaine, JAMA et CRO1 appartenant à la plaque caraïbe. Les vecteurs peuvent être tracés par construction vectorielle simple sur la zone rouge agrandie décalquée en utilisant les données GPS du tableau du document 1.
2. La balise SCUB montre un déplacement en direction du nord-ouest (vitesse de  $7 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$ ), les balises JAMA et CRO1 indiquent un déplacement en direction du nord-est (respectivement de vitesse  $9,3 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  et  $16,8 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$ ). La plaque nord-américaine se déplace donc vers le nord-ouest alors que plaque caraïbe se déplace vers le nord-est.
3. Les frontières de plaques figurées au niveau des îles de Cuba et Haïti sont des failles transformantes. La ville de Port-au-Prince se situe entre deux ensembles de ces failles appartenant à une microplaque (plaque Gonave). Une zone de subduction existe et scinde l'île d'Haïti en deux selon une direction nord-ouest sud-est.

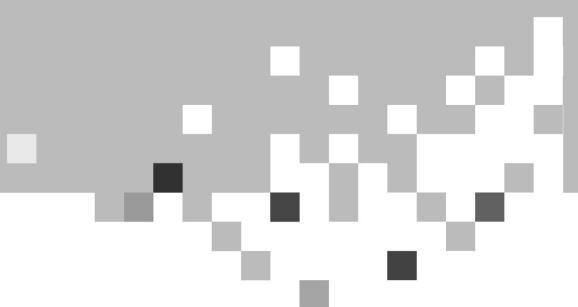
Les contraintes s'accumulent au niveau de ces failles comme le montre la localisation des séismes majeurs de magnitude  $> 7$  ayant eu lieu entre 1562 et 1946. (*Attention : une erreur s'est glissée dans la légende de la carte : c'est magnitude  $> 7$  et non  $< 7$ .*) La zone qui a tremblé appartient à l'extrémité d'une de ces failles transformantes résultant du mouvement opposé des plaques nord-américaine et caraïbe.

## 10 | Dorsale et point chaud

*Cette activité visant à reconstituer et comprendre les mouvements des plaques indienne et africaine associée au point chaud de l'île de la Réunion nécessite une bonne connaissance de la notion de point chaud.*

1. Les mouvements absolus de trois balises SEY1, REUN et DGAR permettent de caractériser la direction et la vitesse de déplacement des plaques indienne et africaine. La plaque africaine se déplace en direction du nord-est avec une vitesse de  $2,33 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  au niveau de la balise REUN et de  $2,98$  au niveau de la balise SEY1. La plaque indienne se déplace sensiblement dans la même direction de  $5,9 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$ .
2. La carte permet, à l'aide des points chauds, de calculer la vitesse de déplacement moyenne de la plaque africaine depuis 40 Ma entre les points A et B. La vitesse obtenue est de  $3,125 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  ( $1\ 250 \times 10^5 / 40 \times 10^6$ ) ce qui globalement est plus rapide qu'actuellement.
3. Le logiciel permet de faire apparaître le mouvement relatif de la plaque indienne par rapport à la plaque africaine en rendant la balise REUN fixe. Le vecteur résultant correspond à une direction nord-est mais à une vitesse de  $2,15 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$ .

**4.** La dorsale de Carlsberg de direction NO-SE provoque un déplacement de la plaque africaine vers le SO et un déplacement de la plaque indienne vers le NE. Ce déplacement lié à l'ouverture au niveau de la dorsale de Carlsberg se surajoute au déplacement global des deux plaques africaine et indienne dans la même direction NE. Leurs vitesses de déplacement actuelles différentes s'expliquent par la dorsale de Carlsberg. En effet, avant son apparition, les différents volcans de points chauds appartenaients à la même plaque, la dorsale a alors pris naissance au niveau des points B-C (autrefois confondus mais aujourd'hui distants de 1 100 km) représentant un édifice volcanique de même âge. Son fonctionnement crée ainsi une vitesse différentielle entre les deux plaques actuelles.



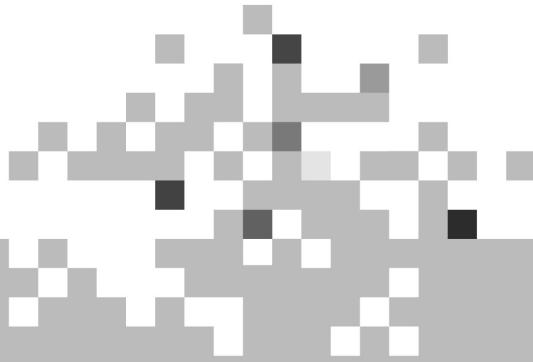
# 3

Partie



## Enjeux planétaires contemporains

Chapitre 1	Tectonique globale et ressources géologiques locales .....	121
Chapitre 2	Tectonique des plaques et recherche d'hydrocarbures .....	124
Chapitre 3	Pratiques agricoles et gestion de l'environnement .....	133
Chapitre 4	Pratiques alimentaires et perspectives globales .....	144



## Les objectifs généraux de cette partie

Conformément au programme, le manuel regroupe dans cette partie des chapitres portant sur des sujets très différents mais qui s'inscrivent dans la thématique « Enjeux planétaires contemporains ». Rappelons qu'il s'agit là de l'un des trois thèmes qui structurent désormais les programmes de chacune des trois années du lycée. En classe de Seconde, les élèves ont abordé, dans ce même cadre, des sujets liés aux ressources énergétiques et au défi alimentaire. Malgré l'apparente diversité des sujets abordés, il y a donc un fil directeur commun aux chapitres de cette partie : il s'agit de montrer comment les Sciences de la vie et de la Terre participent à l'appréhension des grands problèmes contemporains auxquels l'humanité d'aujourd'hui se trouve confrontée.

Les instructions préconisent d'accorder 17 % (soit 1/6) du temps annuel à l'ensemble de cette partie.

On remarquera bien entendu que le premier sujet « Tectonique des plaques et géologie appliquée » est très lié aux questions de géologie envisagées dans la partie 2. On peut donc aussi considérer ce premier sujet comme de la géologie appliquée, prolongation de la géologie fondamentale précédemment étudiée.

Pour ce premier sujet, il est donc indispensable que la partie de géologie fondamentale ait été traitée. Deux approches sont proposées ; comme stipulé dans le programme, il appartient au professeur de choisir l'une de ces deux approches :

- L'étude d'une ressource géologique locale : dans ce cas, il est particulièrement indiqué de fonder une partie de cet enseignement sur une sortie géologique. Le manuel propose un exemple précis qui peut très bien être transposé à d'autres situations : après l'étude d'un matériau courant, on recherche les indices traduisant son origine puis on replace sa genèse dans le contexte de la géodynamique régionale, elle-même tributaire de la tectonique globale.
- La seconde approche propose d'expliquer les conditions nécessaires à la formation d'un gisement pétrolier. On s'appuie sur le modèle de la tectonique des plaques et sur les connaissances de la classe de Seconde (fossilisation de la matière organique) pour expliquer pourquoi les gisements d'hydrocarbures sont rares et localisés. À partir d'une étude de la répartition mondiale des gisements, le manuel propose une série de documents qui répondent à cette problématique dans le cas du plus grand gisement pétrolier du monde, situé dans la péninsule arabique.

Le second sujet « Nourrir l'humanité » prolonge l'étude initiée sur la même thématique en classe de Seconde. On se situe d'abord à l'échelle des écosystèmes puis on envisage les conséquences, à l'échelle planétaire, des choix effectués en matière de pratiques agricoles et d'habitudes alimentaires.

Cette partie du programme permet de développer les compétences suivantes :

- **Connaissances** : elles portent sur les propriétés des roches, l'étude des indices paléontologiques qu'elles peuvent renfermer, les modalités de la formation d'un gisement (étude d'un bassin sédimentaire). Dans le cas des hydrocarbures, c'est aussi l'occasion d'étudier la tectonique des marges passives, le phénomène de subsidence, les propriétés des roches « réservoir ».

Le thème « Nourrir l'humanité » nécessite de déterminer les composantes d'un écosystème (cultivé ou non), de préciser sa structure, son fonctionnement. Les notions de pyramides écologiques, de production et de productivité, de bioaccumulation ou encore d'empreinte écologique seront établies.

- **Des compétences :** elles sont ici très variées. Il peut s'agir des diverses compétences que l'on met en œuvre au cours d'une sortie géologique, des classiques techniques d'observation et d'analyse d'échantillons géologiques, de la recherche d'informations dans des documents scientifiques comme des cartes, des profils sismiques, etc. Le thème « Nourrir l'humanité » permet lui aussi une étude de terrain mais se prête également à des expérimentations de laboratoire, ou à des activités de modélisation.

- **Des attitudes :** c'est une composante importante de ce thème, qui vise à sensibiliser les élèves à l'apport des sciences dans des enjeux contemporains qui impliquent des choix de société. On montrera aux élèves comment faire preuve d'esprit critique en pratiquant une analyse objective et argumentée, *sans a priori*. Ce thème doit aussi préparer chacun à l'exercice de sa responsabilité individuelle et citoyenne en étant capable d'évaluer les conséquences des ses propres pratiques, tant en matière d'énergie que d'habitudes alimentaires. Il peut, en outre, ouvrir des perspectives sur l'intérêt de certains métiers méconnus (voir les pages « Des clés pour... »).

Ce thème est découpé en quatre chapitres : les deux premiers concernent la géologie, mais un choix sera fait par le professeur entre les deux approches proposées. Les deux autres chapitres sont relatifs au thème « Nourrir l'humanité ».

## Une correspondance entre le programme officiel et les chapitres du manuel

Connaissances	Les chapitres du manuel
<b>THÈME 2-A TECTONIQUE DES PLAQUES ET GÉOLOGIE APPLIQUÉE</b>	
Tectonique des plaques et ressource locale  Un exemple de ressource géologique est choisi dans un contexte proche de l'établissement scolaire. Son étude (nature, gisement) permet de comprendre que ses conditions d'existence peuvent être décrites en utilisant le cadre général de la tectonique des plaques.	<b>chapitre 1</b>  <b>Tectonique globale et ressources géologiques locales</b> (pages 160-169) <b>Les activités pratiques</b> <b>Act. 1</b> Un exemple de ressource géologique : le calcaire <b>Act. 2</b> L'origine de la « pierre du pont du Gard » <b>Act. 3</b> La tectonique à l'origine des calcaires coquilliers
Tectonique des plaques et recherche d'hydrocarbures  Le modèle de la tectonique des plaques constitue un cadre intellectuel utile pour rechercher des gisements pétroliers.  À partir de l'étude d'un exemple, on montre que la tectonique globale peut rendre compte :  - d'un positionnement géographique du bassin favorable au dépôt d'une matière organique abondante et à sa conservation ; - d'une tectonique en cours de dépôt (subsidence) et après le dépôt qui permettent l'enfoncement et la transformation de la matière organique puis la mise en place du gisement.  La rare coïncidence de toutes ces conditions nécessaires explique la rareté des gisements dans l'espace et le temps.	<b>chapitre 2</b>  <b>Tectonique des plaques et recherche d'hydrocarbures</b> (pages 170-187) <b>Les activités pratiques</b> <b>Act. 1</b> Des gisements pétroliers inégalement répartis <b>Act. 2</b> Une conservation difficile des dépôts organiques <b>Act. 3</b> Un exemple de gisement pétrolier remarquable <b>Act. 4</b> Mise en place des gisements et tectonique globale

Connaissances	Les chapitres du manuel
<b>THÈME 2-B NOURRIR L'HUMANITÉ</b>	
<p><b>La production végétale : utilisation de la productivité primaire</b></p> <p>Un écosystème naturel est constitué d'un biotope et d'une biocénose. Son fonctionnement d'ensemble est permis par la productivité primaire qui, dans les écosystèmes continentaux, repose sur la photosynthèse des plantes vertes.</p> <p>L'agriculture repose sur la constitution d'agrosystèmes gérés dans le but de fournir des produits (dont les aliments) nécessaires à l'humanité. Un agrosystème implique des flux de matière (dont l'eau) et d'énergie qui conditionnent sa productivité et son impact environnemental. L'exportation de biomasse, la fertilité des sols, la recherche de rendements posent le problème de l'apport d'intrants dans les cultures (engrais, produits phytosanitaires, etc.).</p> <p>Le coût énergétique et les conséquences environnementales posent le problème des pratiques utilisées. Le choix des techniques culturelles vise à concilier la nécessaire production et la gestion durable de l'environnement.</p>	<p><b>chapitre 3</b></p> <p><b>Pratiques agricoles et gestion de l'environnement</b> (pages 188-207)</p> <p><b>Les activités pratiques</b></p> <p><b>Act. 1</b> Le fonctionnement d'un écosystème naturel  <b>Act. 2</b> Les agrosystèmes : des écosystèmes cultivés  <b>Act. 3</b> Pratiques culturelles et environnement  <b>Act. 4</b> Pratiques agricoles et développement durable</p>
<p><b>La production animale : une rentabilité énergétique réduite</b></p> <p>Dans un écosystème naturel, la circulation de matière et d'énergie peut être décrite par la notion de pyramide de productivité.</p> <p>Dans un agrosystème, le rendement global de la production par rapport aux consommations (énergie, matière) dépend de la place du produit consommé dans la pyramide de productivité. Ainsi, consommer de la viande ou un produit végétal n'a pas le même impact écologique.</p> <p><b>Pratiques alimentaires collectives et perspectives globales</b></p> <p>À l'échelle globale, l'agriculture cherche à relever le défi de l'alimentation d'une population humaine toujours croissante. Cependant, les limites de la planète cultivable sont bientôt atteintes : les ressources (eau, sol, énergie) sont limitées tandis qu'il est nécessaire de prendre en compte l'environnement pour en assurer la durabilité.</p>	<p><b>chapitre 4</b></p> <p><b>Pratiques alimentaires et perspectives globales</b> (pages 208-225)</p> <p><b>Les activités pratiques</b></p> <p><b>Act. 1</b> Le défi alimentaire mondial  <b>Act. 2</b> Les élevages : des agrosystèmes peu efficaces  <b>Act. 3</b> Pratiques alimentaires et environnement global  <b>Act. 4</b> Quelles agricultures pour demain ?</p>

# Tectonique globale et ressources géologiques locales

## Activités pratiques

1

### Un exemple de ressource géologique : le calcaire (pages 162-163)

Connaissances	Capacités et attitudes
Un exemple de ressource géologique est choisi dans un contexte proche de l'établissement scolaire.	Recenser, extraire et organiser des informations.

#### 1. Les intentions pédagogiques

Il est possible par exemple, au cours d'une sortie pédagogique, d'étudier une ressource géologique locale exploitée par l'Homme.

Le **document 1** illustre diverses utilisations par l'Homme des roches calcaires, roches très répandues dans le sous-sol français. Le calcaire est une roche connue des élèves depuis le collège : en classe de Cinquième, l'action de l'eau sur cette roche a été étudiée avec les diverses conséquences sur le modelé des paysages.

Les **documents 2** et **3** focalisent l'étude de l'utilisation d'une roche calcaire sur un exemple précis : le pont du Gard. Il s'agit d'un exemple spectaculaire d'exploitation d'une ressource géologique locale, la roche utilisée provenant d'une carrière située à quelques centaines de mètres du site.

#### 2. Les pistes d'exploitation

##### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Le calcaire est une roche pouvant être utilisée comme matériau de construction. Il est aussi utilisé dans la fabrication du ciment. On trouve aussi, de façon très localisée, du calcaire bitumineux.

**Doc. 2 :** Le site du pont du Gard est propice à une sortie pédagogique avec la visite du site particulièrement bien aménagé et de la carrière de l'Estel à proximité, d'où ont été extraites les roches du pont.

##### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'Homme utilise les roches calcaires soit directement dans la construction de bâtiment ou de monuments soit en les intégrant dans la fabrication de produits industriels comme le ciment, ou encore en exploitant le bitume qu'il contient parfois.

#### 3. Ressources complémentaires

- **Site officiel du pont du Gard** (avec une rubrique « service éducatif ») :  
<http://www.pontdugard.fr/>

## L'origine de la « pierre du pont du Gard » (pages 164-165)

Connaissances	Capacités et attitudes
L'étude de la ressource géologique (nature, gisement) permet de comprendre ses conditions d'existence.	Recenser, extraire et organiser des informations afin de comprendre l'origine de la pierre du pont du Gard.

### 1. Les intentions pédagogiques

Dans un deuxième temps, une étude détaillée de la ressource géologique est nécessaire afin de comprendre l'origine de sa présence.

Le **document 1** expose une étude détaillée de la pierre du pont du Gard réalisable par les élèves, sur le terrain ou en classe.

Le **document 2**, obtenu en partie à l'aide du site InfoTerre, permet de situer la répartition des calcaires coquilliers dans le sud-est de la France. Cette répartition est à mettre en relation avec la présence des grandes failles de la région.

Le **document 3** décrit le contenu fossifère des calcaires coquilliers et fait appel au principe d'actualisme afin de reconstituer les conditions de formation de ces calcaires.

### 2. Les pistes d'exploitation

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** La pierre du pont du Gard est une roche calcaire constituée de divers fragments fossiles, en particulier des fragments de coquilles, d'où le nom de calcaire coquillier.

**Doc. 2 :** Les calcaires coquilliers dans le sud-est de la France sont datés de 20 millions d'années. Ces calcaires, présents dans différents sites, sont localisés à proximité de la faille de Nîmes et ne dépasse pas la faille des Cévennes.

**Doc. 3 :** En appliquant le principe d'actualisme, on peut penser que les calcaires coquilliers étudiés se sont formés en milieu marin, à faible profondeur (entre 0 et 100 m de profondeur).

Une mer peu profonde était donc présente dans le sud-est de la France il y a 20 Ma.

#### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La pierre du pont du Gard est un calcaire coquillier formé dans une mer peu profonde, il y a environ 20 Ma, à partir de fragments issus de divers animaux marins : coquilles d'huîtres, de chlamys, plaques de balanes, tests et piquants d'oursins.

### 3. Ressources complémentaires

- **Site officiel du pont du Gard** (avec une rubrique « service éducatif ») :  
<http://www.pontdugard.fr/>

- **Lithothèque nationale avec entrée sur l'ensemble des lithothèques académiques** :  
<http://www.educnet.education.fr/svt/ressources-numeriques/banques-de-donnees/litho>

## La tectonique à l'origine des calcaires coquilliers (pages 166-167)

Connaissances	Capacités et attitudes
L'étude de la ressource géologique (nature, gisement) permet de comprendre que ses conditions d'existence peuvent être décrites en utilisant le cadre général de la tectonique des plaques..	Recenser, extraire et organiser des informations afin d'établir une relation entre la ressource géologique locale et la tectonique des plaques.

### 1. Les intentions pédagogiques

Les documents 1 et 2 ont pour but de décrire les événements tectoniques qui ont affecté la région du sud-est de la France à l'Oligocène et au Miocène. La connaissance de ces événements permet aux élèves de comprendre comment cette région a pu être envahie par une mer peu profonde au cours de la transgression du Miocène.

Le document 3 illustre la transgression du Miocène avec les limites côtières en Europe et dans le sud-est de la France. Ce document a aussi pour objectif d'expliquer comment ces calcaires déposés dans une mer peu profonde se retrouvent actuellement en surface.

### 2. Les pistes d'exploitation

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Au cours de l'Oligocène, le sud-est de la France est affecté par une tectonique en extension qui a pour conséquence l'étirement du littoral, un amincissement de la croûte continentale vers le sud-est et un réchauffement global de celle-ci. Puis, au début du Miocène, la zone d'extension s'est décalée vers le sud-est. La croûte continentale du littoral languedocien n'est plus étirée et se refroidit (avec pour conséquence une subsidence thermique). L'extension associée à la subsidence thermique entraîne un enfoncement modéré du littoral du sud-est de la France et favorise l'envahissement de la région par la mer (transgression).

**Doc. 3 :** Il s'agit de mettre en relation ce document avec le document 2 de la p. 164. On constate alors que les limites de la mer Miocène dépassent de peu la faille de Nîmes. On explique alors la formation des calcaires coquilliers dans le sud-est de la France. L'émergence de ces calcaires s'explique par une régression à la fin du Miocène mais aussi par des phénomènes géologiques de grande ampleur qui sont encore discutés au sein de la communauté scientifique.

#### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Une phase d'extension associée à une subsidence thermique explique l'enfoncement modéré du littoral sud-est de la France, favorise l'envahissement par la mer de la région au cours du Miocène. Dans cette mer peu profonde (200 m) se déposent alors les calcaires coquilliers. Une phase de régression et des événements tectoniques permettent ensuite à ces calcaires d'émerger et d'être accessibles en surface.

### 3. Ressources complémentaires

- Site InfoTerre, des données géoscientifiques du BRGM :  
<http://infoterre.brgm.fr>

# Tectonique des plaques et recherche d'hydrocarbures

## Activités pratiques

1

### Des gisements pétroliers inégalement répartis (pages 172-173)

Connaissances	Capacités et attitudes
Les gisements d'hydrocarbures sont rares et précisément localisés.	Recenser, extraire et organiser des informations permettant de reconstituer le contexte géographique et géologique à l'époque du dépôt à l'origine de l'hydrocarbure de l'exemple étudié.

#### 1. Les intentions pédagogiques

Les documents proposés ici permettent de mettre en évidence la très inégale répartition des ressources en combustibles fossiles. Il s'agit de montrer que les gisements d'hydrocarbures sont rares, précisément localisés sur la planète et que les périodes de formation des roches mères sont inéquitablement réparties au cours de des temps géologiques. Ce constat permet de poser le problème des conditions géologiques prévalant à la formation de ces ressources tant convoitées.

Le **document 1** présente tout d'abord la difficulté d'estimer les réserves mondiales de pétrole. En effet, cette estimation dépend de facteurs techniques (les progrès technologiques permettent d'imaginer exploiter des gisements inaccessibles pour le moment), des facteurs économiques (des gisements trop coûteux à exploiter peuvent devenir rentables avec l'augmentation du prix du baril), des facteurs politiques (certains pays sous-estiment ou surestiment leurs ressources à des fins stratégiques). On distingue ainsi des réserves prouvées, probables et possibles.

Grâce aux cartes et graphique du **document 1**, les élèves sont amenés à concevoir la très inégale répartition géographique des gisements pétroliers et à constater la prédominance du Moyen-Orient et de ses champs pétroliers géants. Le bassin d'Al Ghawar et le gisement de gaz du North Dome, respectivement plus important bassin pétrolier et plus grand gisement de gaz naturel mondial sont présentés. Leur géologie fera l'objet des activités pratiques 4.

Le **document 2** permet de constater l'inégale répartition temporelle des périodes de formation des roches mères pétrolières. En confrontant ces périodes aux variations eustatiques, il permet en outre de mettre en évidence le lien existant entre les transgressions marines et la formation des roches mères des hydrocarbures.

Le **document 3** amène l'idée que les transgressions marines (et donc les périodes de formation des roches mères pétrolières) sont liées à l'activité des dorsales océaniques.

Une première corrélation peut ainsi être établie entre la tectonique globale et la formation des pétroles.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Les principales régions pétrolières sont le golfe Persique, le golfe du Mexique, le Texas, le Canada, la mer du Nord, la Russie, mais aussi le Venezuela, le Niger, une partie de l'Indonésie et de l'Australie. Dans la péninsule arabique, il y a des gisements de pétrole géants. Ils sont situés autour du golfe Persique, principalement en Arabie Saoudite, en Irak, au Koweït et en Iran. Ce sont les principales réserves pétrolières mondiales. Le Moyen Orient renferme sans doute à lui seul près des deux tiers des réserves mondiales.

**Doc. 2 :** C'est au Paléozoïque (Silurien et Dévonien) que se sont formées les roches mères du pétrole de l'Amérique du Nord mais c'est au Mésozoïque (plus particulièrement au Jurassique et au Crétacé) que se sont déposés les sédiments organiques à l'origine du pétrole du Moyen-Orient et de la mer du Nord. Les réserves vénézuéliennes se sont elles formées plus tardivement (Cénozoïque).

**Doc. 3 :** Toutes les périodes de formation des roches mères pétrolifères sont des périodes de transgression marine : le niveau moyen des mers augmente, les rivages se déplacent vers l'intérieur des continents. À l'échelle des temps géologiques, les variations du niveau marin à l'échelle mondiale (variations eustatiques) sont dues aux variations d'activité des dorsales océaniques. Ce sont des périodes de forte activité des dorsales (forte production magmatique, forte intumescence thermique) qui sont responsables des transgressions marines (l'eau est chassée du bassin océanique vers le domaine continental par l'augmentation de volume des dorsales).

La formation des roches mères pétrolifères semble donc facilitée par une forte activité des dorsales océaniques.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les gisements pétroliers sont très inégalement répartis dans l'espace, la péninsule arabe, étant particulièrement riche en ressources exploitables.

Les périodes de formation des roches mères pétrolifères sont également très inégalement réparties au cours des temps géologiques. Les périodes de forte expansion océanique s'avèrent très propices à la formation du pétrole.

## 3. Ressources complémentaires

- **Les roches carbonées fossiles, obscur objet du désir (une conférence très intéressante et de nombreux documents utilisables) :**  
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-carbone-fossile-G-Dromart.xml>

## Une conservation difficile des dépôts organiques (pages 174-175)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>À partir de l'étude d'un exemple, on montre que la tectonique globale peut rendre compte :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– d'un positionnement géographique du bassin favorable au dépôt d'une matière organique abondante et à sa conservation ;</li> <li>– d'une tectonique en cours de dépôt (subsidence) et après le dépôt qui permettent l'enfouissement et la transformation de la matière organique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recenser, extraire et organiser des informations permettant de reconstituer le contexte géographique et géologique à l'époque du dépôt à l'origine de l'hydrocarbure de l'exemple étudié.</li> <li>– Découvrir la morphologie et la structure des marges passives à partir des profils de sismique réflexion et/ou des cartes et/ou des coupes</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Les transgressions marines favorisent le développement de vastes marges continentales où se dépose une matière organique propice à la formation de roches mères pétrolières. Néanmoins, pour que des sédiments organiques conduisent à la formation de roches mères, il convient que la matière organique soit préservée et pour cela qu'elle soit soustraite à l'action des minéralisateurs aérobies. L'objectif de cette double page est ainsi de montrer comment la tectonique des plaques influence la préservation de la matière organique déposée. En modifiant le positionnement géographique des bassins, elle influence le phénomène d'upwelling et les conditions anoxiques (absence de courants de fond oxygénés) ; en provoquant des distensions, elle permet l'enfouissement des dépôts.

Le **document 1** est le résultat de la prospection des sédiments océaniques actuels. Il indique la teneur en carbone des sédiments marins superficiels. Il permet d'associer la présence de carbone aux sédiments des marges continentales et plus particulièrement aux argiles (et aux marnes).

Le **document 2** présente la productivité primaire des océans. Ce document est une synthèse de différentes observations (notamment des études satellitaires de la concentration des eaux superficielles en chlorophylle). Il met particulièrement en évidence les zones d'upwelling riches en matière organique. La confrontation des documents 1 et 2 montre que les zones de forte production de matière organique ne sont pas forcément les zones les plus riches en sédiments organiques.

Le **document 3** apporte une explication aux constats réalisés à partir de la confrontation des documents 1 et 2. Il donne une information concernant la circulation thermo-haline et le phénomène d'upwelling.

Le **document 4** présente la tectonique favorable à l'enfouissement. Conformément aux directives du programme officiel, un profil sismique de marge passive est présenté. Il montre très clairement la présence de blocs basculés, de failles normales et l'allure des corps sédimentaires typiques des marges passives (sédiments syn-rifts et post-rifts).

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Les zones de forte production primaire ne sont pas forcément des zones où l'on trouve dans les sédiments de fortes teneurs en matière organique. Par exemple,

même si au niveau de l'Atlantique Nord ou des côtes brésiliennes et vénézuéliennes, la productivité primaire est très forte (supérieure à 200 grammes de carbone par mètre carré et par an), le taux de carbone dans les sédiments est faible ou très faible (inférieur à 0,5 %).

**Doc. 1, 2 et 3 :** Les côtes brésiliennes et vénézuéliennes, le nord de l'Atlantique sont marqués par la présence de courants océaniques profonds. Froids et bien oxygénés, ils brassent les sédiments et favorisent la minéralisation du carbone organique. Ces secteurs sont pour cela pauvres en sédiments organiques même si leur productivité est importante.

**Doc. 3 :** Les zones de forte productivité correspondent au phénomène d'upwelling. Celui-ci facilite les conditions anoxiques (absence d'oxygène) favorables à la préservation de la matière organique morte. En effet, au niveau des zones d'upwellings, la production primaire des eaux de surface est tellement importante que la dégradation de la matière organique morte consomme tout le dioxygène disponible. La consommation du dioxygène par les bactéries minéralisatrices étant supérieure à la capacité de renouvellement des eaux au contact des sédiments par les courants, il se crée sur le fond une zone à très faible teneur en oxygène qui favorise la préservation de la matière organique générée en surface.

**Doc. 4 :** La tectonique des plaques favorise la formation des hydrocarbures par la création de bassins sédimentaires propices à l'enfouissement de la matière organique et ainsi à sa transformation. Ces bassins sédimentaires se trouvent au niveau des marges passives des océans.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les sédiments organiques sont conservés lorsqu'ils sont placés dans des bassins où ils peuvent être enfouis et soustraits à l'action de l'oxygène. C'est le cas au niveau des marges continentales passives lorsque les continents sont placés de telle sorte que ces sédiments sont préservés des courants océaniques profonds.

## Un exemple de gisement pétrolier remarquable (pages 176-177)

Connaissances	Capacités et attitudes
Objectifs et mots-clés. L'exemple étudié permet de présenter ce qu'est un bassin sédimentaire et quelques exemples de roches sédimentaires. Il permet aussi de montrer l'intérêt de la tectonique des plaques dans la compréhension du phénomène sédimentaire.	Repérer les grandes caractéristiques d'un bassin sédimentaire et de quelques roches sédimentaires.

### 1. Les intentions pédagogiques

Afin de répondre aux exigences du programme officiel, le choix des auteurs s'est porté naturellement sur le plus grand gisement pétrolier mondial : celui de Ghawar en Arabie Saoudite. Ce gisement a été découvert en 1948, son exploitation a débuté en 1951. 65 % de toute la production de pétrole de l'Arabie Saoudite de 1948 à 2000 provient de Ghawar. Son exploitation représente environ 6 % de la production mondiale quotidienne.

Le **document 1** présente les caractéristiques du bassin sédimentaire, l'âge et l'ampleur de la sédimentation.

Le **document 2** montre un profil sismique du bassin permettant de constater l'existence de failles que l'on peut dater du début du secondaire (Trias).

Le **document 3** apporte des informations sur la nature des sédiments et permet de retrouver les caractéristiques du gisement. Il est possible d'identifier les roches mères, réservoir et couverture.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Le champ pétrolifère de Ghawar présente un effondrement du socle qui est découpé en blocs plus ou moins basculés les uns par rapport aux autres. Il montre une accumulation de plusieurs milliers de mètres de roches disposées en strates (roches sédimentaires). Ces roches se sont donc déposées au sein de ce bassin sédimentaire pendant des centaines de millions d'années du Paléozoïque au Cénozoïque.

**Doc. 2 :** Des failles sont visibles sur le profil sismique du bassin. Il est difficile de dire s'il s'agit de failles normales ou inverses mais il est possible de dire qu'elles recoupent les terrains paléozoïques et même le début du Trias. Elles sont en revanche recouvertes par tous les terrains du Jurassique et du Crétacé. On pense que ces failles ont structuré le bassin, jouant tout d'abord en failles normales ; elles se sont formées lors d'un phénomène de rifting qui a permis le basculement des blocs de croûte (début du Mésozoïque, sédimentation syn-rift). C'est la période d'ouverture d'un vaste domaine océanique. Ensuite, cette région a fonctionné en marge passive et a permis le dépôt d'une importante sédimentation (Jurassique-Crétaçé, sédimentation post-rift). Enfin, bien plus tard, la région a subi une compression qui a fait rejouer ces failles d'une manière inverse, ce qui explique la difficulté relative de lecture aujourd'hui sur le profil sismique. Des plis sont également visibles sur le document 1 et témoignent de l'histoire de ce bassin.

**Doc. 3 :** La roche mère de Ghawar est le calcaire de la formation Hanifa (Oxfordien). Il renferme en effet un taux de carbone organique important. Ce carbone organique, enfoui au sein du bassin, a cuit sous l'effet de l'augmentation de la température consécutivement à l'enfouissement et il a formé un fluide qui peu à peu a migré vers le sommet du bassin. Il a rencontré la formation du Tithonien (des évaporites compactes et imperméables) et s'est trouvé bloqué. On le trouve ainsi dans la formation poreuse immédiatement située sous cette roche couverture : la formation Arab (kimméridgien) qui constitue donc la roche réservoir au niveau de laquelle il faut forer pour exploitation le précieux or noir.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

Un bassin pétrolifère est une ancienne marge passive, un bassin sédimentaire présentant l'accumulation d'immenses strates de roches sédimentaires de diverses natures. On y trouve des roches mères très riches en carbone organique, des roches poreuses servant de réservoir et des roches couvertures imperméables bloquant la migration des fluides pétroliers. Au sein de ce bassin sédimentaire, il existe des structures tectoniques (failles, plis) qui ont favorisé d'une part l'enfouissement des sédiments et ainsi la formation du pétrole, d'autre part la formation de pièges à l'origine de la concentration des fluides nécessaire à la constitution du gisement.

## **3. Ressources complémentaires**

- **Tout savoir sur le bassin pétrolier d'Al Ghawar (en anglais) :**  
<http://www.searchanddiscovery.com/documents/2004/afifi01/index.htm>

## Mise en place des gisements et tectonique globale (pages 178-179)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>À partir de l'étude d'un exemple, on montre que la tectonique globale peut rendre compte :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– d'un positionnement géographique du bassin favorable au dépôt d'une matière organique abondante et à sa conservation ;</li> <li>– d'une tectonique en cours de dépôt (subsidence) et après le dépôt qui permettent l'enfouissement et la transformation de la matière organique puis la mise en place du gisement.</li> </ul> <p>La rare coïncidence de toutes ces conditions nécessaires explique la rareté des gisements dans l'espace et le temps.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Analyser les positions relatives des continents et des océans (Téthys ou Atlantique) lors des périodes d'absence ou de grande accumulation de roches-mères pétrolières pour comprendre les conditions favorables à leur dépôt.</li> <li>– Recenser, extraire et organiser des informations permettant de reconstituer le contexte géographique et géologique à l'époque du dépôt à l'origine de l'hydrocarbure de l'exemple étudié.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

L'objectif ici est reconstituer les conditions paléo-tectoniques prévalant à la formation du pétrole en Arabie Saoudite. Il s'agit de comprendre comment ces immenses réserves ont pu se mettre en place : conditions de formation des roches mères puis de formation des gisements. À travers cet exemple, l'élève est amené à comprendre que les conditions propices à la formation des gisements pétroliers sont nombreuses : tectonique propice à la production d'une biomasse quantitativement importante, disposition des continents compatibles avec une préservation de la matière organique formée, distension permettant l'accumulation et l'enfouissement de la matière en vue de sa transformation puis compression favorisant le piégeage du résultat de la transformation.

Les **documents 1 et 2** apportent les informations pour comprendre les conditions de formation des roches mères :

- tectonique en divergence (morcelement de la Pangée) favorisant la productivité (climat chaud, forte production de CO<sub>2</sub>) et les conditions de dépôt (extension des marges continentales, transgression marine) ;
- positionnement propice des continents et absence des glaces polaires empêchant la présence de courants profonds oxygénés favorisant les conditions anoxiques.

Les **documents 3 et 4** mettent en évidence les conditions tectoniques assurant la formation des gisements. La présence des pièges à pétrole est à relier à la fermeture de l'océan Téthys. La péninsule arabique est replacée à l'arrière de la zone de collision.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** La forte activité des dorsales océaniques, consécutivement à l'expansion de l'immense océan Téthys au Jurassique et au Crétacé, a favorisé :

- la production de CO<sub>2</sub> et ainsi un réchauffement climatique important ;
- une transgression marine majeure permettant le développement de vastes marges continentales.

Une vaste production de matière organique a ainsi été rendue possible au niveau de ces marges, ce qui a favorisé la formation des roches mères.

**Doc. 2 :** La fermeture de l'océan Téthys a provoqué la formation de plis, elle a fait rejouer des failles normales en failles inverses. En raccourcissant les anciennes marges passives, elle a contribué à former des pièges au sein desquels les fluides pétroliers ont pu s'accumuler. La péninsule arabique occupe de ce fait une place de « choix », située à l'arrière de la zone de collision, elle est compressée mais ni trop ni trop peu, ce qui a favorisé la mise en place d'immenses gisements.

**Doc. 1 à 4 :** Diverses conditions tectoniques sont nécessaires pour former un gisement pétrolier. Il faut :

- une tectonique favorable au dépôt et à la préservation de la matière organique (un positionnement particulier des continents qui interdisent un brassage des sédiments, un climat chaud, une richesse en CO<sub>2</sub> favorisant la productivité de matière organique) ;
- une tectonique favorable à l'enfouissement de la matière organique (des marges passives subsidentes) ;
- une tectonique compressive favorable à la mise en place des gisements d'hydrocarbures (un raccourcissement de la marge passive avec la formation de plissements).

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

Les conditions propices à la formation des gisements pétroliers sont nombreuses : tectonique propice à la production d'une biomasse quantitativement importante, disposition des continents compatibles avec une préservation de la matière organique formée, distension permettant l'accumulation et l'enfouissement de la matière en vue de sa transformation puis compression favorisant le piégeage du résultat de la transformation.

Ces conditions de la formation, multiples, n'ont été que rarement réunies au cours des temps géologiques.

## **3. Ressources complémentaires**

- Site du Paleomap project :  
<http://www.scotese.com>

La correction des exercices « **Tester ses connaissances** » figure à la fin du manuel de l’élève, p. 351 et 352.

## 5 | Le pétrole de la mer du Nord (p. 186)

Il faut choisir les réponses :

- b- Le secteur de la mer du Nord a été étiré dans une direction Nord-Ouest, Sud-Est.
- d- La lithosphère continentale a été étirée au Trias.
- e- La lithosphère continentale n'est plus étirée depuis le Crétacé supérieur.

## 6 | Le pétrole du bassin de l'Orénoque au Venezuela

**1.** Les roches mères se sont formées lors de l’ouverture de l’océan Atlantique ; nous sommes en bordure de l’Atlantique ; le socle présente un enfacement, témoin d’une subsidence ; le socle présente une accumulation de strates sédimentaires, il est recoupé par des failles. Tout cela semble montrer qu’il s’agit d’un bassin sédimentaire type marge passive.

**2.** La fenêtre à huile est le domaine de température et de pression au sein duquel la matière organique est simplifiée sous forme de fluide pétrolier. Avec la profondeur, la température augmente si bien qu’à partir d’un certain degré d’entassement la matière organique est « cuite », elle est simplifiée et les fluides formés migrent vers la surface. Les gisements se trouvent donc naturellement ici au-dessus de la roche mère, au-dessus du toit de la fenêtre à huile. Ils se trouvent bloqués par une roche couverture suite à leur migration à partir de la roche mère.

**3.** Plus les forages sont profonds, plus l’huile (pétrole) a une température élevée. Ceci est parfaitement logique puisque plus on va profond dans le bassin sédimentaire et plus la température s’élève.

## 7 | Activité des dorsales et formation des pétroles

**1.** Plus la production de croûte océanique augmente et plus la température et le niveau marin augmentent (inversement, plus la production de croûte océanique diminue et plus le niveau marin et la température baissent). Parallèlement, c’est au moment où la production de croûte océanique est importante, lorsque le niveau marin est haut, qu'il fait chaud, qu'il y a le plus de formation de ressources pétrolières. Tous ces paramètres semblent donc être liés.

**2.** Lorsque les remontées de magma sont plus intenses sous les dorsales, celles-ci se dilatent thermiquement. Elles diminuent dès lors l'espace que peut occuper l'eau dans le bassin océanique. L'eau de mer est alors chassée sur les continents, c'est le phénomène de transgression. Ces épisodes transgressifs sont particulièrement propices au développement du plancton sur les marges continentales et ainsi à la production de biomasse. Ceci d'autant plus que le climat est chaud, que l'atmosphère est riche en CO<sub>2</sub> favorable à la photosynthèse.

Il faut donc comprendre que lorsque les dorsales océaniques sont actives, que la production de croûte océanique est grande, alors les conditions deviennent propices à la formation des roches mères pétrolifères.

# Pratiques agricoles et gestion de l'environnement

## Activités pratiques

1

### Le fonctionnement d'un écosystème naturel (p.190-191)

Connaissances	Capacités et attitudes
Un écosystème naturel est constitué d'un biotope et d'une biocénose. Son fonctionnement d'ensemble est permis par la productivité primaire qui, dans les écosystèmes continentaux, repose sur la photosynthèse des plantes vertes. Dans un écosystème naturel, la circulation de matière et d'énergie peut être décrite par la notion de pyramide de productivité.	Recenser, extraire et exploiter des informations, notamment sur le terrain, utiliser des bases de données et des logiciels pour comparer les bilans d'énergie et de matière (dont l'eau) d'un agrosystème de production végétale et d'un écosystème peu modifié par l'homme.

#### 1. Les intentions pédagogiques

Le thème « Nourrir l'humanité » prolonge l'approche globale de l'agriculture conduite en classe de Seconde. Pour cela, il nécessite la présentation de quelques grandes notions concernant les écosystèmes naturels et leur fonctionnement. C'est l'objectif de ces premières activités.

Le **document 1** rappelle la notion d'écosystème déjà abordée en Seconde et précise celles de biotope et de biocénose. La présentation de l'écosystème forestier caducifolié permet une introduction à la complexité de la biocénose et des relations qu'elle entretient avec les divers paramètres du biotope. En particulier, l'influence des arbres sur la luminosité, la température, l'hygrométrie, la vitesse du vent est signalée et pourra être réinvestie dans les activités 2 et 4 de ce chapitre, ainsi que dans l'activité 4 du chapitre 4. Les interactions biotope/biocénose constituent un premier aspect de la dynamique d'un écosystème.

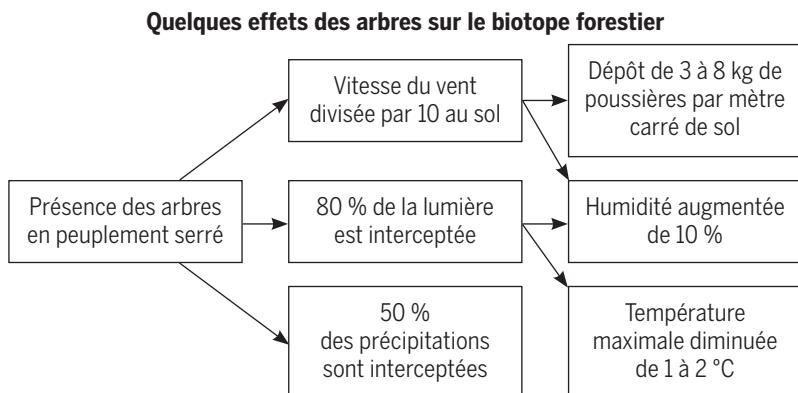
Les **documents 2** et **3** sont consacrés à un second aspect de cette dynamique : au sein de l'écosystème, la matière et l'énergie circulent. On s'appuie sur les acquis de Seconde sur la photosynthèse, la productivité primaire et la déperdition énergétique d'un maillon à l'autre des chaînes alimentaires (voir p. 158). Ces notions sont rappelées et illustrées par l'exemple de l'écosystème forestier. C'est l'occasion d'aborder la complexité des relations alimentaires au sein d'un écosystème naturel et d'insister sur la forme pyramidale des niveaux trophiques successifs. Cette complexité fera écho à l'extrême simplification des biocénoses de certains agrosystèmes (voir les activités pratiques 2 et 4) ; la représentation pyramidale des productivités sera utile dans ce chapitre pour comprendre la notion de bioaccumulation des pesticides (voir activités pratiques 3) et dans le chapitre suivant pour comparer les conséquences écologiques de la consommation de produits animaux et végétaux (p. 212-213).

À noter que la représentation n'est ici pas à l'échelle : le maillon « végétaux » devrait en effet être 20 fois plus large que le maillon des herbivores. Enfin, le document 2 permet de constater que la matière est en grande partie recyclée à l'échelle de l'écosystème grâce aux processus de photosynthèse, de respiration et de fermentations. Là encore, il s'agit de préparer la comparaison qui pourra être faite avec un agrosystème (activité 2).

## 2. Pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Les arbres forment en forêt un couvert qui modifie tout un ensemble de paramètres du biotope, comme le montre le schéma suivant :



**Doc. 1 et 2 :** Les feuilles et branches mortes tombées au sol constituent une source de matières organiques alimentant les décomposeurs du sol (bactéries, vers, champignons...). Ceux-ci se nourrissent de ces matières organiques et celles-ci sont peu à peu minéralisées. Les matières minérales ainsi libérées sont absorbées par les végétaux et participent à leur croissance. Le prélèvement systématique des feuilles et branches mortes appauvrirait donc le sol en matières organiques, puis en matières minérales. Sa fertilité diminuerait et finalement la croissance des végétaux en serait affectée.

### Doc. 3 :

- Productivité des herbivores :  $2500 / 50\ 000 = 0,05$  (ou 5 %)
- Productivité des carnivores de 1<sup>er</sup> ordre :  $50 / 2\ 500 = 0,02$  (ou 2 %)
- Productivité des carnivores de 2<sup>e</sup> ordre :  $1 / 50 = 0,02$  (ou 2 %)

**Doc. 3 :** Seuls 5 % de l'énergie contenue dans les végétaux sont fixés dans la matière organique des herbivores. De toute la matière organique des herbivores, 2 % seulement se retrouvent dans la matière organique des carnivores de 1<sup>er</sup> niveau. Il en va de même entre les carnivores de 1<sup>er</sup> et de 2<sup>e</sup> niveau. D'un niveau trophique à l'autre, ce n'est donc qu'une très petite fraction de l'énergie qui est transmise et stockée sous forme de matières organiques. On peut donc représenter les productivités successives sous la forme d'une pyramide.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Dans un écosystème, la matière circule d'un maillon à l'autre de chacune des chaînes alimentaires. La productivité primaire (biomasse végétale produite par photosynthèse) constitue toujours le 1<sup>er</sup> maillon. La matière organique est, à un moment ou un autre, finalement décomposée et minéralisée, donc réutilisable par les végétaux. Dans un écosystème naturel, la matière est donc en majeure partie recyclée localement.

Cependant, seule une petite partie de la matière d'un niveau trophique se retrouve transformée en matière constitutive du niveau trophique suivant : la quantité d'énergie décroît donc fortement d'un niveau à l'autre du réseau trophique.

### 3. Ressources complémentaires

- Pour retrouver les notions de base de l'écologie : B. Fischesser, M.-F. Dupuis-Tate, *Le guide illustré de l'écologie*, Éditions de la Martinière, 1996.
- P. Duvigneaud, *La synthèse écologique*, Éditions Douin, 1984.

## Activités pratiques

2

### Les agrosystèmes : des écosystèmes cultivés (p.192-193)

Connaissances	Capacités et attitudes
L'agriculture repose sur la constitution d'agrosystèmes gérés dans le but de fournir des produits (dont les aliments) nécessaires à l'humanité. Un agrosystème implique des flux de matière (dont l'eau) et d'énergie qui conditionnent sa productivité. L'exportation de biomasse, la fertilité des sols, la recherche de rendements posent le problème de l'apport d'intrants dans les cultures (engrais, produits phytosanitaires, etc.).	<ul style="list-style-type: none"><li>– Concevoir et réaliser un protocole pour mettre en œuvre une culture et analyser ses caractéristiques et/ou utiliser des logiciels modélisant une culture, ses bilans et sa gestion.</li><li>– Recenser, extraire et exploiter des informations, notamment sur le terrain, utiliser des bases de données et des logiciels pour comparer les bilans d'énergie et de matière (dont l'eau) d'un agrosystème de production végétale et d'un écosystème peu modifié par l'Homme.</li></ul>

#### 1. Les intentions pédagogiques

Les pages précédentes ont permis aux élèves de consolider et d'enrichir leurs connaissances sur les écosystèmes naturels. Il s'agit à présent d'utiliser ces outils conceptuels (biotope, biocénose, flux de matière et d'énergie, pyramide des productivités...) pour comprendre les spécificités d'un écosystème cultivé (agrosystème) par rapport à un écosystème naturel.

Le **document 1** réactive, sur la base d'un exemple simple et relativement connu, les notions de production agricole issues du collège et de la classe de Seconde. L'itinéraire technique du maïs (ensemble des actes appliqués à une production végétale) est présenté et sert de support pour mettre en évidence les transformations du biotope et de la biocénose afin de favoriser la production de biomasse (maïs ensilage) ou de grain. C'est l'occasion d'introduire le rôle de l'eau d'irrigation et des pesticides. Concernant les flux de matière, on évoque les exportations liées aux récoltes, les restitutions liées à l'enfouissement des résidus de culture, les apports d'engrais minéraux et organiques. L'importance cruciale d'un équilibre dans les flux de matière est étudiée grâce aux documents suivants.

Dans le **document 2**, une modélisation d'un agrosystème réalisable en classe est proposée aux élèves. Elle peut être réalisée concrètement (voir le protocole détaillé sur le site ressources) à condition de la planifier correctement dans le temps. Elle peut dans

ce cas être l'occasion de travailler la démarche expérimentale : formulation de problématiques, d'hypothèses, adaptation et mise en œuvre du protocole, collecte et analyse de résultats... Avec ou sans mise en œuvre concrète, le document permet d'aboutir à l'idée d'un épuisement des réserves nutritives du milieu du fait des récoltes successives. L'importance d'une compensation des exportations apparaît donc « en creux » avec la baisse progressive de la productivité primaire.

Le **document 3** illustre la gestion de la fertilité dans un agrosystème réel, en représentant l'exemple du champ de maïs. Cette fois, l'approche est quantitative et permet de concrétiser ce que peut être la gestion de la fertilité (méthode du bilan azoté...) pour un agriculteur.

## 2. Pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Fin avril, le sol est désherbe chimiquement ou mécaniquement. Après la levée des graines de maïs, des herbicides permettent à nouveau de limiter l'enherbement. La biodiversité des champignons et des insectes est aussi réduite par l'utilisation de fongicides et d'insecticides. En novembre, le labour permet d'enfouir les herbes qui auraient poussé après la récolte.

**Doc. 2 :** La biomasse récoltée devrait diminuer progressivement si l'on effectue de nombreux cycles culturaux. En effet, à chaque cycle de la matière est exportée hors de l'écosystème cultivé, du fait de la récolte. Dans le modèle, la solution nutritive n'est pas renouvelée : les réserves d'azote, de phosphore, de potassium auront donc tendance à s'épuiser, limitant ainsi la croissance des végétaux et la productivité primaire.

**Doc. 3 :** Pour maintenir la fertilité du sol, l'agriculteur doit compenser les exportations d'éléments chimiques, en effectuant des apports d'engrais minéraux ou organiques :

Élément chimique	Exportation (récolte)	Pertes par lessivage	Restitution	Apports naturels	Bilan	Apports d'engrais
N	206	30 à 50	35	30	206 + (30 à 50) - 35 - 30	171 à 191
P	36	négligeable	2,5	0	36 - 2,5	33,5
K	216	négligeable	52	2,1	216 - 52 - 2,1	161,9
Ca	36	négligeable	14,3	10,1	36 - 14,3 - 10,1	11,6

Valeurs en kg·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'agriculteur dispose de plusieurs moyens pour assurer la productivité de ses cultures : apport d'engrais organiques ou minéraux, traitement par des pesticides, irrigation.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas** : fiche documentaire « Culture du maïs et gestion de la ressource en eau ».
- **« Agreste », la statistique, l'évaluation et la prospective agricole** (site du ministère de l'Agriculture). Ce portail donne accès à de très nombreuses données quantitatives sur l'agriculture française, fréquemment actualisées : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/>
- M. Mazoyer et L. Roudart, *Histoire des agricultures du monde*, Éditions du Seuil, 2002.
- **Une synthèse sur les besoins nutritifs du maïs, les carences, la fertilisation minérale et organique de cette culture, la méthode du bilan azoté :** [http://www.cipf.be/fr/files/Ferti\\_mais.pdf](http://www.cipf.be/fr/files/Ferti_mais.pdf)

## Pratiques culturelles et environnement (p.194-195)

Connaissances	Capacités et attitudes
Le coût énergétique et les conséquences environnementales posent le problème des pratiques utilisées. Le choix des techniques culturelles vise à concilier la nécessaire production et la gestion durable de l'environnement.	Faire preuve d'esprit critique en étudiant la conduite d'une culture quant à son impact sur l'environnement.

### 1. Les intentions pédagogiques

Il s'agit ici de montrer quelles conséquences peuvent avoir les pratiques agricoles modernes sur l'environnement et, par extension, sur la santé humaine.

L'étude est menée à partir de deux cas bien documentés : les apports excessifs d'azote et leurs conséquences sur la pollution des nappes phréatiques et des eaux superficielles d'une part, l'utilisation d'un insecticide à forte rémanence environnementale (le chlordécone) d'autre part.

Le **document 1** présente, à partir d'un extrait de rapport ministériel, la problématique des nitrates à l'échelle française. Il fait le lien entre des pratiques agricoles intensives, des apports excessifs d'azote dans les sols, l'eutrophisation des eaux superficielles et le phénomène de marée verte.

La complexité des causes à l'origine de cette pollution est esquissée dans le **document 2** : on constate que des quantités égales d'engrais azoté n'ont pas forcément le même effet, selon la texture du sol. L'étude présente des résultats obtenus avec le logiciel STICS (INRA). Il s'agit d'un outil destiné aux chercheurs, donc très performant. Cependant sa prise en main est assez rapide : il est envisageable de prolonger l'étude de ce document en faisant réaliser par les élèves d'autres simulations simples (variations de l'épaisseur du sol, de la culture, de la nature de l'engrais utilisé...).

Le **document 3** aborde le problème de la pollution de l'environnement par le chlordécone. À partir de cet exemple, la dangerosité d'une utilisation mal maîtrisée des pesticides chimiques est analysée : risques liés à la dissémination des produits dans l'atmosphère, le sol, l'eau..., risques liés à leur rémanence dans l'environnement, à leur toxicité à large spectre, à leur accumulation au sein de la pyramide écologique. Le danger pour l'environnement naturel est, comme dans l'exemple précédent, relié à un danger pour l'Homme : certains risques associés à une contamination de nos aliments et boissons par le chlordécone sont aujourd'hui établis.

### 2. Pistes d'exploitation

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** L'apport excessif d'azote sur les terres agricoles est une cause de l'eutrophisation. L'azote excédentaire résulte d'un mauvais équilibre entre les besoins des plantes (cultures, prairies) et les épandages d'engrais minéraux et d'effluents d'élevage. Les conséquences de l'eutrophisation sont la prolifération des bactéries, la consommation du dioxygène de l'eau, l'asphyxie de la faune aquatique et, finalement, sa disparition.

**Doc. 2 :** Sur sol sableux, la fertilisation azotée pratiquée n'apporte aucune amélioration du rendement en grains. En revanche, elle permet d'améliorer la teneur en azote

des grains, qui augmente à mesure que la dose d'engrais azoté augmente. Cependant, on constate que si on multiplie par quatre les apports d'ammonitrates (de 55 à 220 kg·ha<sup>-1</sup>), on multiplie aussi la lixiviation de l'azote par quatre (de 8 à 32 kg·ha<sup>-1</sup>). L'apport excessif d'engrais azotés de type ammonitrates est donc l'un des facteurs qui favorisent la pollution des nappes phréatiques par les nitrates. La comparaison avec la même simulation réalisée sur sol argileux montre que des apports croissants d'ammonitrates peuvent améliorer les rendements (jusqu'à 110 kg d'azote par ha) et la teneur en azote des grains. Contrairement au cas précédent, la lixiviation reste faible (environ 5 kg·ha<sup>-1</sup>) et n'augmente pas si on augmente les apports d'azote. La nature sableuse du sol est donc un second facteur qui favorise la pollution des nappes phréatiques par les nitrates.

**Doc. 3 :** Le chlordécone est très peu biodégradable : il persiste dans l'eau et contamine les végétaux. Puis il subit une bioaccumulation : il est stocké dans les graisses des consommateurs. Les écosystèmes fonctionnant de manière pyramidale (il faut en moyenne 10 kg de nourriture pour produire 1 kg d'être vivant), la concentration du chlordécone est multipliée par 10 d'un niveau trophique au suivant, comme l'indique la pyramide du document 3.

**Doc. 3 :** Le chlordécone est toxique pour le système nerveux, le foie, les régulations hormonales et la reproduction. Il augmente le risque de cancer de la prostate.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'agriculture intensive peut poser des problèmes de santé et d'environnement : l'excès d'azote provoque une eutrophisation des milieux aquatiques, se caractérisant par une prolifération en surface de végétaux verts. L'utilisation inconsidérée de pesticides peut se traduire par l'accumulation de produits toxiques dans les différents maillons des chaînes alimentaires.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas** : fiche documentaire « Pratiques culturelles et environnement : la fertilisation raisonnée ».
- **Observation et statistiques de l'environnement** : Ce site présente l'information et les données sur l'environnement assemblées par le service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Commissariat général au développement durable (CGDD). Il donne entre autre accès à l'outil de cartographie interactive « Geoidd France » :  
<http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/>
- **Accéder aux résultats d'analyses de l'eau du robinet de votre commune** :  
<http://www.sante.gouv.fr/resultats-du-controle-sanitaire-de-la-qualite-de-l-eau-potable.html>
- **Union des Industries de la Fertilisation (UNIFA)** : Ce site présente le point de vue de l'industrie des engrains sur les fonctions remplies par ces produits, sur leurs utilisations, mais aussi sur leurs conséquences environnementales et sur la santé humaine :  
<http://www.unifa.fr/index.php>
- **Pages du site « consoGlobe »** : portail Internet « dédié au développement durable et à la nouvelle consommation responsable », consacrées aux résidus de pesticides dans nos aliments :  
<http://www.consglobe.com/developpement-durable-et-consommation-ecologique/>
- **Observatoire des résidus de pesticides, site gouvernemental**. On y trouvera de nombreuses informations utiles, entre autre sur le chlordécone :  
<http://www.observatoire-pesticides.gouv.fr/index.php>
- **Pesticides, agriculture et environnement**. Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA et le Cemagref à la demande du ministère de

- l’Agriculture et de la Pêche (MAP) et du ministère de l’Écologie et du Développement Durable (MEDD), décembre 2005 :  
[http://www.observatoire-pesticides.fr/upload/bibliotheque/704624261252893935317453066156/pesticides\\_synthese\\_inra\\_cemagref\\_pdf](http://www.observatoire-pesticides.fr/upload/bibliotheque/704624261252893935317453066156/pesticides_synthese_inra_cemagref_pdf)
- **Cancers et pesticides**, I. Baldy et P. Lebailly, Supplément à la revue du Praticien pp 40-44, vol. 57, 15 juin 2007. Monographie faisant le point sur le suivi d’une cohorte de 175 000 agriculteurs français concernant les liens éventuels entre leurs usages de pesticides et le développement de cancers :  
[http://references-sante-securite.msa.fr/files/SST/SST\\_1200049491062\\_CANCERS\\_ET\\_PESTICIDES.pdf](http://references-sante-securite.msa.fr/files/SST/SST_1200049491062_CANCERS_ET_PESTICIDES.pdf)

## Pratiques agricoles et développement durable (p.196-197)

Connaissances	Capacités et attitudes
Mettre en relation les pratiques agricoles locales et leurs implications globales (les limites de la planète cultivable sont bientôt atteintes : les ressources (eau, sol, énergie) sont limitées afin d'installer les bases de la réflexion qui conduit aux choix de pratiques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recenser, extraire et exploiter des informations sur la variété des agrosystèmes mondiaux et leurs caractéristiques.</li> <li>– Recenser et comparer différentes pratiques culturelles, du point de vue de leur durabilité (bilan carbone, bilan énergétique, biodiversité...).</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Le premier objectif de ces activités est de mettre en évidence la diversité des agrosystèmes. Il n'est bien entendu pas question de dresser un panorama, même partiel, de cette diversité à l'échelle planétaire. Il ne s'agit pas non plus de montrer que selon les climats et les sols, les cultures sont nécessairement différentes. On s'intéresse plutôt ici à la diversité des composantes humaines des agrosystèmes, du point de vue des techniques, mais aussi de leur insertion économique, culturelle et environnementale.

Deux exemples sont étudiés comparativement : les **documents 1 et 3** constituent des monographies succinctes de deux agrosystèmes tropicaux basés sur la culture du bananier. Des informations complémentaires sur ces deux types d'agrosystèmes sont apportées par le **document 4**, qui permet par ailleurs de constater leurs différences en termes de biodiversité, d'impacts environnementaux (sol, eau, pesticides, engrais...), et de productivité. L'étude de ces documents peut être l'occasion de montrer la complexité des questions posées par les agricultures contemporaines : chaque agrosystème à ses avantages et ses inconvénients, sur des plans différents, à des échelles différentes.

Le **document 2** fait référence aux bases historiques de la notion de développement durable, en citant un extrait du rapport Brundtland publié en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement des Nations Unies. Il définit le développement durable et insiste sur la nécessaire prise en compte des sphères écologiques, économiques et sociales pour le mettre en œuvre.

### 2. Pistes d'exploitation

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 2 :** Quelques caractéristiques d'un développement durable.

- **Viable** : qui peut vivre. Un développement durable doit concilier écologie et économie : l'un ne peut aller sans l'autre. La destruction des écosystèmes sape la base de l'économie, tandis qu'une préservation intransigeante de l'environnement bloque l'activité économique. Un équilibre doit être trouvé entre les deux composantes pour assurer la viabilité du modèle de développement.

- **Vivable** : où l'on peut vivre commodément. Le concept de développement durable présente aussi une interface entre les sphères sociale et écologique. Si les sociétés humaines ont légitimement vocation à utiliser les ressources naturelles pour la satisfaction de leurs besoins, certains modes de vie et la croissance démographique contribuent à détruire l'environnement, donc à le rendre de moins en moins vivable, habi-

table. Là aussi, un équilibre doit être recherché de façon à préserver l'environnement (et la santé) tout en permettant la satisfaction des besoins essentiels des humains.

• **Équitable** : qui procède de façon juste en respectant les droits de chacun. Le développement durable des sociétés humaines passe aussi par la recherche d'un équilibre entre les forces sociales et économiques. C'est la dimension politique de ce concept : afin d'assurer la durabilité du développement, il convient de réduire les inégalités et de promouvoir la justice.

**Doc. 1 à 4 :** Le jardin créole valorise la biodiversité cultivée (cultures associées) et préserve la biodiversité spontanée (pas ou peu de pesticides). Il préserve l'eau et les sols (paillage, travail du sol superficiel, restitutions organiques). Il contribue ainsi à un monde vivable. Les productions sont valorisées sur les marchés locaux, en circuit court et satisfont des besoins économiques, sociaux, culturels... Les termes de l'échange sont donc relativement équitables. En revanche, la productivité de ce type d'agrosystème est faible : on ne peut imaginer qu'il puisse, à lui seul, satisfaire les besoins de 9 milliards d'humains majoritairement urbains.

La plantation bananière a, quant à elle, une productivité beaucoup plus forte. Ce type d'agriculture industrielle joue un rôle majeur dans la sécurité alimentaire mondiale. Pourtant, il pose aussi de graves problèmes de viabilité et d'habitabilité des écosystèmes : perte de biodiversité, gaspillage d'eau, dégradation des sols, coût énergétique de la production, de son transport et de sa commercialisation...

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La diversité des agrosystèmes repose sur des pratiques agricoles très différentes les unes des autres. Les pratiques artisanales de proximité préservent l'environnement, la biodiversité mais ont en général une faible productivité. L'agriculture intensive tente de répondre au défi alimentaire mondial mais pose souvent des problèmes d'environnement ou de santé.

## 3. Ressources complémentaires

- La banane, sa culture, son commerce (site des Nations Unies) :  
<http://www.unctad.org/infocomm/francais/banane/culture.htm>
- Notre avenir à tous - Le rapport Brundtland, fondateur du concept de développement durable :  
[http://www.wikilivres.info/wiki/Rapport\\_Brundtland](http://www.wikilivres.info/wiki/Rapport_Brundtland)

La correction des exercices « **Tester ses connaissances** » figure dans le manuel de l’élève, page 352.

### 6 | Les effets des pesticides sur la procréation humaine

On constate que chez les hommes exposés aux pesticides agricoles (ruraux), le nombre de spermatozoïdes par mL de sperme est en baisse de 77 %. De plus, la mobilité des spermatozoïdes est amoindrie de 17 %. Chez les femmes rurales, la fréquence des accouchements prématurés est triplée, celle des naissances d’enfants de faible poids multipliée par 2,6. Il apparaît donc clairement qu’une forte exposition aux pesticides altère la fonction de procréation.

### 7 | Une pratique agricole : la fertilisation azotée

D’après le document 3, les trois régions considérées (Centre, Île-de-France, Bourgogne) sont spécialisées dans les grandes cultures (maïs grain, tournesol, céréales à paille, colza). Sur la carte de ce document, on voit en effet que celles-ci couvrent plus de 85 % des surfaces cultivées. Le document 1 nous apprend que ces cultures nécessitent une fertilisation azotée : la photographie **a** montre que la croissance du maïs est très affectée si les plantes sont carencées en azote. C’est pourquoi la quasi-totalité des surfaces consacrées aux grandes cultures reçoit une fertilisation azotée, comme le montre le graphe **b**. Le document 2 permet de préciser la nature des engrains azotés utilisés : 65 à 90 % des surfaces en grandes cultures sont fertilisées avec de l’azote uniquement minéral. Cela s’explique du fait de la spécialisation régionale des fermes françaises : les fumiers et lisiers qui pourraient être utilisés pour fertiliser les sols du Centre, de la Bourgogne et de l’Île-de-France se trouvent dans les régions d’élevage, comme la Normandie, la Bretagne et les Pays de Loire.

### 8 | L’agriculteur face à la pénurie d’eau

1. Pertes de rendements pour une satisfaction de 60 % des besoins : tournesol : – 15 % ; blé ou sorgho : – 25 % ; pois ou soja : – 38 % ; maïs : – 52 %.
2. Dans une région sèche, il sera préférable de cultiver le tournesol, le blé ou le sorgho, plutôt que le pois, le soja ou le maïs.
3. On sait que le rendement du maïs est très affecté par le manque d’eau ; ce n’est pas le cas pour le tournesol. Il est donc logique de constater que 44,5 % des surfaces cultivées en maïs grain sont irriguées, alors que 2 % seulement des surfaces cultivées en tournesol le sont. De plus, le maïs nécessite une irrigation de juin à août, ce qui consomme en moyenne  $1\ 300\ \text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ . Le tournesol n’est irrigué qu’en juillet, d’où une consommation plus modérée, de  $600\ \text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  en moyenne.

Les rendements du pois et du soja sont affectés de la même façon par le manque d’eau. Pourtant les proportions de surfaces irriguées et les consommations d’eau à l’hectare sont nettement supérieures pour le soja. Cela s’explique par le décalage de ces deux cultures dans le calendrier agricole : le soja est une culture d’été (irrigation en juillet et août) tandis que le pois est une culture de printemps (irrigation en mai).

### 9 | Comparer deux paysages agricoles

1. Sur le schéma du paysage **a**, devront apparaître les zones enherbées, les cultures, la haie, les zones boisées. Sur le schéma du paysage **b**, on verra surtout une vaste zone cultivée et un petit bosquet sur la ligne d’horizon.

**2.** La biodiversité est probablement plus forte dans le paysage **a**. Au niveau végétal, on distingue plusieurs espèces d'arbres et d'arbustes, des buissons, des plantes herbacées. Il est probable que ces végétaux soient à la base de réseaux trophiques assez riches (insectes, oiseaux...). Le paysage **b** ne montre, au contraire, aucune biodiversité naturelle : seule la plante cultivée est visible.

## 10 Le pilotage d'une culture sous contrainte hydrique

Les capacités attendues sont les suivantes :

- Être capable de justifier la nécessité de trouver un compromis entre rendement et consommation d'eau.
- Utiliser le logiciel STICS avec l'aide de la fiche technique.
- Respecter les consignes : seuls les paramètres apports d'eau et paillage du sol seront modifiés ; trois valeurs par paramètre au maximum.
- Adopter une démarche d'investigation : formuler des hypothèses, ne faire varier qu'un paramètre à la fois, tester diverses combinaisons judicieuses.
- Collecter des résultats (sous la forme d'un tableau numérique).
- Effectuer un calcul simple à l'aide d'un tableur.
- Proposer une solution au problème posé et justifier sa réponse.

Exemples de résultats avec et sans paillage, classés du plus efficace au moins efficace :

	Paillage	Sans paillage	Paillage	Paillage	Sans paillage	Sans paillage
<b>Apports d'eau (en mm)</b>	65	65	86	90	86	90
<b>Rendement (en t de grains/ha)</b>	3,77	3,04	3,95	3,95	3,18	3,23
<b>Efficacité de l'eau (en m<sup>3</sup>/t de grains)</b>	17,2	21,4	21,8	22,8	27,0	27,9

# Pratiques alimentaires et perspectives globales

## Activités pratiques

1

### Le défi alimentaire mondial (p. 210-211)

Connaissances	Capacités et attitudes
À l'échelle globale, l'agriculture cherche à relever le défi de l'alimentation d'une population humaine toujours croissante.	Utiliser des systèmes d'information géographique (SIG) pour déterminer l'importance des besoins (énergie, matière, sol, etc.) de la production mondiale agricole actuelle (et son évolution récente).

#### 1. Les intentions pédagogiques

En introduction à l'étude des enjeux alimentaires de notre époque, il convient de définir les grandes caractéristiques et tendances de la production agricole et de la consommation alimentaire mondiale. Les élèves ont appris en Seconde que la croissance démographique des pays pauvres d'une part, l'inégale répartition des ressources et de la consommation d'autre part provoquent une hausse du prélèvement effectué par l'humanité sur la productivité primaire, des tensions sur l'utilisation des terres et de l'eau, une baisse de la biodiversité, une dégradation des sols... Ces activités pratiques permettent de revenir sur ces notions, d'en préciser certains aspects, et d'exercer les élèves à l'utilisation de banques de données en ligne (FAOSTAT, UNEP) et d'un SIG (UNEP Geo Data Portal).

Du point de vue de la consommation alimentaire, les **documents 1 et 2** apportent des informations quantitatives et qualitatives qui montrent que la situation alimentaire mondiale s'est améliorée depuis 1961 (la disponibilité alimentaire moyenne a augmenté) mais aussi que de grandes inégalités géographiques persistent. On constate ainsi que dans les pays les plus pauvres (exemple du Niger), la part des produits animaux dans l'énergie alimentaire reste de l'ordre de 10 %, tandis qu'elle atteint 35 % dans un pays riche (exemple de la France). Entre ces deux situations extrêmes, le cas de la Chine illustre ce qu'est une transition alimentaire : à partir de 1980, le développement économique de ce pays s'accompagne d'une consommation croissante de produits animaux, faisant passer leur contribution à la ration énergétique quotidienne de 8 % en 1980 à 21 % en 2007. Croissance démographique, amélioration des niveaux de vie et augmentation de la consommation des aliments « de luxe » tels que les produits animaux se combinent et provoquent une forte augmentation de la demande alimentaire.

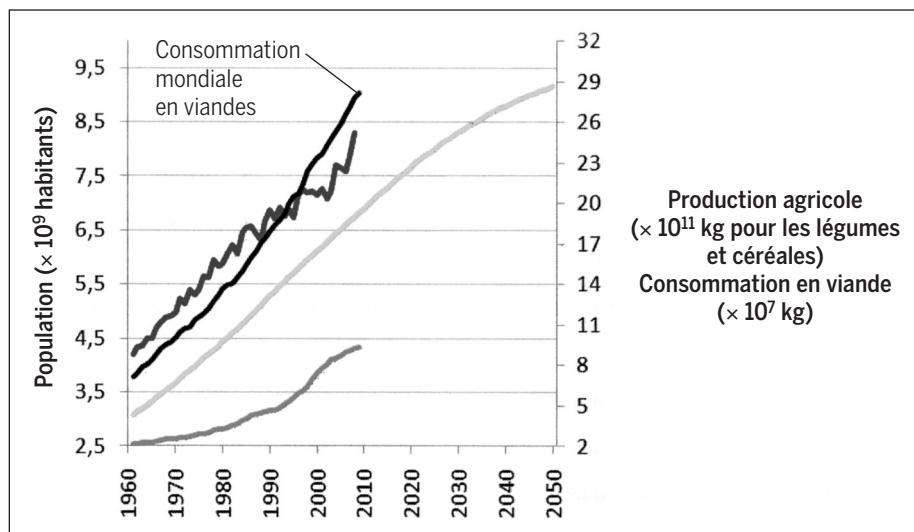
En conséquence, les ressources agricoles sont de plus en plus sollicitées à l'échelle mondiale. Le choix a été fait de s'appuyer sur un exemple : celui des engrains phosphatés (**document 3**). La ressource est minière, non renouvelable à l'échelle du temps

humain. Les réserves ne sont pas en voie d'épuisement à court terme, mais pourraient l'être à moyen terme (un siècle) comme le montrent les chiffres de l'USGS. Le lien est fait avec la démographie et l'économie : la carte fait apparaître que parmi les quatre principaux consommateurs de phosphates, on trouve la Chine, l'Inde et le Brésil. L'indice du prix des engrains traduit le déséquilibre croissant entre demande d'intrants agricoles et ressources naturelles disponibles pour leur production.

## 2. Pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Groupe complété à partir des données FAOSTAT sur la production mondiale de viande de 1961 à 2009 :



La population mondiale est passée entre 1961 et 2009 de 3 à 6,8 milliards d'individus, soit une croissance de 127 %. On constate que la production de céréales progresse quant à elle de 188 %, celle de légumes de 326 %, celle de viande de 294 %.

La production alimentaire progresse plus vite que la population mondiale : la quantité d'aliments disponible par habitant augmente donc au cours de cette période, en moyenne mondiale. Comme le montre le document 2, cela cache cependant des inégalités régionales : certains pays très pauvres voient leur consommation de viande stagner à un niveau très faible (Niger) tandis que d'autres, en plein développement, voient la part de viande dans la ration alimentaire quotidienne progresser nettement (c'est le cas de la Chine).

**Doc. 1 à 3 :** La croissance démographique d'une part, l'augmentation du niveau de vie moyen d'autre part provoquent au niveau mondial une augmentation de la demande alimentaire. Pour répondre à ces besoins, de nouvelles terres sont mises en culture, et on cherche à améliorer les rendements agricoles. Cela se traduit par une hausse de la demande en engrais (et autres intrants agricoles). Dans le cas des phosphates par exemple, une pression plus forte s'exerce sur les ressources minières, ce qui fait augmenter le prix des engrais phosphatés.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Pour répondre au défi alimentaire lancé par l'actuelle croissance démographique, l'agriculture mondiale doit accroître les surfaces cultivées. Cependant, les réserves en

terres cultivables étant limitées, il faut aussi améliorer les rendements pour permettre une augmentation de la production agricole.

### 3. Ressources complémentaires

- **FAOSTAT : base de données de la FAO.**  
<http://faostat.fao.org/default.aspx?lang=fr>
- M. Mazoyer et L. Roudart, *Histoire des agricultures du monde*, Éditions du Seuil, 2002.
- **L'agriculture mondialisée**, J.-P. Charvet, La documentation française, dossier n°8059, sept. –oct. 2007.
- **Alimentation (Comportement et pratiques alimentaires), Évolution de la consommation.** Article de l'Encyclopædia Universalis présentant, entre autres, l'évolution de la consommation alimentaire au cours de l'Histoire, en lien avec les changements socio-économiques.
- **Sur le site de l'UNIFA (Union des industries de la fertilisation), des données statistiques sur la production et les livraisons d'engrais en France, de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle à nos jours.**  
<http://www.unifa.fr/le-marche-en-chiffres/la-fertilisation-en-france.html>
- **Banque de données mondiales sur la production, les échanges, la demande de produits minéraux.** De nombreuses données concernent les engrains azotés, phosphatés et potassiques :  
<http://minerals.usgs.gov/minerals/>
- **Base de données en ligne et système d'information géographique du PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement).** On y trouvera des données sur l'évolution au cours du temps de la production et de la consommation des divers engrains dans le monde.  
<http://geodata.grid.unep.ch/>

## Les élevages : des agrosystèmes peu efficaces (p. 212-213)

Connaissances	Capacités et attitudes
Dans un agrosystème, le rendement global de la production par rapport aux consommations (énergie, matière) dépend de la place du produit consommé dans la pyramide de productivité. Ainsi, consommer de la viande ou un produit végétal n'a pas le même impact écologique.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recenser, extraire et exploiter des informations, utiliser des bases de données et des logiciels pour comparer les bilans d'énergie et de matière (dont l'eau) de différents élevages, et comparer production animale et production végétale.</li> <li>- Faire preuve d'esprit critique en étudiant la conduite d'un élevage quant à son impact sur l'environnement.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Après la mise en évidence d'une consommation de plus en plus forte de produits animaux à l'échelle mondiale (activités précédentes), on centre à présent l'attention des élèves sur les conséquences environnementales de ce changement d'habitudes alimentaires. Ici, ce sont surtout les conséquences locales qui sont envisagées. Les conséquences globales seront étudiées dans les activités des pages suivantes.

Il s'agit donc, dans un premier temps, de mettre en évidence que l'efficacité énergétique d'un élevage est bien inférieure à celle d'une culture. C'est l'objet des **documents 1 et 2**. Outre les données chiffrées apportées par ces documents, on s'appuiera utilement sur le rappel de la notion de pyramide des productivités (voir p. 191). Remis dans une perspective écologique, le faible rendement énergétique des productions animales apparaît alors non comme un défaut des systèmes d'élevage, mais comme une caractéristique intrinsèque du vivant.

Le **document 3** aborde un autre aspect de ce même phénomène : les consommations d'eau pour produire divers aliments sont comparées. Rapportées à l'unité de valeur énergétique par un calcul simple, les consommations d'eau des aliments d'origine animale apparaissent jusqu'à 70 fois supérieures à celles des aliments d'origine végétale.

Le **document 4** introduit une autre situation d'élevage, celle des piscicultures de saumons. L'exemple permet de montrer que si les élevages d'herbivores sont peu efficaces, c'est encore pire pour les élevages de carnivores, du fait même de leur position dans la pyramide de productivité. Les conséquences environnementales de ces élevages de poissons seront abordées dans les activités suivantes (document 4 page 215).

### 2. Pistes d'exploitation

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Il faut environ 8 kg d'aliment végétal pour qu'une vache produise 1 kg de poids vif. La valeur énergétique de l'aliment consommé pour produire 1 kg animal est donc de  $8 \times 5\ 675 = 45\ 400$  kJ. La part d'énergie consacrée à la croissance effective de l'animal est donc de  $100 \times 6\ 300 / 45\ 400 = 13,9$  %. Sur 1 kg de poids vif, 390 g seulement sont sous forme de viande. La part d'énergie végétale que l'on retrouve dans la viande est donc de  $0,39 \times 13,9 = 5,41$  %.

**Doc. 3 :**

<b>La production d'1 kJ de...</b>	<b>utilise un volume d'eau de...</b>
Pomme de terre	0,03 L
Blé	0,08 L
Riz	0,09 L
Lait	0,29 L
Œufs	0,46 L
Porc	0,75 L
Volaille	0,82 L
Bœuf	2,14 L

**Doc. 4 :** Il faut environ 365 jours pour produire un saumon de 5 kg. La croissance est considérée comme linéaire pour chacune des phases de croissance dont les durées sont fournies dans le tableau du document 4. On peut donc calculer pour chaque phase la croissance quotidienne. Cela permet à l'aide du tableur de calculer la masse d'un saumon, jour après jour jusqu'à ce qu'il atteigne son poids commercial de 5 kg, puis la biomasse présente dans une cage de 50 000 individus. Connaissant, grâce au tableau du document 4, la quantité de granulés à distribuer en fonction de la biomasse des poissons, on en déduit la quantité de granulés consommé par la cage quotidiennement, ainsi que son cumul au cours de la croissance des saumons. On constate alors qu'il faut 319 550 kg de granulés pour produire les 50 000 saumons de 5 kg, soit 6,4 kg de granulés par saumon, ou 1,28 kg de granulés pour 1 kg de saumon commercialisable. Le texte du document 4 nous apprend que 6 kg de poissons fourrages sont nécessaires pour fabriquer 1 kg de granulés pour saumon. La production d'1 kg de saumon nécessite donc 7,7 kg de poissons fourrages.

**Doc. 1 à 4 :** La production animale nécessite en amont la production des aliments destinés aux animaux. Le rendement de conversion énergétique étant faible (inférieur à 10 %) l'efficacité des élevages est nécessairement plus faible que celle des cultures. C'est également pourquoi les élevages consomment beaucoup plus d'eau que les cultures, à quantité d'énergie égale. L'efficacité est encore plus réduite dans le cas d'un élevage de prédateurs, tels que les saumons.

**Synthèse : réponse au problème à résoudre**

La production d'1 kg de viande nécessite la production de 8 kg d'aliments végétaux. De même, la production d'1 kg de poisson nécessite de produire 7,7 kg de « poissons fourrages » eux-mêmes obtenus à partir d'aliments végétaux.

À quantités égales, la production de viande ou de poisson exige donc beaucoup plus de ressources que la production de blé.

## Pratiques alimentaires et environnement global (p.214-215)

Connaissances	Capacités et attitudes
Mettre en relation les pratiques alimentaires locales et leurs implications globales (les limites de la planète cultivable sont bientôt atteintes : les ressources (eau, sol, énergie) sont limitées) afin d'installer les bases de la réflexion qui conduit aux choix de pratiques.	Recenser, extraire et exploiter des informations, utiliser des bases de données et des logiciels pour comprendre : – l'impact global des pratiques alimentaires ; – la gestion de populations et/ou de peuplements naturels.

### 1. Les intentions pédagogiques

En prolongement des activités précédentes (pages 212 et 213), on envisage à présent quelques conséquences globales de nos pratiques alimentaires.

Une première conséquence est étudiée dans les **documents 1 et 2** : il s'agit de la contribution de nos aliments et de nos choix alimentaires au réchauffement climatique. On pourra insister sur le fait que 30 % des gaz à effet de serre libérés par les activités humaines sont liés à la production de nos aliments et que la production d'un kilogramme de steak haché en libère 230 fois plus que celle d'un kilogramme de pommes de terre ! L'attention pourra aussi être attirée sur le fait que ces valeurs tiennent compte non seulement de la production agricole, mais aussi de ce que cela suppose en amont et en aval. Le document 2 vise à faire réfléchir les élèves sur les conséquences de leurs habitudes alimentaires. La réalisation de bilans carbone individuels à l'aide d'un site internet spécialisé pourra être l'occasion d'initier un débat sur ce thème.

Le **document 3** explore quelques-unes des conséquences écologiques de la demande croissante de viande, sur l'exemple des relations inattendues entre la destruction des écosystèmes tropicaux et le contenu de nos assiettes. Le lien est fait entre le steak que nous savourons et la déforestation, la dégradation qualitative et quantitative des sols et des eaux en Amazonie.

Le **document 4** fait écho à l'étude d'un élevage de saumons, menée dans l'activité précédente (p. 213). Sous la plume de spécialistes de cette question, ce document décrit les conséquences dramatiques de la surpêche sur les populations de poissons sauvages, à l'échelle de l'océan mondial.

### 2. Pistes d'exploitation

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Du fait de leur mauvais rendement énergétique, les aliments d'origine animale libèrent pour leur production beaucoup plus de gaz à effet de serre que ceux d'origine végétale. C'est pourquoi ils dégradent nettement le bilan carbone des consommateurs comme Yvan. Parmi les autres facteurs défavorables, on note la consommation de fruits et légumes exotiques ou hors saison, qui consomment de l'énergie pour leur transport, leur conservation, leur stockage... ce qui libère des gaz à effet de serre. L'utilisation d'engrais minéraux, de pesticides chimiques par l'agriculture conventionnelle (non biologique) dégrade aussi le bilan carbone des aliments qu'elle produit par rapport aux mêmes aliments issus de l'agriculture biologique. Limiter la consommation de viande, favoriser la consommation de produits locaux, de saison, issus de l'agriculture biologique contribue donc à lutter contre le dérèglement climatique.

**Doc. 3 :** Le soja destiné au bétail français provient entre autre de l'agriculture brésilienne. Il s'agit de cultures intensives qui provoquent la pollution des sols tropicaux du fait de l'utilisation de pesticides. Le steak que nous mangeons en France contribue donc à polluer les sols amazoniens.

**Doc. 4 :** Les poissons d'élevage sont des prédateurs de premier ordre (niveau trophique 3). Lorsque nous les consommons, nous sommes donc des prédateurs de second ordre (niveau trophique 4). Cette pratique modifie profondément les biocénoses marines en épousant les populations de petits poissons sauvages, utilisés comme « fourrage » pour nourrir les poissons d'élevage.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Nos comportements alimentaires individuels ont des conséquences parfois insoupçonnées sur l'environnement planétaire : contribution au réchauffement climatique du fait du rejet de CO<sub>2</sub> nécessaire à la production des aliments, surexploitation de milieux naturels par exemple.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas :** fiche documentaire « Manger de la viande nuit-il à l'environnement ? »
- **Monoculture de soja : consommer de façon responsable de la viande pour baisser notre impact sur les forêts. Rapport du WWF** (source du document 3 p 91).  
[http://www.protegelaforet.com/sites/default/files/FICHE\\_SOJA\\_PC.pdf](http://www.protegelaforet.com/sites/default/files/FICHE_SOJA_PC.pdf)
- **Des sites pour évaluer son bilan carbone personnel :**  
<http://www.calculateurcarbone.org/>  
<http://www.coachcarbone.org/>
- **Des gaz à effet de serre dans mon assiette ?** Une affiche informative et ludique permettant de faire le lien entre nos habitudes alimentaires et le réchauffement climatique.  
[http://www.coachcarbone.org/ccarbone-static/data/documents/guide\\_RAC\\_GES\\_assiette.pdf](http://www.coachcarbone.org/ccarbone-static/data/documents/guide_RAC_GES_assiette.pdf)
- **Des informations très détaillées sur la contribution au réchauffement climatique de nos habitudes alimentaires.**  
[http://www.coachcarbone.org/ccarbone-static/data/documents/guide\\_RAC\\_GES\\_assiette.pdf](http://www.coachcarbone.org/ccarbone-static/data/documents/guide_RAC_GES_assiette.pdf)

## Quelles agricultures pour demain ? (p.216-217)

Connaissances	Capacités et attitudes
Le choix des techniques culturales vise à concilier la nécessaire production et la gestion durable de l'environnement. Il est nécessaire de prendre en compte l'environnement pour en assurer la durabilité.	Recenser, extraire et exploiter des informations sur les recherches actuelles permettant d'améliorer la production végétale dans une logique de développement durable.

### 1. Les intentions pédagogiques

Les activités de ce chapitre et du précédent ont montré que de nombreux problèmes résultent des pratiques agricoles et alimentaires les plus répandues aujourd’hui. Ces pages apportent un éclairage sur quelques pistes explorées par les agriculteurs, les scientifiques, les consommateurs, pour trouver des solutions et assurer la durabilité de notre alimentation. Deux grandes pistes sont évoquées, celle d'une agriculture industrielle de haute technologie et celle d'une agriculture paysanne et écologique. Il ne s'agit pas de les opposer mais de faire apparaître des alternatives, d'initier la réflexion sur la complexité des réponses à apporter, sur la possible complémentarité entre des solutions très différentes.

Le **document 1** présente l'exemple de la sélection génétique du maïs. Trois étapes majeures sont abordées, leurs avantages et inconvénients comparés : la sélection de variétés paysannes, la sélection de variétés hybrides, l'obtention de variétés transgéniques.

Le **document 2** présente l'agriculture de précision, une autre piste technologique, adaptée à une agriculture industrielle. Le manuel de Seconde illustre (p. 151) l'utilisation de capteurs embarqués pour cartographier très précisément le rendement d'une culture de blé et pourra être utilisé comme source complémentaire à cette occasion.

Le **document 3** s'appuie sur l'exemple de l'agroforesterie pour montrer que les pratiques agricoles anciennes ne présentent pas que des inconvénients. Leur adaptation aux contraintes imposées par la modernité est un des objets de la recherche agronomique. Les savoirs traditionnels et scientifiques se conjuguent dans le cas de l'agroforesterie pour apporter des solutions innovantes aux problèmes de productivité, de conservation des sols et de l'eau, de changement climatique, d'érosion de la biodiversité...

Enfin le **document 4** évoque une innovation organisationnelle à travers l'exemple des AMAPP. Il permet de montrer que les scientifiques et les agriculteurs ne sont pas les seuls à pouvoir contribuer à la recherche de solutions : les citoyens que nous sommes tous ont aussi des moyens d'agir en changeant leurs habitudes de consommation, en participant à la réorganisation des filières de distribution des denrées alimentaires...

## 2. Pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

Doc. 1 :

	Variétés paysannes	Variétés hybrides	Variétés transgéniques
Mode d'obtention	Agriculteur	Scientifiques	Scientifiques
Approvisionnement en semences	Par prélèvement sur la récolte	Achat auprès des semenciers industriels	Achat auprès des semenciers industriels
Productivité	Faible	Forte	Forte
Stabilité des caractéristiques	Faible	Forte	Forte
Biodiversité variétale	Forte	Faible	Faible
Résistance aux aléas	Forte	Faible	Faible
Utilisation d'intrants	Faible	Forte	Forte

**Doc. 2 :** L'agriculture de précision permet d'ajuster les pratiques agricoles au plus près des besoins de la plante (eau, engrais, pesticides...). Cela limite la consommation de ces intrants, en augmente l'efficacité, ce qui contribue à l'amélioration des rendements et à la protection de l'environnement.

**Doc. 3 :** Les effets attendus d'un développement de l'agroforesterie sont principalement les suivants :

- Augmentation de la productivité primaire agricole.
- Lutte contre le réchauffement climatique.
- Lutte contre l'érosion des sols (ruissellement, vent).
- Économie d'engrais et lutte contre l'eutrophisation des eaux.
- Renforcement de la biodiversité en zone agricole et diminution de la consommation de pesticides (développement des espèces utiles).

**Doc. 4 :** Les AMAPP « contribuent au développement d'une économie solidaire entre ville et campagne » et « le prix de vente des produits est équitable » : elles se soucient donc du social. Les techniques de production des agriculteurs adhérents sont annoncées comme « respectueuses de l'environnement » : les AMAPP se soucient aussi d'éologie. Enfin, les AMAPP visent à « soutenir, maintenir les producteurs-paysans locaux » : elles se soucient d'économie. A la croisée de ces trois préoccupations sociale, écologique et économique, les AMAPP s'inscrivent bien dans les critères du développement durable.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Pour assurer la durabilité de notre alimentation, producteurs et consommateurs sont conduits à rechercher toujours plus d'innovations scientifiques et technologiques mais peuvent aussi trouver des solutions dans des savoir-faire et pratiques traditionnels.

## 3. Ressources complémentaires

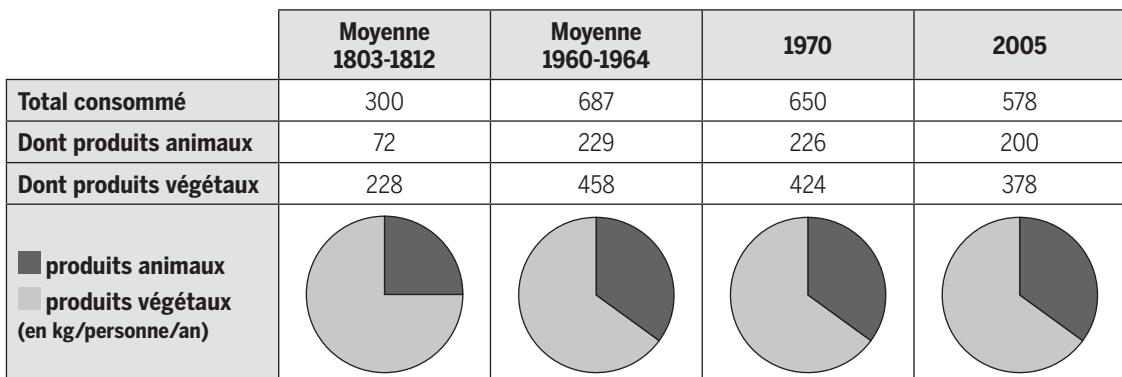
- **Manuel numérique Bordas** : fiche documentaire « Amélioration génétique et poissons d'élevage »
- **Groupement National Interprofessionnel des Semences et Plants.** Site de référence présentant le point de vue des professionnels sur la production des semences et l'amélioration variétale. Consulter en particulier l'espace pédagogique.  
<http://www.gnis.fr/>

- **Pour amorcer un débat autour des OGM :**  
<http://www.linternaute.com/science/environnement/dossiers/06/0602-bons-ogm/>  
<http://www.fao.org/french/newsroom/focus/2003/gmo1.htm>
- **Film documentaire :** C. Serreau, Solutions locales pour un désordre global, éditions Montparnasse, 2010.
- **Agrimonde : opération prospective « Agricultures et alimentations du monde en 2050 »** conduite de juin 2006 à décembre 2008 par l'INRA et le CIRAD.  
<http://www.paris.inra.fr/prospective/projets/agrimonde>
- **Site de l'association française d'agroforesterie :**  
<http://www.agroforesterie.fr/>
- **Mouvement interrégional des AMAP :**  
<http://miramap.org/>

La correction des exercices « **Tester ses connaissances** » figure dans le manuel de l’élève, page 352.

## 6 | Évolution de la consommation alimentaire en France

1. et 2.



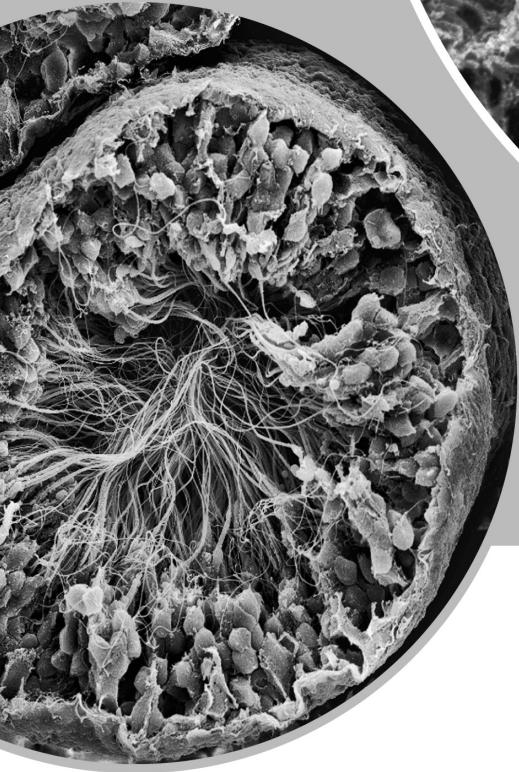
3. Variations de la consommation de chaque catégorie d’aliment entre 1803-1812 et 2005 :

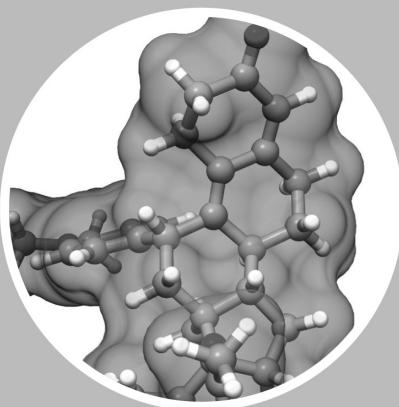
	Variation (en %)
<b>pain</b>	- 63
<b>pommes de terre</b>	+ 243
<b>fruits et légumes</b>	+ 292
<b>huiles</b>	+ 900
<b>sucré</b>	+ 600
<b>poisson</b>	+ 267
<b>viande</b>	+ 375
<b>œufs</b>	+ 367
<b>lait</b>	+ 29
<b>fromage</b>	+ 800
<b>beurre</b>	+ 300

4. On constate que la quantité totale d’aliments consommée en une année par un français a plus que doublé entre 1803 et 2005. Elle semble aujourd’hui en diminution de 11 % par rapport à 1970. Par ailleurs, on voit que la part d’aliments d’origine animale a progressé : elle est passée de 24 % en 1803-1812 à 35 % à partir de 1970 et jusqu’à 2005. Parmi les produits animaux qui ont le plus progressé, on trouve les fromages (+ 800 %), les viandes (+ 375 %) et les œufs (+ 367 %). Parmi les aliments d’origine végétale, la consommation de pain a régressé de 63 %, tandis que celles des huiles et du sucre ont très fortement progressé. Au cours du xx<sup>e</sup> siècle, la France a donc connu une transition alimentaire, d’un régime de pénurie, basé sur les céréales vers un régime d’abondance, plus riche en graisses, en sucre, en produits d’origine animale.

## **7 Combien de kilomètres dans mon assiette ?**

- 1.** Pour assembler tous les ingrédients du yaourt, les constituants de son contenant et de son emballage, puis pour l'acheminer jusqu'à la table du consommateur, 9 115 kilomètres auront dû être parcourus.
- 2.** Cette distance correspond à un quart du tour de la Terre. Tout au long de ces kilomètres, de l'énergie a été dépensée. L'utilisation de carburants fossiles libère des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et contribue au réchauffement climatique.
- 3.** On peut favoriser le remplacement des énergies fossiles par des énergies renouvelables ; on peut aussi rapprocher les lieux de production des consommateurs, en favorisant des filières courtes (produits « du terroir »). On peut enfin veiller à limiter le gaspillage des kilomètres alimentaires, en gérant mieux son réfrigérateur afin de ne plus jeter de produits périssables.





Partie **4**

# Corps humain et santé

<b>Chapitre 1</b>	Devenir homme ou femme .....	162
<b>Chapitre 2</b>	Sexualité et procréation .....	171
<b>Chapitre 3</b>	Variation génétique et santé .....	186
<b>Chapitre 4</b>	La vision : de la lumière au message nerveux .....	201
<b>Chapitre 5</b>	Cerveau et vision .....	216

## Les objectifs généraux de cette partie

Cette partie du programme regroupe trois thématiques *a priori* assez différentes avec la sexualité, les maladies génétiques et les mécanismes de la vision. Elles permettent cependant toutes d'aborder des questions de santé humaine, de responsabilité individuelle et d'éducation à la santé.

Les chapitres traitant de la sexualité s'appuient assez largement sur des acquis des classes de Quatrième et de Troisième : les systèmes de régulation des fonctions de reproduction chez l'homme et la femme ont été abordés, ainsi que les autres questions liées à la contraception, à la PMA et aux IST. Il y a cependant des nouveautés avec la mise en place des appareils génitaux et les bases physiologiques de la sexualité.

Les acquis de Troisième et de Première sont également importants pour le chapitre concernant les variations génétiques. Il sera en effet nécessaire de savoir ce qu'est un gène, un allèle, une mutation pour bien comprendre les exemples proposés. Il y a de nombreux points à aborder en un temps relativement limité. Les documents proposés permettent donc aux enseignants de travailler les notions, capacités et attitudes attendues sans y passer trop de temps. Ils pourront également choisir de détailler plus ou moins certains points en fonction des choix qu'ils auront faits.

Cette partie du programme permet de développer un certain nombre de compétences :

- **Des connaissances** : On va tout d'abord reconstituer les étapes biologiques déterminant l'état masculin ou féminin d'un individu. Puis les différents aspects de la sexualité seront envisagés : sa régulation hormonale, son contrôle par des techniques médicales visant à augmenter ou diminuer la fertilité, le volet « hygiène et sexualité » avec l'étude des IST et enfin une première approche du déterminisme du comportement sexuel. Puis un chapitre sera consacré aux liens entre les variations génétiques et la santé. Ces variations génétiques pourront concerner l'individu avec le développement de maladies comme la mucoviscidose, les maladies cardiovasculaires ou le cancer ; elles seront également examinées chez les bactéries car l'apparition de formes de résistance aux antibiotiques chez ces dernières risque de poser des problèmes important dans un avenir proche. Enfin, les mécanismes de la vision seront étudiés, en cherchant à comprendre les rôles du cristallin, de la rétine et la formation des images dans le cerveau.
- **Des capacités** : Le chapitre 3 donne de nombreuses occasions de travailler sur des logiciels de modélisation moléculaire ou d'analyse de séquences. Il permet également de faire des expérimentations avec la réalisation d'antibiogrammes. Les chapitres 1 et 2 sont de bons supports pour travailler la technique du schéma fonctionnel, qu'il soit à créer ou à compléter : système de régulation, actions des hormones de synthèse, construction du phénotype sexuel, facteurs jouant sur le comportement sexuel. La transcription de phénomènes biologiques en schémas nécessite un travail mental complexe qui pourra donc être développé ici. Il y a enfin de nombreuses occasions de lancer des débats, et de discuter sur des points de bioéthique.

- Des attitudes** : Le bon déroulement d'un débat, d'une discussion ne peut se faire que s'il y a respect de l'opinion des autres. On pourra également ici travailler la notion de responsabilité civique au travers de comportements à risque et de conseils d'hygiène ou de suivis médicaux. La réalisation d'un antibiogramme nécessite enfin de respecter des consignes de sécurité strictes.

## Une correspondance entre le programme officiel et les chapitres du manuel

Connaissances	Les chapitres du manuel
<b>THÈME 3-A FÉMININ, MASCHULIN</b>	
<b><i>Devenir femme ou homme</i></b>  Les phénotypes masculin et féminin se distinguent par des différences anatomiques, physiologiques, et chromosomiques. La mise en place des structures et de la fonctionnalité des appareils sexuels se réalise, sous le contrôle du patrimoine génétique, sur une longue période qui va de la fécondation à la puberté, en passant par le développement embryonnaire et fœtal.  La puberté est la dernière étape de la mise en place des caractères sexuels.	<b>chapitre 1</b>  <b>Devenir homme ou femme</b> (pages 234-251) <b>Les activités pratiques</b> <b>Act. 1</b> L'origine commune d'appareils génitaux différents <b>Act. 2</b> Du sexe chromosomique au sexe gonadique <b>Act. 3</b> Sexe gonadique et développement des voies génitales <b>Act. 4</b> La mise en place des caractères sexuels de l'adulte
<b><i>Sexualité et procréation</i></b>  Chez l'homme et la femme, le fonctionnement de l'appareil生殖 est contrôlé par un dispositif neuroendocrinien qui fait intervenir l'hypothalamus, l'hypophyse et les gonades. La connaissance de ces mécanismes permet de comprendre et de mettre au point des méthodes de contraception féminine préventive (pilules contraceptives) ou d'urgence (pilule du lendemain). Des méthodes de contraception masculine hormonale se développent. D'autres méthodes contraceptives existent, dont certaines présentent aussi l'intérêt de protéger contre les infections sexuellement transmissibles.  L'infertilité des couples peut avoir des causes variées. Dans beaucoup de cas, des techniques permettent d'aider les couples à satisfaire leur désir d'enfant : insémination artificielle, Fivete, ICSI.	<b>chapitre 2</b>  <b>Sexualité et procréation</b> (pages 252-2177) <b>Les activités pratiques</b> <b>Act. 1</b> La double fonction des glandes génitales <b>Act. 2</b> Réguler la fonction de reproduction chez l'homme <b>Act. 3</b> Réguler la fonction de reproduction chez la femme <b>Act. 4</b> La contraception hormonale chez la femme <b>Act. 5</b> La prévention contre les IST <b>Act. 6</b> L'infertilité et l'aide à la procréation <b>Act. 7</b> Sexualité et bases biologiques du plaisir
<b><i>Sexualité et bases biologiques du plaisir</i></b>  L'activité sexuelle est associée au plaisir.  Le plaisir repose notamment sur des phénomènes biologiques, en particulier l'activation dans le cerveau des « systèmes de récompense ».	

Connaissances	Les chapitres du manuel	
<b>THÈME 3-B VARIATION GÉNÉTIQUE ET SANTÉ</b>		
<b><i>Patrimoine génétique et maladie</i></b>	<b>Chapitre 3</b> <b>Variation génétique et santé</b> (pages 278-301) <b>Les activités pratiques</b> <b>Act. 1</b> La mucoviscidose, un exemple de maladie génétique <b>Act. 2</b> La prise en charge d'un patient atteint de mucoviscidose <b>Act. 3</b> Des maladies génétiques dépendantes de l'environnement <b>Act. 4</b> Une altération du génome peut évoluer en cancer <b>Act. 5</b> L'origine de la cancérisation <b>Act. 6</b> La résistance bactérienne aux antibiotiques	
<p>La mucoviscidose est une maladie fréquente, provoquée par la mutation d'un gène qui est présent sous cette forme chez une personne sur 40 environ. Seuls les homozygotes pour l'allèle muté sont malades.</p> <p>Le phénotype malade comporte des aspects macroscopiques qui s'expliquent par la modification d'une protéine. L'étude d'un arbre généalogique permet de prévoir le risque de transmission de la maladie.</p> <p>On limite les effets de la maladie en agissant sur des paramètres du milieu. La thérapie génétique constitue un espoir de correction de la maladie dans les cellules pulmonaires atteintes.</p> <p>Le plus souvent, l'impact du génome sur la santé n'est pas un déterminisme absolu. Il existe des gènes dont certains allèles rendent plus probable le développement d'une maladie sans pour autant le rendre certain. En général les modes de vie et le milieu interviennent également, et le développement d'une maladie dépend alors de l'interaction complexe entre facteurs du milieu et génome.</p> <p>Un exemple de maladie (maladie cardiovasculaire, diabète de type II) permet d'illustrer le type d'études envisageables.</p>		
<b><i>Perturbation du génome et cancérisation</i></b>		
<p>Des modifications accidentnelles du génome peuvent se produire dans des cellules somatiques et se transmettre à leurs descendantes. Elles sont à l'origine de la formation d'un clone cellulaire porteur de ce génome modifié. La formation d'un tel clone est parfois le commencement d'un processus de cancérisation.</p> <p>Des modifications somatiques du génome surviennent par mutations spontanées ou favorisées par un agent mutagène. D'autres sont dues à des infections virales.</p> <p>La connaissance de la nature des perturbations du génome responsable d'un cancer permet d'envisager des mesures de protection (évitement des agents mutagènes, surveillance, vaccination).</p>		
<b><i>Variation génétique bactérienne et résistance aux antibiotiques</i></b>		
<p>Des mutations spontanées provoquent une variation génétique dans les populations de bactéries. Parmi ces variations, certaines font apparaître des résistances aux antibiotiques.</p> <p>L'application d'un antibiotique sur une population bactérienne sélectionne les formes résistantes et permet leur développement. L'utilisation systématique de traitements antibiotiques peut augmenter la fréquence des formes résistantes par sélection naturelle.</p>		

Connaissances	Les chapitres du manuel
<b>THÈME 3-C DE L'ŒIL AU CERVEAU : QUELQUES ASPECTS DE LA VISION</b>	
<p><b><i>Le cristallin : une lentille vivante</i></b></p> <p>Le cristallin est l'un des systèmes transparents de l'œil humain. Il est formé de cellules vivantes qui renouvellent en permanence leur contenu. Les modalités de ce renouvellement sont indispensables à sa transparence.</p> <p>Des anomalies de forme du cristallin expliquent certains défauts de vision. Avec l'âge sa transparence et sa souplesse peuvent être altérées.</p> <p><b><i>Les photorécepteurs : un produit de l'évolution</i></b></p> <p>La rétine est une structure complexe qui comprend les récepteurs sensoriels de la vision appelés photorécepteurs. Celle de l'Homme contient les cônes permettant la vision des couleurs (3 types de cônes respectivement sensibles au bleu, au vert et au rouge) et les bâtonnets sensibles à l'intensité lumineuse.</p> <p>Les gènes des pigments rétiniens constituent une famille multigénique (issue de duplications) dont l'étude permet de placer l'Homme parmi les primates.</p> <p>Des anomalies des pigments rétiniens se traduisent par des perturbations de la vision des couleurs.</p> <p>Le message nerveux issu de l'œil est acheminé au cerveau par le nerf optique.</p>	<p><b>Chapitre 4</b></p> <p><b>La vision : de la lumière au message nerveux</b> (pages 302-323)</p> <p><b>Les activités pratiques</b></p> <p><b>Act. 1</b> Le cristallin : une lentille vivante  <b>Act. 2</b> La rétine : une mosaïque de photorécepteurs  <b>Act. 3</b> Les rôles complémentaires des photorécepteurs  <b>Act. 4</b> Vision des couleurs et parenté chez les primates  <b>Act. 5</b> De la rétine au cerveau</p>
<p><b><i>Cerveau et vision : aires cérébrales et plasticité</i></b></p> <p>Plusieurs aires corticales participent à la vision.</p> <p>L'imagerie fonctionnelle du cerveau permet d'observer leur activation lorsque l'on observe des formes, des mouvements. La reconnaissance des formes nécessite une collaboration entre les fonctions visuelles et la mémoire.</p> <p>Des substances comme le LSD perturbent le fonctionnement des aires cérébrales associées à la vision et provoquent des hallucinations qui peuvent dériver vers des perturbations cérébrales graves et définitives.</p> <p>La mise en place du phénotype fonctionnel du système cérébral impliqué dans la vision repose sur des structures cérébrales innées, issues de l'évolution et sur la plasticité cérébrale au cours de l'histoire personnelle.</p> <p>De même, la mémoire nécessaire, par exemple, à la reconnaissance d'un visage ou d'un mot repose sur la plasticité du cerveau.</p> <p>L'apprentissage repose sur la plasticité cérébrale. Il nécessite la sollicitation répétée des mêmes circuits neuroniques.</p>	<p><b>Chapitre 5</b></p> <p><b>Cerveau et vision</b> (pages 325-334)</p> <p><b>Les activités pratiques</b></p> <p><b>Act. 1</b> La vision : une construction cérébrale  <b>Act. 2</b> Des substances qui perturbent la vision  <b>Act. 3</b> Apprentissage et plasticité cérébrale</p>

# Devenir homme ou femme

## Activités pratiques

1

### L'origine commune d'appareils génitaux différents (p. 236-237)

Connaissances	Capacités et attitudes
Les phénotypes masculin et féminin se distinguent par des différences anatomiques, physiologiques, et chromosomiques.	Extraire et exploiter des informations de différents documents, réaliser des dissections pour identifier les différences anatomiques, physiologiques et chromosomiques des deux sexes.

#### 1. Les intentions pédagogiques

Les documents proposés ici permettent de retracer les étapes de la construction de l'appareil reproducteur au cours de l'embryogenèse.

Le **document 1** est une échographie permettant de déterminer le sexe de l'enfant à naître. Cela constitue un bon point d'entrée dans le chapitre car il s'agit d'une situation « familière », les élèves auront déjà rencontré dans leur famille des cas où cette question a préoccupé de futurs parents. Il n'est pas question en revanche de former à la détermination du sexe par examen échographique, mais juste d'apporter une illustration renvoyant à des expériences personnelles. On peut ici voir que ce sexe est déterminable avant la naissance par échographie, mais seulement à partir d'une certaine date. La détermination du sexe par échographie pourra être illustrée à l'aide d'une vidéo présente sur le **manuel numérique Bordas**.

Le **document 2** décrit l'aspect des organes génitaux à la naissance. Il pourra être rapproché des schémas présentés dans les pages « acquis » et représentant l'aspect de ces appareils chez un adulte. On pourra alors discuter des étapes accomplies lors du développement embryonnaire et de celles qui restent encore à venir. Il est possible à ce stade de réfléchir à des hypothèses de formation, une observation rapide pouvant se révéler trompeuse : en effet, l'établissement d'homologies entre les deux appareils peut conduire à penser qu'il existe un stade commun initial avec gonades et canaux et que ces derniers se développent dans le sens mâle ou femelle.

On pourra également découvrir cette organisation à partir d'une dissection si le professeur le souhaite. Cela donne l'occasion de partir d'une observation concrète et d'une manipulation du réel. La souris représentera un modèle simple qui se prêtera parfaitement à cette démarche.

Le **document 3** permet de rentrer dans les mécanismes de mise en place des appareils génitaux, la comparaison entre le stade initial, l'aspect à 8 semaines et celui à la naissance est renforcé par un code couleur. L'élève pourra ainsi rechercher l'origine des différents éléments. Pour reprendre la démarche précédente, l'élève peut confronter ses hypothèses à ce stade initial. Il va comprendre alors qu'il y a une seule gonade,

mais deux catégories de canaux. Il peut ensuite continuer sur ce principe en imaginant les mécanismes et les organes impliqués dans l'évolution du stade indifférencié.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 à 3 :** Avant 8 semaines, les examens échographiques ne permettent pas de dire quel sera le sexe de l'enfant à naître. De plus, le document 3 montre l'existence à cette date d'un stade initial commun aux deux sexes. Il présente deux gonades d'aspects identiques et deux systèmes de canaux (canaux de Wolff et canaux de Müller). Par la suite, des évolutions sont constatées. Les gonades deviennent des testicules ou des ovaires. Puis une seule catégorie de canaux va se développer, l'autre disparaissant : les canaux de Wolff se maintiennent pour les embryons masculins alors que ce sont les canaux de Müller qui perdurent pour les embryons féminins.

**Doc. 2 et 3 : Première homologie :** la gonade. Les deux sexes possèdent une paire de gonades formées à partir des gonades indifférenciées : testicules du côté masculin et ovaires du côté féminin.

**Deuxième homologie :** les canaux. On trouve des voies génitales faisant communiquer les gonades avec l'extérieur. Mais en fait, cette homologie n'est qu'apparente car les canaux masculins et féminins dérivent de deux structures embryonnaires différentes : les canaux de Wolff et de Müller.

**Troisième homologie :** les organes externes. On trouve des structures dérivées du tubercule génital (pénis ou clitoris) et des structures dérivées des tubercles labio-scrotaux (scrotum ou lèvres).

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Un embryon de moins de 8 semaines présente une ébauche d'appareil génital identique pour les deux sexes. Ensuite, la gonade va évoluer soit en testicule, soit en ovaire. Enfin, un seul des deux types de canaux va subsister et se développer pour donner les voies génitales.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas :** vidéo montrant la lecture du sexe d'un embryon par échographie.

## Du sexe chromosomique au sexe gonadique (p. 238-239)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La mise en place des structures et de la fonctionnalité des appareils sexuels se réalise, sous le contrôle du patrimoine génétique, sur une longue période qui va de la fécondation à la puberté, en passant par le développement embryonnaire et foetal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Extraire et exploiter des informations de différents documents, réaliser des dissections pour expliquer les étapes de différenciation de l'appareil sexuel au cours du développement embryonnaire.</li> <li>- Traduire les différents mécanismes étudiés sous la forme de schémas fonctionnels.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

La construction d'un appareil sexuel mature se fait globalement en trois étapes (différenciation de la gonade, différenciation des voies génitales et achèvement du phénotype à la puberté). C'est la première de ces étapes qui est présentée ici.

Le **document 1** traite du sexe caryotypique. Le déterminisme chromosomal du sexe est connu depuis la classe de Troisième. En Première, l'élève va s'interroger sur le rôle plus précis de ces chromosomes sexuels en formulant des hypothèses. Il ne s'agit pas d'être exhaustif sur les différents types d'anomalies, ni de les décrire, mais juste de comprendre la logique de masculinisation ou de féminisation.

Le **document 2** précise le rôle des chromosomes, et plus particulièrement celui du chromosome Y. Les photos et les schémas permettent de conclure à l'existence d'un gène de masculinisation qui sera étudié par la suite.

Le **document 3** présente le gène SRY et le **document 4** explique comment ce gène agit, en activant d'autres gènes responsables de la masculinisation. Un exercice proposé page 251 offre l'occasion de travailler plus concrètement sur ce point en mettant en évidence l'interaction entre la protéine TDF et l'ADN. On peut alors faire un lien entre le patrimoine génétique (la séquence du gène SRY) et le phénotype sexuel (masculin ou féminin) et expliquer ce lien par l'action de la protéine TDF.

Les coordonnées moléculaires de la protéine (fichiers .pdb) nécessaires pour ces activités sont sur le site ressources. Le **manuel numérique Bordas** propose une vidéo (animation en 3D) de la protéine TDF.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** La présence d'un chromosome Y est systématiquement associée à un phénotype globalement masculin, alors que son absence donne des phénotypes plutôt féminins. On peut donc penser que c'est la présence ou l'absence du chromosome Y qui détermine le sexe de l'individu. La fertilité ou la stérilité constatées semblent liées au nombre de chromosomes présents.

**Doc. 2 :** Garçon XX : le schéma doit montrer que pour un des deux chromosomes X, un fragment a été remplacé par un fragment de chromosome Y.

Fille XY : le schéma doit montrer qu'un fragment du chromosome Y est remplacé par un fragment de chromosome X.

On peut supposer que le fragment du chromosome Y échangé est responsable de la masculinisation de l'embryon. Il doit donc porter un gène de masculinisation.

**Doc. 3 et 4 :** On voit sur le document 3 que le chromosome Y porte un gène masculinisateur nommé SRY. Ce gène permet la synthèse d'une protéine nommée TDF qui est capable de se fixer sur l'ADN. Cette fixation va activer d'autres gènes responsables de la construction effective du phénotype masculin.

En l'absence du gène SRY et de la protéine TDF, les gènes de masculinisation ne sont pas activés et l'embryon va évoluer spontanément dans le sens féminin.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

La présence d'un chromosome Y détermine un développement masculin de la gonade. Ce chromosome porte, en effet, un gène masculinisateur nommé SRY. En l'absence de chromosome Y et donc du gène SRY, la gonade devient un ovaire.

## **3. Ressources complémentaires**

- **Manuel numérique Bordas :** Vidéo « Modélisation tridimensionnelle : protéine TDF et ADN ».
- **Site ressources Bordas :**  
Modèle moléculaire de la protéine TDF et séquence du gène SRY.

## Sexe gonadique et développement des voies génitales (p. 240-241)

Connaissances	Capacités et attitudes
La mise en place des structures et de la fonctionnalité des appareils sexuels se réalise, sous le contrôle du patrimoine génétique, sur une longue période qui va de la fécondation à la puberté, en passant par le développement embryonnaire et foetal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Extraire et exploiter des informations de différents documents, réaliser des dissections pour expliquer les étapes de différenciation de l'appareil sexuel au cours du développement embryonnaire.</li> <li>- Traduire les différents mécanismes étudiés sous la forme de schémas fonctionnels.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

À ce stade, les mécanismes de différenciation de la gonade sont élucidés ; il reste maintenant à comprendre comment se font les transformations des voies génitales. L'hypothèse posée est celle d'une influence directe de la gonade (testicule ou ovaire). Elle va pouvoir être vérifiée à partir de différents documents.

Le **document 1** propose une approche historique et expérimentale de ces mécanismes. Il permet également de mettre en évidence le côté spontané de la féminisation.

Le **document 2** présente une anomalie constatée chez la vache. On peut ici avoir une démarche explicative et aboutir à l'idée d'un contrôle hormonal de la masculinisation. Ces deux premiers documents suffisent donc pour construire le schéma global : féminisation spontanée, masculinisation sous contrôle hormonal. Il va falloir par la suite identifier les hormones en cause et leur rôle précis.

Le **document 3** présente une approche expérimentale pour déterminer le rôle de la testostérone. Cette hormone est en général connue des élèves et associée assez facilement au testicule. Il est donc logique de commencer par vérifier son implication dans la masculinisation de l'appareil reproducteur. Les expériences proposées montrent également que la testostérone n'est pas la seule responsable de cette masculinisation.

Le **document 4** identifie la deuxième hormone en cause : l'AMH. Le document est très simple et permet une lecture quasiment directe du rôle de l'AMH.

Le **document 5** va permettre de réinvestir les mécanismes de masculinisation découverts ici. On propose donc aux élèves un cas clinique qu'ils doivent tenter d'expliquer. Il peut être utile d'avoir au préalable réalisé ou fait réaliser un schéma fonctionnel présentant les déterminismes chromosomiques et hormonaux du sexe.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** L'évolution d'un embryon castré se fait toujours dans un sens féminin. L'ovaire n'intervient donc pas, et c'est bien la présence ou l'absence de testicule qui détermine le sens de la différenciation des voies génitales.

**Doc. 2 et 3 :** Le free-martin correspond à la masculinisation d'un embryon féminin, due à la présence d'un jumeau masculin. La seule communication possible entre les deux embryons est la voie sanguine. On peut donc penser à une influence hormonale pour cette masculinisation.

Les expériences de Jost le confirment : l'injection de testostérone, une hormone produite par le testicule, stimule le développement des canaux de Wolff.

**Doc. 4 et 5 :** Les personnes atteintes du syndrome d'insensibilité aux androgènes ont un caryotype normal. La gonade évolue donc en testicule qui va produire les deux hormones masculinisantes : testostérone et AMH. Les cellules de ces individus ne sont pas sensibles à la testostérone qui ne peut donc pas jouer son rôle : les canaux de Wolff ne sont donc pas stimulés et disparaissent ; les organes génitaux externes n'évoluent pas vers le sens masculin et sont donc typiques d'un phénotype féminin (clitoris, lèvres, vagin). En revanche, l'AMH joue son rôle et provoque la disparition des canaux de Müller, il n'y a donc ni trompes ni utérus.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

Le testicule produit de la testostérone qui stimule le développement des canaux de Wolff en epididyme et canaux déférents. Il produit également de l'AMH responsable de la disparition des canaux de Müller. En l'absence de ces deux hormones (non secrétées par un ovaire), les canaux de Wolff disparaissent et ceux de Müller se développent spontanément en utérus et trompes.

## La mise en place des caractères sexuels de l'adulte (p. 242-243)

Connaissances	Capacités et attitudes
La puberté est la dernière étape de la mise en place des caractères sexuels.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Extraire et exploiter des informations de différents documents, réaliser des dissections pour expliquer les étapes de différenciation de l'appareil sexuel au cours du développement embryonnaire.</li> <li>– Traduire les différents mécanismes étudiés sous la forme de schémas fonctionnels.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

L'objectif ici est de traiter de la puberté comme dernière étape de la mise en place du phénotype sexuel.

**Les documents 1 et 2** présentent les transformations pubertaires chez les garçons et les filles en lien avec les productions hormonales. Il s'agit globalement d'éléments déjà vus au collège, mais qui seront utiles à rappeler. Il y a également une différence importante concernant la perception de ces éléments par un collégien ou un lycéen. En effet, la puberté débute ou va débuter pour un élève de Quatrième, alors qu'elle est souvent achevée pour un élève de Première.

L'objectif n'est pas de reprendre en détail ces points mais plutôt de replacer ces événements pubertaires comme la dernière étape de la mise en place du phénotype sexuel qui vient clôturer celles vues précédemment.

**Le document 3** permet de mettre en évidence la mise en fonctionnement des appareils reproducteurs au moment de la puberté. On voit la présence de gamètes, oocytes et spermatozoïdes. Le professeur pourra également proposer des observations au microscope de coupes d'ovaires et de testicules, les élèves devant alors indiquer si les organes observé sont fonctionnels ou non. Sur ce même principe, on pourra également demander aux élèves de réaliser des préparations microscopiques à partir de testicules ou d'ovaires de souris pour rechercher la présence de gamètes.

**Le document 4** aborde le volet psychologique des transformations pubertaires. Ce document ouvre sur la question du comportement sexuel qui sera abordé dans le chapitre suivant. Il permet d'aborder également les questions de responsabilité individuelle qui apparaissent avec la maturité sexuelle. Le professeur pourra choisir de développer ces points ici, ou plus tard, quand il traitera des IST et de la régulation des naissances.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Chez les filles, on constate que les modifications pubertaires (pilosité, hanches, seins...) se font entre 8 et 14 ans, c'est-à-dire à une période où la production des œstrogènes par les ovaires augmente fortement. On peut donc supposer que cette hormone est responsable du développement des caractères sexuels secondaires féminins à la puberté.

De la même façon, chez les garçons, il y a une concordance de temps entre les modifications pubertaires (mue de la voix, poils pubiens...) et une hausse de la production

de testostérone. Là encore, on pourra conclure sur un rôle de la testostérone dans le développement des caractères sexuels secondaires.

**Doc. 3 :** La comparaison des ovaires avant et après la puberté montre que des ovules ont commencé leur maturation. Cette même comparaison au niveau du testicule met en évidence la présence de spermatozoïdes après la puberté. Les glandes deviennent donc fonctionnelles en produisant des gamètes.

**Doc. 4 :** À la fin de la puberté, les organes sexuels sont fonctionnels et produisent des gamètes. En parallèle, la psychologie des adolescents a changé et ils commencent à ressentir une attirance sexuelle pour d'autres personnes. Un individu pubère est donc apte à se reproduire au niveau physiologique et comportemental, la construction du phénotype sexuel est donc achevée.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

La puberté voit la mise en fonctionnement des glandes génitales qui se mettent à produire gamètes et hormones. Ces dernières sont responsables du développement des caractères sexuels secondaires (pilosité, morphologie, psychologie...).

## **3. Ressources complémentaires**

- **Manuel numérique Bordas :** Fiche documentaire « La cryptorchidie, une mise en place inachevée ».

La correction des exercices « **Tester ses connaissances** » figure dans le manuel de l’élève, p. 350 à 353.

## 6 Comprendre une expérimentation

1. La présence de souris XX au phénotype mâle montre que le gène SRY, aux fonctions masculinisantes, a été intégré dans leur génome.

On peut également voir que, chez les souris **c** (XX mâles), la sonde correspondant au gène SRY est détectable, alors que celle correspondant au reste du chromosome Y ne l'est pas.

2. Souris **a** : il y a présence de la sonde « SRY » et de la sonde « chromosome Y ». Cette souris possède donc un chromosome Y porteur du gène SRY. Elle a donc un phénotype mâle normal.

– Souris **b** : il n'y a ni la sonde « SRY » ni la sonde « chromosome Y ». Cette souris possède donc deux chromosomes X normaux. Elle a donc un phénotype femelle normal.

– Souris **c** : il n'y a pas la sonde « chromosome Y », la souris possède donc deux chromosomes X. En revanche, on note la présence de la sonde « SRY » : la présence de ce gène explique la masculinisation de la souris.

## 7 Le contrôle hormonal du phénotype sexuel masculin

1. L'**expérience 2** montre que la présence de testostérone permet le maintien des canaux de Wolff. On a donc identifié le rôle de cette hormone.

2. Si l'on compare l'action de la testostérone seule avec l'action du testicule complet (**expérience 1**), on peut voir un autre effet : la disparition du canal de Müller. Le testicule doit donc produire une autre hormone agissant sur ces canaux. Cette hormone va donc faire disparaître les canaux de Müller.

## 8 Des hommes à utérus !

1. L'homme présente un caryotype masculin normal avec un chromosome X et un chromosome Y : le caryotype n'explique donc pas l'anomalie. La production de testostérone correspond à une production normale ; en revanche, celle d'AMH reste à zéro tout le temps alors qu'elle devrait augmenter au premier mois de grossesse. L'absence d'AMH empêche la destruction des canaux de Müller qui évoluent donc pour donner un utérus. La présence de testostérone a permis le développement des voies masculines à partir des canaux de Wolff, puis la mise en fonctionnement des organes génitaux à la puberté. On peut donc avoir ainsi la présence d'un utérus chez un homme fertile.

# Sexualité et procréation

## Activités pratiques

1

### La double fonction des glandes génitales (p. 254-255)

Connaissances	Capacités et attitudes
Chez l'homme et la femme, le fonctionnement de l'appareil reproducteur est contrôlé par un dispositif neuroendocrinien qui fait intervenir l'hypothalamus, l'hypophyse et les gonades.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Traduire les mécanismes de contrôle de l'activité gonadique sous la forme de schémas fonctionnels.</li> <li>- Effectuer des gestes techniques pour réaliser différentes observations microscopiques.</li> </ul>

#### 1. Les intentions pédagogiques

Les programmes officiels demandent de représenter la régulation hormonale de la fonction de reproduction par un schéma fonctionnel. La plupart des éléments constitutifs de ce schéma ont déjà été abordés au collège et représentent donc des acquis. Cependant, il est probable que certains points aient été oubliés ce qui rend presque indispensable le fait de les revoir. Les deux premières pages de ce chapitre reprennent donc les fonctions de reproduction chez la femme et chez l'homme. L'étude des documents proposés pourra être complétée, si le professeur le désire, par des observations microscopiques de coupes d'ovaires, d'utérus et de testicule.

Le **document 1** montre la première fonction du testicule à l'aide d'une photo sur laquelle les spermatozoïdes se voient nettement. Un schéma permet de mieux comprendre l'organisation interne du testicule et la nature des tubes séminifères. Si une dissection est réalisée, on pourra demander aux élèves d'ouvrir le testicule pour observer l'enchevêtrement des tubes séminifères.

Le **document 2** aborde la fonction hormonale du testicule. L'essentiel est ici de visualiser les deux types de tissus cellulaires, dédiés à la production hormonale ou à celle des gamètes ; il s'agit ensuite de comprendre que la production de testostérone est faite de façon constante. À l'issue de l'étude de ces deux premiers documents, on peut débuter la réalisation du schéma fonctionnel avec la double fonction testiculaire et le rôle de la testostérone.

Le **document 3** se veut l'équivalent du document 1 pour la fonction féminine. On y voit la production de gamète par l'ovaire. En croisant son étude avec celle du document 4, l'élève peut retracer l'évolution du follicule ovarien sur un cycle.

Le **document 4** contient des éléments utiles pour construire le cycle folliculaire, mais il aborde surtout la fonction hormonale de l'ovaire. Le lien fait entre graphique et photographies permet de mieux appréhender les raisons des cycles de productions hormonales. Comme pour la régulation masculine, on peut ici commencer à schématiser les deux fonctions de l'ovaire : production d'ovocytes et production d'hormones. Il sera également possible de demander une comparaison avec les deux fonctions pour

mettre en évidence les équivalences (gamètes, hormones) et les différences (continu, cyclique, nombre de gamètes produits).

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** On voit que le testicule contient de longs tubes séminifères et que les spermatozoïdes sont produits au niveau de la paroi. Ils vont ensuite cheminer le long des tubes pour être stockés dans l'épididyme. Lors d'une éjaculation, ils passeront dans le canal déférent, seront mélangés au liquide séminal pour constituer le sperme qui sera émis à l'extérieur.

**Doc. 2 :** Le testicule contient deux types de tissus, les tubes séminifères dédiés à la production de gamètes, et des cellules de Leydig, situées entre ces tubes. Les cellules de Leydig produisent une hormone, la testostérone : même si cette sécrétion présente de petits pics de sécrétion toutes les 4 heures environ, on peut considérer que le taux plasmatique de testostérone est globalement constant. Cette hormone va agir sur les cellules des tubes séminifères pour stimuler la spermatogénèse. Elle agira également sur d'autres cellules de l'organisme pour stimuler le développement des caractères sexuels secondaires.

**Doc. 3 :** L'ovaire contient des follicules, structures contenant différents tissus (thèques, granulosa) et un ovocyte. Au cours de la phase folliculaire, un de ces follicules se développe, les cellules folliculaires se divisent activement et font grossir le follicule. Arrivé à maturité, ce follicule se déchire et libère l'ovocyte dans les trompes au cours de l'ovulation. Les cellules de la granulosa évoluent alors en cellules lutéales et le follicule prend le nom de corps jaune. On entre dans la phase lutéale qui s'achève avec la disparition du corps jaune.

**Doc. 4 :** Le follicule produit des hormones, mais comme il évolue au cours du cycle, les productions hormonales évoluent également.

- En phase folliculaire, thèques et granulosa produisent de l'œstradiol qui stimule la muqueuse utérine. La production augmente avec le développement du follicule.
- Après l'ovulation, en phase lutéale, les cellules de la thèque continuent à produire de l'œstradiol, les cellules lutéales produisant, elles, de la progestérone qui stimule également la muqueuse utérine. Le corps jaune se développe puis dégénère, ce qui explique la montée puis la chute des taux hormonaux pendant cette phase.
- En fin de phase lutéale, le corps jaune a presque disparu et produit très peu d'hormones. N'étant plus stimulée, la muqueuse utérine est partiellement éliminée au cours des règles.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La première fonction des glandes sexuelles est la production de gamètes : les ovaires produisent des ovules et les testicules des spermatozoïdes. La seconde fonction est une fonction hormonale : l'ovaire secrète de l'œstradiol et de la progestérone et le testicule secrète de la testostérone.

## La régulation du fonctionnement testiculaire (p. 256-257)

Connaissances	Capacités et attitudes
Chez l'homme et la femme, le fonctionnement de l'appareil生殖 est contrôlé par un dispositif neuroendocrinien qui fait intervenir l'hypothalamus, l'hypophyse et les gonades.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Traduire les mécanismes de contrôle de l'activité gonadique sous la forme de schémas fonctionnels.</li> <li>- Effectuer des gestes techniques pour réaliser différentes observations microscopiques.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

La fonction du testicule a été présentée précédemment. Pour compléter le schéma de régulation, il faut à présent ajouter les éléments contrôlant cette fonction. Les documents proposés laissent le choix entre deux approches. La première est un travail autonome des élèves qui devront retrouver seuls les organes impliqués et leurs fonctions. La seconde approche partira d'une étude plus directe du document 3 afin de fixer le principe du fonctionnement de l'axe hypothalamo-hypophysaire, puis on laissera les élèves retrouver les détails de ce fonctionnement du côté masculin.

Le **document 1** présente l'hypophyse et son fonctionnement. On ne doit en retenir que sa position et les hormones produites : LH et FSH.

Le **document 2** montre la fonction de ces deux hormones. Il permet de compléter le schéma fonctionnel en y ajoutant l'hypophyse et son action sur la spermatogenèse et la production de testostérone.

Le **document 3** décrit les relations existant entre l'hypophyse et l'hypothalamus. Il peut être utilisé à la suite des deux précédents documents pour compléter le schéma en y ajoutant l'hypothalamus et son contrôle.

Le **document 4** permet de terminer le schéma de régulation avec le rétrocontrôle négatif exercé par la testostérone sur le complexe hypothalamo-hypophysaire.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** L'hypophyse produit deux hormones, LH et FSH. Le document 2 montre qu'un pic de LH est toujours suivi par une augmentation de la production de testostérone. On peut donc supposer que la LH agit sur les cellules de Leydig en stimulant la production de testostérone. La FSH va agir, elle, sur les tubes séminifères et stimule la production de spermatozoïdes par ces derniers.

**Doc. 3 et 4 :** Le document 3 montre l'action de l'hypothalamus dans la régulation de la production de testostérone : cette glande nerveuse produit une neurohormone, la GnRH qui va aller stimuler la production de LH et de FSH par les cellules hypophysaires. La photographie du document 4 indique que la testostérone peut se fixer et agir sur les cellules de l'hypothalamus. Le graphique montre que l'absence de testostérone est responsable d'une hausse de la production de LH. La testostérone agit donc sur les cellules de l'hypothalamus (et de l'hypophyse) en diminuant leur activité, ce qui constitue un rétrocontrôle négatif.

**Doc. 1 à 4 :** Le schéma doit comporter les différents organes impliqués : hypothalamus, hypophyse et testicule en différenciant chez ce dernier les cellules de Leydig et

celles des tubes séminifères. Le schéma doit, à l'aide de flèches, montrer les actions des différentes hormones qui relient ces organes : GnRH (stimulant l'hypophyse), LH (stimulant les cellules de Leydig), FSH (stimulant les cellules des tubes séminifères) et testostérone (stimulant les cellules des tubes séminifères et les caractères sexuels secondaires). Il doit enfin indiquer le rétrocontrôle négatif exercé par la testostérone sur l'hypothalamus et l'hypophyse.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

La testostérone exerce un rétrocontrôle négatif sur le complexe hypothalamo-hypophysaire. Si le taux sanguin de testotérone vient à augmenter, le rétrocontrôle négatif s'accentuera et la production des gonadostimulines LH et FSH va baisser. La conséquence finale sera donc une stimulation moindre du testicule qui va produire moins de testostérone et l'écart sera corrigé.

## La régulation du fonctionnement ovarien (p. 258-259)

Connaissances	Capacités et attitudes
Chez l'homme et la femme, le fonctionnement de l'appareil生殖 est contrôlé par un dispositif neuroendocrinien qui fait intervenir l'hypothalamus, l'hypophyse et les gonades.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Traduire les mécanismes de contrôle de l'activité gonadique sous la forme de schémas fonctionnels.</li> <li>- Effectuer des gestes techniques pour réaliser différentes observations microscopiques.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

La même démarche que celle entreprise du côté masculin va pouvoir être menée ici avec les mécanismes contrôlant le fonctionnement de l'ovaire. Le fonctionnement de l'ovaire a été vu précédemment (production d'hormones et de gamètes) et il est plus complexe que celui du testicule chez l'homme. Le fait d'avoir commencé par la régulation masculine a donc permis de poser les bases du système avec notamment le complexe hypothalamo-hypophysaire et l'existence d'un rétrocontrôle qui se retrouvent du côté féminin. C'est pour cette raison que l'anatomie de ce complexe n'est pas présentée ici. Au vu du temps disponible pour traiter cette partie du programme, il paraît difficile d'expliquer la totalité des événements hormonaux qui contrôlent le cycle ovarien. L'accent a donc été mis ici sur le déclenchement de l'ovulation qui peut être considéré comme l'événement majeur.

Il est possible de traiter cette partie à l'aide de logiciels de simulation si le professeur souhaite consacrer du temps à cela, mais les programmes officiels demandent essentiellement de traduire les mécanismes par un schéma fonctionnel et non de reconstituer l'ensemble du système de régulation.

Les **documents 1 et 2** présentent les actions des hormones hypophysaires sur l'ovaire. Le schéma classique du document 1 montre le synchronisme qui existe entre le cycle hormonal ovarien et celui de l'hypophyse. On peut alors faire un lien entre les deux et vérifier ce lien à partir de l'étude du document 2.

Le **document 3** montre l'existence de différents rétrocontrôles. Des graphiques permettent de retrouver ceux exercés par l'œstradiol ; ceux liés à la progestérone sont juste cités. Cela correspond au choix fait de privilégier la compréhension du déclenchement de l'ovulation parmi les différents processus hormonaux.

Le **document 4** permet de reconstituer les étapes menant à l'ovulation. Il mélange des photographies (à l'échelle) et des graphiques pour que les élèves puissent mieux apprécier les changements qui s'opèrent. Ils peuvent ainsi facilement comprendre que le follicule grossit et produit davantage d'œstradiol. Le lien avec l'exploitation du document 3 amènera à l'idée d'une inversion du rétrocontrôle exercé par cette hormone.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** La LH est secrétée essentiellement vers le 14<sup>e</sup> jour du cycle. Le pic de LH constaté est responsable du déclenchement de l'ovulation. La FSH présente également un pic au moment de l'ovulation, mais elle est produite également en phase folliculaire. Le document 2 montre le lien qui existe entre le taux de FSH et la taille des follicules. Le rôle de la FSH est donc de stimuler la croissance des follicules ovariens.

**Doc. 3 :** À  $t_0$ , le début de la perfusion d'œstradiol est suivi d'une baisse du taux de LH. On a donc ici un rétrocontrôle négatif. En revanche, quand à  $t_1$ , on injecte une forte dose d'œstradiol, le taux de LH remonte. C'est donc qu'à forte dose, l'œstradiol exerce un rétrocontrôle positif sur l'hypothalamus et l'hypophyse. On voit également que le rétrocontrôle exercé par la progestérone est négatif quel que soit le taux.

**Doc. 4 :** On voit que la taille du follicule augmente fortement au cours de la phase folliculaire : le diamètre va plus que doubler entre le 8<sup>e</sup> et le 14<sup>e</sup> jour du cycle. Il est donc logique que ce follicule plus gros produise davantage d'œstradiol : le taux plasmatique est multiplié par 7. Ce taux finit par dépasser le seuil déclenchant un rétrocontrôle positif. L'œstradiol va donc stimuler l'hypophyse qui va produire de fortes quantités de LH, ce qui déclenchera l'ovulation. Le complexe hypothalamo-hypophysaire détecte donc la présence d'un follicule mûr par sa forte production d'œstradiol.

**Doc. 1 à 4 :** Le schéma doit comporter les différents organes impliqués : hypothalamus, hypophyse, ovaire (avec les follicules en croissance) et utérus. Le schéma doit, à l'aide de flèches, montrer les actions des différentes hormones qui relient ces organes : GnRH (stimulant l'hypophyse), LH (déclenchant l'ovulation), FSH (stimulant la croissance des follicules), progestérone et œstradiol (ces deux hormones stimulant l'utérus ainsi que les caractères sexuels secondaires). Il doit enfin indiquer les trois rétrocontrôles exercés par les hormones ovaries sur l'hypothalamus et l'hypophyse (positif pour l'œstradiol à forte dose, négatif pour l'œstradiol à faible dose et négatif pour la progestérone quelle que soit la dose).

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La production de FSH en début de phase folliculaire stimule la croissance d'un follicule ovarien qui va produire de plus en plus d'œstradiol. Peu avant la fin de cette phase, le taux d'œstradiol devient supérieur au seuil et se met à exercer un rétrocontrôle positif sur l'hypothalamus et l'hypophyse. La production des gonadostimulines va donc montrer un pic de FSH et de LH, ce dernier étant responsable du déclenchement de l'ovulation. Le follicule éclaté évolue en corps jaune qui subsiste pendant toute la phase lutéale.

## La contraception hormonale chez la femme (p. 260-261)

Connaissances	Capacités et attitudes
La connaissance de ces mécanismes permet de comprendre et de mettre au point des méthodes de contraception féminine préventive (pilules contraceptives) ou d'urgence (pilule du lendemain). Des méthodes de contraception masculine hormonale se développent.	Mettre en œuvre une méthode (démarche historique) et/ou une utilisation de logiciels et/ou une pratique documentaire pour expliquer le mode d'action de différentes pilules contraceptives.

### 1. Les intentions pédagogiques

L'objectif indiqué dans les programmes officiels est de retrouver le principe des méthodes contraceptives utilisées ou en cours de développement et de comprendre que la mise au point de ces méthodes a nécessité une bonne compréhension des mécanismes de régulation. On pourra ici étudier les principales méthodes contraceptives féminines régulières et d'urgence pour comprendre le mode d'action des principes actifs contenus.

Le **document 1** donne le contenu des pilules contraceptives. Les élèves peuvent alors faire le lien avec ce qu'ils savent des analogues naturels de ces hormones de synthèse. Ils peuvent donc proposer un mode d'action pour ces pilules. Les photographies de plaquettes de pilules peuvent être complétées par l'observation de boîtes réelles de pilules avec le contenu exact indiqué dessus ou sur les notices. Cela peut être l'occasion de comparer les doses des différents produits et de montrer qu'il existe différents types de pilules pouvant répondre à des situations différentes.

Le **document 2** présente l'évolution des taux d'hormones ovariennes et hypophysaires avec et sans prise de pilule contraceptive. Ce document est un incontournable que les élèves doivent être en mesure d'interpréter. Ils doivent y retrouver l'action sur l'utérus et expliquer les règles, mais également le rétrocontrôle négatif exercé sur l'hypophyse qui la met au repos ainsi que l'ovaire. Il permet donc de vérifier l'action des molécules de synthèse imaginée précédemment.

Les **documents 3 à 5** traitent de la contraception d'urgence. L'objectif est le même que pour la contraception régulière, mais la démarche est différente car les molécules actives sont inconnues des élèves. On part donc ici du contenu, puis on recherche l'action des molécules à partir de documents graphiques. On pourra donc déterminer à quel niveau du système de régulation ces pilules agissent. Le document 3 donne également des indications sur la façon d'utiliser une contraception d'urgence.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Une pilule classique contient des hormones de synthèse (œstrogènes et progestatifs). Ces hormones exercent un rétrocontrôle négatif sur l'hypophyse ; celle-ci ne produit donc plus de LH et de FSH. Sans FSH, les follicules ne grossissent plus, et sans LH, il n'y a plus d'ovulation possible. L'ovaire est donc maintenu au repos ; il ne produit plus d'ovocyte ni d'hormones ovariennes (ou très peu).

**Doc. 3 :** Le terme de contraception d'urgence désigne une méthode à utiliser dans les jours qui suivent un rapport sexuel non protégé. Elle est donc à utiliser de façon exceptionnelle quand les méthodes de contraception régulière ont fait défaut.

**Doc 4 et 5 :** Le graphique du document 4 montre que la prise de lévonorgestrel inhibe la production de LH, sans le pic au 14<sup>e</sup> jour ; l'ovulation n'est donc pas déclenchée.

L'acétate d'uripristal agit au niveau de l'utérus. En se fixant sur les récepteurs de la progestérone, il empêche cette hormone de stimuler les cellules de la muqueuse utérine. On a donc des règles plus précoces qui empêchent un embryon éventuellement créé de venir s'implanter dans l'utérus.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La connaissance du fonctionnement de la régulation de la fonction de reproduction a permis de mettre au point des méthodes contraceptives. Certaines visent à reproduire le rétrocontrôle négatif exercé par les hormones ovarianes. D'autres cherchent à déclencher des règles précoces ou à bloquer l'ovulation.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas :** Vidéo « La pilule du surlendemain : molécules de progestérone, lévonorgestrel, ulipristal (modélisations tridimensionnelles) ».
- **Site ressources Bordas :** modèles moléculaires de la progestérone, du lévonorgestrel et de l'uripristal.

## La prévention contre les IST (p. 262-263)

Connaissances	Capacités et attitudes
D'autres méthodes contraceptives existent, dont certaines présentent aussi l'intérêt de protéger contre les infections sexuellement transmissibles.	Extraire et exploiter des données pour relier la prévention contre les IST (Sida, hépatite, papillomavirus, etc.) à la vaccination ou l'utilisation du préservatif.

### 1. Les intentions pédagogiques

Le programme demande de relier certaines pratiques conseillées à la protection contre les IST. Il n'est donc pas nécessaire de décrire dans le détail les différentes IST, mais bien de montrer ce qu'est une IST, puis de montrer que le préservatif est une méthode contraceptive qui offre en plus une protection contre certaines IST. Les rôles du dépistage, de la prévention et de la vaccination seront ensuite mis en évidence.

Le **document 1** définit ce qu'est une IST et en donne quelques exemples sans viser l'exhaustivité. Cela peut être le point de départ de recherches documentaires sur l'un ou l'autre de ces exemples pour déterminer les agents responsables, les modes de contamination, les effets, les conséquences sur la santé...

Le **document 2** traite de la méthode de prévention la plus évidente : le préservatif. Il permet de montrer que ce préservatif protège efficacement contre certaines IST, mais que, d'une part, cette protection n'est pas absolue, d'autre part, elle ne concerne pas toutes les IST.

Les **documents 3 et 4** donnent des informations sur deux autres aspects des politiques de santé publique : le dépistage et la vaccination. Les deux exemples proposés sont ceux indiqués dans les programmes officiels, à savoir l'hépatite B et le papillomavirus. On peut ici discuter de l'efficacité des deux stratégies de lutte. Ces deux infections seront également abordées dans le chapitre 3 de cette même partie, pour montrer leur lien avec le développement de cancers. Un autre découpage du programme est donc possible selon le choix du professeur.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** L'utilisation du préservatif offre une bonne protection contre certains agents des IST comme le virus du SIDA, celui de l'hépatite B ou le gonocoque. Cette protection n'est cependant pas absolue, car le risque de contamination par le VIH est ainsi réduit de 80 % et non 100 %. De plus, certains agents infectieux peuvent être transmis par voie cutanée (exemple du papillomavirus), le préservatif est donc alors inefficace.

**Doc. 1 et 3 :** L'hépatite B peut évoluer vers un cancer hépatique, une maladie souvent mortelle. La politique de vaccination contre l'hépatite B menée à Taiwan dans les années 1980 a permis de réduire de façon importante les décès dus à un cancer du foie. C'est pour cela que les autorités conseillent la vaccination contre le virus de l'hépatite B.

**Doc. 3 et 4 :** La campagne de dépistage du cancer permet aux femmes de savoir si elles sont infectées. En cas de test positif, un suivi spécifique visera à repérer un cancer du col débutant pour le prendre en charge le plus précocement possible et augmenter les chances de guérison.

En parallèle, la vaccination des femmes limite le risque de contamination par le papillomavirus. Elle doit être faite impérativement avant le début de la vie sexuelle, c'est-à-dire avant qu'une adolescente puisse être exposée au papillomavirus.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

Il y a trois axes principaux dans la lutte contre les IST :

- L'utilisation de préservatifs, masculin ou féminin, permet d'éviter la contamination par certains agents infectieux.
- Des dépistages permettent de connaître l'état d'un patient. En cas de test positif, il fera l'objet d'une surveillance plus attentive et pourra adopter un comportement responsable vis-à-vis de ses partenaires sexuels.
- Des campagnes de vaccination ont pour objectif de protéger les populations avant la contamination éventuelle.

## **3. Ressources complémentaires**

- **Lien vers le portail de l'INPES consacré aux IST :**

<http://www.info-ist.fr/>

## L'infertilité et l'aide à la procréation (p. 264-265)

Connaissances	Capacités et attitudes
L'infertilité des couples peut avoir des causes variées. Dans beaucoup de cas, des techniques permettent d'aider les couples à satisfaire leur désir d'enfant : insémination artificielle, Fivete, ICSI.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recenser, extraire et organiser des informations pour comprendre les modalités de la procréation médicalement assistée.</li> <li>- Percevoir le lien entre science et technique.</li> <li>- Argumenter, débattre sur des problèmes éthiques posés par certaines pratiques médicales.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Les techniques de PMA sont multiples, avec des protocoles très différents. Il n'est donc pas possible ni utile de les étudier tous avec une classe. L'objectif est donc de comprendre la démarche de traitement d'un couple infertile : identifier les causes de l'infertilité, puis proposer une solution adaptée. La technique illustrée ici est celle de la fécondation *in vitro* car elle est emblématique de la PMA pour les élèves.

Le programme demande également de discuter des limites légales et éthiques de la PMA, cela pourra se faire à partir de recherches documentaires (par exemple à partir d'articles de périodiques), et en s'appuyant sur les documents proposés dans les clés, page 273, l'exercice 6 p. 274 ou le site ressources.

Le **document 1** présente rapidement les causes majeures de l'infertilité masculine : la mauvaise qualité du sperme. Il est possible de conjuguer l'étude de ces documents avec des observations de spermatozoïdes au microscope, pour donner une meilleure idée aux élèves de la taille et de l'aspect réel de ces cellules.

Le **document 2** aborde les deux principales causes d'infertilité féminine. Il y en a d'autres, mais moins fréquentes et plus complexes. De plus, les problèmes décrits sur les documents 1 et 2 peuvent être résolus par la réalisation d'une FIV, ce qui permet de faire un lien avec les documents de la page suivante. D'autres techniques peuvent également être proposées comme l'insémination artificielle ; dans ce cas, des recherches documentaires peuvent permettre de trouver des réponses.

Le **document 3** décrit les différentes étapes d'une FIV. Cette description pourra s'appuyer sur une animation présente dans le **manuel numérique Bordas**. Une vidéo sur l'ICSI sera accessible par le biais d'un lien à partir du site ressources. Toutefois, l'objectif indiqué dans le programme n'est pas de faire un descriptif exhaustif des méthodes de PMA existantes, ni de décrire en détail une de ces méthodes. Il est plutôt de montrer que ces méthodes s'appuient sur une bonne connaissance des mécanismes hormonaux contrôlant la fécondation et le début de la grossesse.

Le **document 4** va dans ce sens en proposant la description d'un protocole de stimulation hormonale. L'élève peut ainsi comprendre qu'une FIV ne peut se faire sans un parfait contrôle des cycles ovariens et utérins.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Du côté masculin, on peut avoir une production insuffisante de spermatozoïdes, ou une abondance de formes anormales. Du côté féminin, la production

des ovocytes peut créer des difficultés. On peut également observer des trompes bouchées, ce qui rend impossible la rencontre des gamètes ou la migration d'un embryon vers l'utérus.

**Doc. 3 et 4 :** Il faut tout d'abord collecter les gamètes ; cela pose peu de problèmes pour les spermatozoïdes produits en continu, mais les ovocytes sont plus délicats à prélever. On réalise ainsi des stimulations ovarielles en utilisant des hormones hypothalamiques de synthèse.

Puis les gamètes doivent être mis en contact, ce qui impose de les placer dans un milieu adapté. Dans certains cas, la rareté des spermatozoïdes ou leur faible mobilité impose de recourir à une ICSI, c'est-à-dire une implantation directe dans l'ovocyte. Ensuite l'embryon doit être implanté dans l'utérus. Celui-ci doit être parfaitement développé et prêt pour la nidation, ce qui peut être fait à l'aide d'hormones ovarielles de synthèse.

Enfin un suivi de la grossesse est nécessaire pour vérifier la bonne implantation des embryons et contrôler leur nombre.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

La PMA nécessite de bien comprendre les étapes de la fécondation pour pouvoir détecter les causes de l'infertilité. Ensuite, des techniques comme la FIVETE demandent l'utilisation d'hormones pour stimuler la production d'ovocytes par les ovaires, puis pour préparer l'utérus à la nidation. Ces hormones de synthèse miment l'effet d'hormones naturelles (LH, FSH, œstrogènes, progestatifs).

## **3. Ressources complémentaires**

- **Site ressources Bordas :** animation expliquant le protocole d'une FIVETE.
- **Lien vers une vidéo traitant de l'ICSI :** Extrait du magazine de la Santé France 5  
<http://www.facebook.com/video/video.php?v=1182548770203>

## Sexualité et bases biologiques du plaisir (p. 266-267)

Connaissances	Capacités et attitudes
L'activité sexuelle est associée au plaisir. Le plaisir repose notamment sur des phénomènes biologiques, en particulier l'activation dans le cerveau des « systèmes de récompense ».	Mettre en œuvre une méthode (démarche historique) et/ou une utilisation de logiciels et/ou une pratique documentaire pour mettre en évidence le système de récompense.

### 1. Les intentions pédagogiques

Les facteurs contrôlant le comportement sexuel sont multiples et les programmes officiels demandent de mettre l'accent sur l'un d'entre eux : le système de récompense. Les documents proposés ici décrivent donc ce système et abordent également rapidement les autres facteurs (hormones, cognition, affectif). On pourra débuter le chapitre par une interrogation des élèves sur la nature de ces facteurs, sur leur importance relative chez l'Homme et chez d'autres animaux. L'étude des documents proposés viendra ensuite confirmer ces hypothèses et/ou apporter d'autres éléments. Un questionnement des élèves donnera probablement des réponses impliquant un rôle du cerveau dans le comportement sexuel, mais il n'y aura sans doute pas plus de précisions. Ce rôle est extrêmement complexe et fait encore aujourd'hui l'objet de recherches et de débats dans le monde scientifique. Il conviendra donc ici de s'en tenir aux grandes lignes : implication du cortex et du système de récompense.

Le **document 1** présente les mécanismes du système de récompense. L'exemple pris ne concerne pas le comportement sexuel, mais une expérience historique qui permet de bien comprendre le processus de renforcement. L'explication en reste au niveau fonctionnel : un acte stimule le cerveau, et le plaisir ressenti renforce la nécessité d'accomplir à nouveau cet acte. La recherche de plaisir sexuel peut donc être un moteur du comportement sexuel.

Le **document 2** apporte un éclairage sur les organes liés à la fonction décrite précédemment. On voit ici les zones du cerveau impliquées dans le renforcement. Des logiciels permettent de faire des simulations pour mieux comprendre ces mécanismes si le professeur souhaite développer ce point. Une animation permettant de comprendre le fonctionnement global du système de récompense est également proposée sur le **manuel numérique Bordas**.

Le **document 3** aborde le niveau moléculaire du système avec la présentation de la dopamine. On peut ainsi passer d'un stimulus externe à la production d'un neurotransmetteur.

Le **document 4** élargit la question du déclenchement du comportement sexuel avec la présentation succincte des autres facteurs.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Le système de récompense est lié à une zone du cerveau responsable d'une sensation de plaisir quand elle est stimulée. L'individu va ensuite rechercher à reproduire ce stimulus pour éprouver à nouveau ce plaisir.

L'acte sexuel stimule des zones érogènes et active les circuits de la récompense dans le cerveau ; on éprouve donc une sensation de plaisir. Les individus vont chercher à reproduire cette sensation de plaisir, donc vont reproduire l'acte sexuel. La recherche de plaisir conduit donc vers l'accomplissement de l'acte sexuel.

**Doc. 3 :** La dopamine est liée à une sensation de plaisir, sa libération par les circuits de récompense est en effet responsable du déclenchement de cette sensation.

Un nouveau stimulus déclenche une production de dopamine, donc un certain plaisir. En revanche, un stimulus connu est anticipé, c'est-à-dire que le plaisir est ressenti avant le stimulus lui-même car le sujet reconnaît la situation.

Une stimulation des organes génitaux déclenche une sensation de plaisir, donc une libération de dopamine. Le sujet va donc rechercher à reproduire ce plaisir et reproduira les situations permettant de produire de la dopamine.

**Doc. 4 :** Le comportement sexuel est sous l'effet de différents facteurs. Parmi ceux-ci, on trouve la production d'hormones sexuelles, la captation de phéromones émises par le partenaire ou l'influence du contexte social et culturel. Chez l'Homme, le cerveau, complexe, donne une part prépondérante aux facteurs cognitifs. Le comportement sexuel n'est donc plus dirigé par les hormones et les phéromones, mais plutôt par une recherche de plaisir et de relationnel. La reproduction n'est donc plus la seule finalité de l'acte sexuel, ni même la principale ; c'est pour cela que le qualificatif de « comportement érotique » remplace celui de « comportement reproducteur » chez l'Homme.

#### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

Le système de récompense est responsable d'une sensation de plaisir quand il est stimulé. L'acte sexuel est responsable de la l'activation de ce système, et l'Homme cherchera à reproduire ce plaisir. Il y a donc bien un lien fort entre l'activation du système de récompense et le déclenchement d'un acte sexuel.

### **3. Ressources complémentaires**

- **Site ressources Bordas :** animation expliquant fonctionnement du système de récompense.
- **Lien vers un logiciel gratuit permettant de comprendre le fonctionnement du système de récompense :** [http://svt.ac-dijon.fr/dyn/article.php3?id\\_article=270](http://svt.ac-dijon.fr/dyn/article.php3?id_article=270)

La correction des exercices « **Tester ses connaissances** » figure à la fin du manuel de l’élève, pages 352 et 353.

## 6 PMA, éthique et législation

- a. Vrai. C'est la mère porteuse qui est reconnue comme seul parent.
- b. Faux. Il y a nécessité d'être domicilié au Royaume-Uni. L'enfant devra en outre être conçu à partir d'au moins un des gamètes des deux parents.
- c. Vrai. La légalisation d'une pratique dans un pays permet à des parents français de recourir à la gestation pour autrui dans ce pays. En revanche, lors du retour en France, la reconnaissance par l'état des droits parentaux risque de poser problème.
- d. Faux. En plus des problèmes juridiques, se pose la question du statut du corps de la femme. Doit-on autoriser la « location » de son corps par une mère porteuse ?

## 7 Régulation de la production de testostérone

Le document 1 montre que l'ajout de LH augmente la production de testostérone. Cet ajout est en revanche sans effet si l'on bloque artificiellement l'action de la LH. On en conclut donc que la LH stimule la production de testostérone par le testicule. Le document 2 montre une production de LH par des rats castrés plus forte que pour les rats témoins. Comme les rats castrés ne produisent plus de testostérone, on suppose que celle-ci exerce un rétrocontrôle négatif sur l'hypophyse. Au final, l'hypophyse mesure le taux de testostérone grâce au rétrocontrôle, une hausse limite l'activité hypophysaire et donc la production de LH. Avec moins de LH, le testicule est moins stimulé et produit moins de testostérone ; l'écart est donc corrigé.

## 8 La contraception hormonale sans pilule

En présence d'un anneau vaginal, le taux d'œstradiol est maintenu à une valeur basse et les follicules ovariens sont tous de petite taille. Les hormones de synthèse contenues dans l'anneau exercent un rétrocontrôle négatif permanent sur l'hypophyse. Celle-ci ne produit donc presque plus de LH et de FSH ce qui maintient l'ovaire au repos : pas de croissance folliculaire donc pas d'ovulation et peu d'hormones ovaries produites.

## 9 Le déclenchement de l'ovulation

1. La taille du follicule ovarien augmente fortement pendant le cycle (de 0,1 à 15 mm).
2. Plus un follicule est gros, plus il produit d'hormones ! Il est donc logique de voir une augmentation du taux d'œstradiol en phase folliculaire.
3. Le document 2 montre que la production de LH par les cellules hypophysaires est stimulée par l'ajout de doses croissantes d'œstradiol. On voit également que la présence de GnRH est nécessaire à cette production de LH. Ces observations mettent en évidence l'existence d'un rétrocontrôle positif exercé par l'œstradiol sur l'hypophyse quand sa production est forte.

**Bilan :** quand le follicule est mûr, il produit de grandes quantités d'œstradiol ; le rétrocontrôle devient donc positif et l'hypophyse augmente fortement sa production de LH. Le pic de LH qui en découle déclenche l'ovulation.

# Variation génétique et santé

## Activités pratiques

1

### La mucoviscidose, un exemple de maladie génétique (p. 280-281)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La mucoviscidose est une maladie fréquente, provoquée par la mutation d'un gène qui est présent sous cette forme chez une personne sur 40 environ. Seuls les homozygotes pour l'allèle muté sont malades.</p> <p>Le phénotype malade comporte des aspects macroscopiques qui s'expliquent par la modification d'une protéine. L'étude d'un arbre généalogique permet de prévoir le risque de transmission de la maladie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recenser, extraire et organiser des informations pour établir le lien entre le phénotype macroscopique et le génotype.</li> <li>- Étudier un arbre généalogique pour évaluer un risque génétique.</li> </ul>

#### 1. Les intentions pédagogiques

Le programme demande de mettre en évidence le lien entre une altération du génome par mutation et le développement d'une maladie. Dans un premier temps, on aborde l'étude d'un lien génétique absolu où la présence des allèles morbides se traduit systématiquement par le développement de la maladie. L'exemple de la mucoviscidose traité ici est celui demandé par le programme. On pourra utiliser les documents proposés pour décrire les caractéristiques de cette maladie aux différentes échelles : tout d'abord l'échelle de l'organisme, celle de l'organe et de la cellule ensuite, enfin l'échelle moléculaire avec la mutation sur l'ADN et sa conséquence sur la protéine produite. Dans une deuxième partie, un arbre généalogique simple permet d'initier les élèves au calcul de risque. Le professeur pourra traiter d'autres exemples de maladies génétiques s'il le souhaite, mais l'exhaustivité dans ce domaine n'est pas un objectif affiché dans les programmes. En revanche, la démarche qui consiste à relier une anomalie de l'ADN à des manifestations cliniques peut être réinvestie sur une autre maladie en utilisant l'exercice 8 p. 299 qui traite de la phénylcétonurie.

Le **document 1** aborde la maladie avec ses manifestations cliniques. On part ainsi du phénotype macroscopique, puis on va chercher à expliquer ce phénotype à l'aide des niveaux cellulaire et moléculaire. L'ensemble des manifestations n'est pas reporté ici, on se contente des principales que sont les atteintes pulmonaires et digestives. L'important est de comprendre le lien entre les deux : des cellules épithéliales produisent un excès de mucus, ce qui obstrue des canaux. On fait donc ici le lien entre l'échelle macroscopique et l'échelle cellulaire.

Le **document 2** passe au niveau cellulaire ; la comparaison d'une cellule épithéliale normale avec une cellule provenant d'un malade permet de comprendre l'origine de l'anomalie : la protéine CFTR. On passe ici de l'échelle cellulaire à l'échelle moléculaire. Comme la molécule incriminée est une protéine, le lien avec l'ADN est aisé.

Le **document 3** boucle l'explication de la mucoviscidose avec des comparaisons de séquences d'ADN et de protéines. Le professeur pourra s'il le souhaite laisser les élèves découvrir ces anomalies et leurs conséquences en utilisant les fichiers disponibles sur le site ressources : il y trouvera les séquences du gène et de la protéine CFTR, ainsi que les fichiers pdb du fragment de la protéine CFTR comprenant la mutation.

Le **document 4** propose un arbre généalogique afin de calculer un risque de développer la maladie. L'élève trouvera les informations à la disposition du médecin généticien qui réalise ce calcul : les antécédents familiaux représentés par un arbre, les conditions d'expression et la localisation de l'allèle muté et enfin la fréquence de cet allèle dans la population normale.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Le document 1 indique que les anomalies pulmonaires sont dues à un excès de production de mucus qui obstrue les bronches. On retrouve cela pour les anomalies digestives, mais, dans ce cas, ce sont les canaux pancréatiques qui sont obstrués. Ce sont les cellules épithéliales produisant ce mucus qui sont en cause. Plus précisément, un canal permettant la sortie de chlore de la cellule n'existe plus pour les personnes atteintes. L'origine de la maladie est donc à rechercher dans les protéines CFTR qui composent normalement ce canal.

**Doc. 2 et 3 :** Il est noté dans le document 2 que la protéine CFTR d'un patient atteint de mucoviscidose compte un acide aminé de moins qu'une protéine CFTR normale. Il est donc possible que cette anomalie modifie la forme 3D de la protéine et rende impossible l'accomplissement de sa fonction. Le document 3 confirme l'absence de cet acide aminé, en position 508. Il montre également que cette absence est due à une mutation de l'ADN avec la délétion de trois nucléotides aux positions 1 522 à 1 524.

**Doc. 4 :** L'enfant III.3 est malade et possède donc deux allèles m (mutés) : il a en reçu un de chacun de ses deux parents. Comme ceux-ci sont sains, ils possèdent un allèle N (normal) et sont donc hétérozygotes (N/m). La probabilité pour un tel couple d'avoir un enfant malade est de 1/4, ce qui est très supérieur aux 1/4100 rencontrés pour la population générale. III.1 et III.2 sont sains, ils ne pourront avoir un enfant malade que s'ils sont tous deux hétérozygotes. On ne connaît pas les antécédents de III.1, on considère donc qu'il a un risque de 1/32 d'être hétérozygote. Pour III.2, on sait que ses parents sont hétérozygotes ; le risque pour ce couple d'avoir un enfant sain hétérozygote est de 2/3. Si le couple formé par III.1 et III.2 est hétérozygote, le risque d'avoir un enfant malade sera de 1/4. La probabilité finale est donc de  $1/32 \times 2/3 \times 1/4$  soit 1/192. Le risque est plus faible que pour le couple précédent, mais encore très supérieur aux 1/4100 de la population générale.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les patients atteints de mucoviscidose possèdent deux allèles mutés pour le gène CFTR. Leur expression donne une protéine CFTR anormale, incapable d'assurer sa fonction de « canal chlore » dans la membrane des cellules épithéliales. La conséquence pour ces cellules est une production excessive de mucus qui va obstruer certains conduits comme les bronches ou les canaux pancréatiques. Les patients montrent donc des difficultés respiratoires et digestives.

### 3. Ressources complémentaires

- **Site de l'association « vaincre la mucoviscidose »** qui contient de nombreuses ressources concernant la maladie, les soins, et l'état des recherches :  
<http://www.vaincrelamuco.org/>
- **Site de la fondation Lejeune** consacré à la thérapie génique de la mucoviscidose :  
[http://www.genethique.org/doss\\_theme/dossiers/therapie\\_genique/acc.therapie.htm](http://www.genethique.org/doss_theme/dossiers/therapie_genique/acc.therapie.htm)
- **Dossier thématique de l'INSERM** sur la thérapie génique de la mucoviscidose :  
<http://www.inserm.fr/thematiques/immunologie-hematologie-pneumologie/dossiers-d-information/therapie-genique>

## Les traitements médicaux de la mucoviscidose (p. 282-283)

Connaissances	Capacités et attitudes
On limite les effets de la maladie en agissant sur des paramètres du milieu. La thérapie génétique constitue un espoir de correction de la maladie dans les cellules pulmonaires atteintes.	Recenser, extraire et organiser des informations pour comprendre les traitements médicaux (oxygénothérapie, kinésithérapie) et les potentialités offertes par les thérapies génétiques.

### 1. Les intentions pédagogiques

Les traitements et perspectives de traitement qui sont présentés ici ne visent pas l'exhaustivité. Ils donnent juste une idée de ce qui peut se faire et permettent aux élèves de comprendre les deux types de stratégies : corriger les problèmes induits par l'anomalie génétique et corriger l'anomalie génétique elle-même. Il est donc important avant d'aborder cette partie que les mécanismes de la mucoviscidose aient été bien compris. Pour aller plus loin, de nombreux sites utiles fournissent des informations complémentaires comme celui de l'association « vaincre la mucoviscidose ».

Les **documents 1 et 2** décrivent les principaux soins et traitements que reçoit quotidiennement un patient atteint de mucoviscidose. Ils sont à relier aux anomalies pulmonaires et digestives constatées sur les pages précédentes. Un encadré dresse un bilan de l'impact de ces traitements sur l'espérance de vie des malades. Il sera utile de chercher à actualiser ces données pour montrer leur évolution au cours des années avec les progrès de la médecine. On pourra utiliser pour cela le « registre français de la mucoviscidose » édité tous les ans par l'association « vaincre la mucoviscidose » pour présenter l'état de la maladie en France.

Le **document 3** décrit succinctement le principe de la thérapie génique. Il pourra être complété selon le choix du professeur par des recherches documentaires pour détailler ce principe ou chercher les dernières avancées dans ce domaine. Des liens utiles sont présents à cette fin sur le **site ressources**.

Le **document 4** décrit deux des nombreuses études concernant la thérapie génique de la mucoviscidose. On peut, à l'aide de ces documents, montrer une certaine réussite de ces expérimentations et mesurer le chemin restant à parcourir. Encore une fois, des recherches documentaires permettront d'actualiser ces données.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Chez les patients atteints de mucoviscidose, les bronches sont encombrées par du mucus. La kinésithérapie respiratoire et l'administration de médicaments fluidifiants cherchent à éliminer cet excès de mucus. Les traitements antibiotiques permettent d'éviter le développement d'infections bronchiques.

Les canaux pancréatiques bouchés empêchent la libération des enzymes pancréatiques dans le tube digestif ; des compléments contenant ces enzymes sont donc prescrits aux patients pour faciliter l'assimilation des graisses.

**Doc. 3 :** Un fragment d'ADN contenant l'allèle normal du gène déficient est inséré dans un vecteur (par exemple un virus). Celui-ci a comme rôle de transporter ce frag-

ment dans les cellules atteintes et de faciliter son intégration puis son expression. La cellule va donc posséder un nouvel exemplaire du gène CFTR dans son génome, et l'expression de ce gène donnera une protéine CFTR fonctionnelle. La production excessive de mucus par les cellules épithéliales est donc stoppée.

**Doc. 3 et 4 :** Les patients traités expriment bien le gène transféré, et le niveau d'expression est supérieur au seuil jugé minimal pour corriger l'anomalie. Le problème est que cette correction est limitée dans le temps (les cellules ayant intégrées le gène meurent et sont renouvelées pas des cellules dépourvues du gène CFTR fonctionnel) ; il faut donc envisager des administrations régulières du vecteur pour maintenir le niveau d'expression du gène CFTR à un niveau satisfaisant. Ces administrations peuvent se faire par aérosols, une méthode simple réalisable par le patient sans aide médicale.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

La prise en charge classique cherche à limiter les effets de la maladie en éliminant les excès de mucus dans les bronches et en donnant des enzymes pancréatiques en complément alimentaire. Malheureusement, ces techniques ne peuvent empêcher une lente dégradation de l'état du patient. On cherche donc en parallèle à mettre au point une thérapie génique. Un gène fonctionnel serait alors inséré dans le génome des cellules épithéliales qui pourraient l'exprimer et ainsi produire un mucus normal. Ces techniques ne sont pas encore au point, mais des pistes prometteuses existent.

## Maladies génétiques et facteurs environnementaux (p. 284-285)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>Le plus souvent, l'impact du génome sur la santé n'est pas un déterminisme absolu. Il existe des gènes dont certains allèles rendent plus probable le développement d'une maladie sans pour autant le rendre certain. En général les modes de vie et le milieu interviennent également, et le développement d'une maladie dépend alors de l'interaction complexe entre facteurs du milieu et génome.</p> <p>Un exemple de maladie (maladie cardiovasculaire, diabète de type II) permet d'illustrer le type d'études envisageables.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recenser, extraire et organiser des informations pour identifier : <ul style="list-style-type: none"> <li>• l'origine multigénique de certaines maladies ;</li> <li>• l'influence des facteurs environnementaux ;</li> <li>• Comprendre que déterminer les facteurs génétiques ou non d'une maladie repose sur des méthodes particulières qui constituent les fondements de l'épidémiologie ;</li> <li>• Comprendre les conditions de validités d'affirmations concernant la responsabilité d'un gène ou d'un facteur de l'environnement dans le déclenchement d'une maladie.</li> </ul> </li> <li>– Savoir choisir ses comportements face à un risque de santé pour exercer sa responsabilité individuelle ou collective.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Considérer la mucoviscidose comme une maladie génétique va de soi pour un élève. Il existe un allèle malade, un allèle normal et il suffit donc d'analyser le génome pour savoir si l'individu est atteint ou pas. Pour des maladies comme les maladies cardiovasculaires ou le diabète de type 2, cela est moins évident. D'une part, le lien génétique n'est pas absolu, d'autre part, les gènes en cause sont souvent très nombreux et mal connus. L'étude du déterminisme de ces maladies passe donc par autre chose qu'une simple comparaison de séquences et nécessite une méthode nouvelle pour les élèves : l'épidémiologie. Les documents proposés ici vont donc permettre tout d'abord de préciser les facteurs en cause dans le déclenchement de maladies cardiovasculaires mais il détaille les étapes des études épidémiologiques qui ont permis de produire les données. L'objectif est donc double : comprendre la démarche, et conclure à l'aide des résultats obtenus à l'issue de cette démarche.

Le choix a été fait de ne présenter ici que les maladies cardiovasculaires, l'important étant de comprendre la démarche et la multiplicité des facteurs en cause. Ajouter une maladie et les mécanismes nécessaires à sa compréhension risque de compliquer la tâche. En particulier, les auteurs n'ont pas abordé le diabète de type 2 (sauf dans l'exercice 7 p. 299) car il fait l'objet d'une étude détaillée dans le programme de la classe de Terminale Scientifique.

Le **document 1**, comme dit précédemment, décrit les étapes d'une étude épidémiologique. Ces étapes fondamentales se retrouvent dans les différents types d'approches utilisées en épidémiologie. L'important est de comprendre que l'analyse se fait sur la base d'une étude statistique de deux groupes d'individus sélectionnés.

Les résultats obtenus montrent de façon claire que des facteurs génétiques et environnementaux ont une influence sur le déclenchement des maladies cardiovasculaires. Le choix de la mort subite permet au professeur de partir des défibrillateurs, installés de plus en plus souvent dans les lieux publics, puis de questionner sur leur utilité. Cela offre une entrée dans le thème.

Le **document 2** aborde l'étape suivante dans la démarche : une fois qu'un lien entre une maladie et le génome a été établi, il reste à identifier le ou les gènes en cause. On pourra établir des parallèles avec la démarche décrite dans le document 1 (constitution de groupes, gestion statistique).

Le **document 3** présente l'étape finale avec la vérification expérimentale de l'implication d'un gène dans le déclenchement d'une maladie cardiovasculaire.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Les sujets participant à l'étude sont tout d'abord sélectionnés, puis une enquête permet de déterminer dans quel groupe les placer. On les suit ensuite pour déterminer si il y a un lien entre le facteur considéré et la survenue d'une maladie.

Le graphique de gauche montre que l'existence d'antécédents familiaux de mort subite multiplie par deux le pourcentage de décès constatés pour cette même cause. On peut donc penser à une piste génétique pour le déclenchement de cette maladie. Le graphique de droite indique que le risque de décès par mort subite augmente avec l'IMC. L'obésité est donc un facteur important dans la survenue de cette maladie.

**Doc. 2 :** La recherche d'un gène impliqué reprend des éléments de la démarche en épidémiologie : constitution de deux groupes (« avec antécédents » et « sans antécédents ») et analyse statistique des résultats. En revanche, cette fois, on examine les séquences en cherchant des fragments de séquences qui se retrouvent plus fréquemment chez les individus malades. Ces fragments doivent appartenir à des gènes prédisposant à cette maladie.

**Doc. 3 :** Une hausse de l'expression du gène Galnt2 diminue le taux plasmatique de HDL et inversement. Les protéines HDL permettent de transporter le cholestérol jusqu'au foie et éviter qu'il ne se dépose sur les artères. Une baisse du taux de HDL peut donc favoriser la formation de caillots sanguins et donc d'accidents vasculaires. Il y a donc bien un lien entre le gène Galnt2 et le risque de survenue de maladies vasculaires.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

La mise en évidence du lien entre un facteur (génétique ou environnemental) et une maladie se fait par une étude épidémiologique. On constitue deux groupes, un seul des deux étant concerné par le facteur. Une analyse statistique du nombre de cas constaté dans les deux groupes permet de conclure sur la réalité de l'influence du facteur.

## Une altération du génome peut conduire au cancer (p. 286-287)

Connaissances	Capacités et attitudes
Des modifications accidentielles du génome peuvent se produire dans des cellules somatiques et se transmettre à leurs descendantes. Elles sont à l'origine de la formation d'un clone cellulaire porteur de ce génome modifié. La formation d'un tel clone est parfois le commencement d'un processus de cancérisation.	

### 1. Les intentions pédagogiques

Le cancer est une maladie connue de tous, mais dont les mécanismes sont en fait mal connus par les élèves, voire pas du tout. Ces deux pages présentent les grandes lignes du processus de cancérisation. Comme souvent dans ce chapitre, on ne rentre pas trop dans les détails, l'objectif étant de montrer que la formation d'une cellule cancéreuse est liée à des mutations de l'ADN.

Le **document 1** donne les étapes amenant à la formation d'une cellule cancéreuse. L'essentiel est de comprendre qu'une succession de mutations amène à la création de cette cellule. Les étapes ne sont pas détaillées. On peut ici comprendre que la formation d'une cellule cancéreuse répond à un principe de sélection naturelle qui s'exerce au sein des cellules d'un organisme : les cellules porteuses de la mutation sont avantageées donc s'imposent.

Le **document 2** permet de montrer que les tumeurs représentent des clones, une métastase formée à partir d'un tissu pulmonaire et qui se développe dans un tissu hépatique gardera des caractéristiques de cellule pulmonaire. Il donne également des réponses à des questions que les élèves risquent de se poser : qu'est-ce qu'une métastase ? Qu'est-ce qu'une tumeur ? Comment une tumeur peut provoquer la mort d'un patient ?

Le **document 3** permet de vérifier l'implication de mutations de certains gènes dans le développement de cellules cancéreuses. L'exemple choisi est celui de la protéine p53. C'est un exemple classique, simple et donc facile à illustrer de multiples façons. Ici, on commence par montrer le lien qui existe entre ce gène et le développement de cancers.

Le professeur trouvera sur le **manuel numérique Bordas** une vidéo 3D de la protéine p53 et de son mode d'action.

Le **document 4** poursuit l'étude du gène p53. Une fois que l'implication du gène est avérée, on passe à l'étude des différents allèles. Les séquences proposées permettent de comparer des cellules différentes. La comparaison entre différentes cellules cancéreuses permet de comprendre que différentes mutations de ce gène existent ; celle de deux cellules cancéreuses d'un même individu amène à l'idée de clone cellulaire porteur de la mutation.

Les fichiers permettant de comparer en classe les séquences ou d'observer la molécule p53 liée à l'ADN sont disponibles sur le **site ressources** et le **manuel numérique Bordas**.

## 2. Les pistes de travail

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Le premier événement est une mutation de l'ADN d'une cellule pulmonaire. La cellule mutée n'est pas éliminée par le système immunitaire et possède un avantage par rapport aux autres cellules pulmonaires, ce qui lui permet de subsister et de se diviser. D'autres mutations continuent à faire évoluer ce nouveau tissu ; les cellules qui le composent deviennent immortelles, ne répondent plus aux signaux internes et se divisent activement sans aucun contrôle. On a alors un clone de cellules cancéreuses formant une tumeur. Cette tumeur grossit, stimule le développement de vaisseaux sanguins pour venir l'alimenter. Des cellules cancéreuses peuvent alors se détacher de la tumeur primaire et circuler par le système sanguin. Elles iront se fixer dans un autre organe et être le point de départ d'une tumeur secondaire ou métastase.

**Doc. 3 :** Le graphique montre que l'expression du gène p53 est responsable de la disparition de la tumeur chez des souris. Le qualificatif de *suppresseur de tumeur* est donc justifié.

**Doc. 4 :** Toutes les cellules cancéreuses sont porteuses d'une mutation du gène de la p53. On peut donc supposer que ces mutations rendent la protéine p53 non fonctionnelle et favorise donc le développement de tumeurs. On voit par ailleurs que les différentes cellules d'une même tumeur sont porteuses des mêmes mutations, une tumeur représente donc un clone de cellules cancéreuses (toutes identiques).

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les cellules somatiques subissent continuellement des mutations au niveau de l'ADN. La plupart sont éliminées par différents systèmes, mais certaines subsistent et donnent au final une cellule cancéreuse. Celle-ci ne répond plus aux signaux de l'organisme et se divise activement pour former une tumeur. La mutation de gènes impliqués dans l'élimination de telles cellules comme celui de la p53 favorise ce processus de cancérisation.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas :** Vidéo « Modélisation tridimensionnelle de la protéine p53, suppresseur de tumeurs ».

## La cancérisation, un processus complexe (p. 288-289)

Connaissances	Capacités et attitudes
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Des modifications somatiques du génome surviennent par mutations spontanées ou favorisées par un agent mutagène. D'autres sont dues à des infections virales.</li> <li>- La connaissance de la nature des perturbations du génome responsable d'un cancer permet d'envisager des mesures de protection (évitement des agents mutagènes, surveillance, vaccination).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recenser, extraire et organiser des informations pour identifier l'origine des facteurs de cancérisation (agents mutagènes, infections virales).</li> <li>- Comprendre les causes multiples pouvant concourir au développement de certains cancers (cas des cancers pulmonaires) et identifier des mesures de prévention possibles.</li> <li>- Comprendre l'importance, en matière de santé publique, de certains virus liés à la cancérisation (hépatite B, papillomavirus) et connaître les méthodes de prévention possibles.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

La définition des mutations et des facteurs mutagènes a été abordée dans un autre chapitre, on peut donc se contenter ici de réinvestir ces connaissances et de travailler seulement sur la nature des facteurs mutagènes responsables des cancers présentés. Il sera également important de montrer les origines plurifactorielles de ces cancers et de ne pas laisser penser que les facteurs illustrés par les documents sont les seuls à exister. Pour l'action des virus, les programmes officiels imposent les exemples du papillomavirus et de l'hépatite B qui ont déjà été abordés dans le chapitre précédent traitant des IST. Le choix a été fait de ne traiter ici que l'exemple du papillomavirus pour bien en développer les mécanismes et les implications.

Les **documents 1 et 2** présentent trois facteurs jouant un rôle dans les cancers pulmonaires. Le choix a été fait de donner le facteur génétique et deux facteurs environnementaux parmi les plus classiques. On peut donc ainsi arriver à la notion de déclenchement plurifactoriel pour ces cancers. Les études présentées reprennent la démarche épidémiologique vue précédemment. Le premier graphique concernant les antécédents familiaux est l'occasion de développer un regard critique vis-à-vis des résultats obtenus. L'impact du génome ne peut être établi avec assurance que pour les cancers précoces, et les élèves devront comprendre que les résultats obtenus ne donnent pas toujours des résultats positifs.

Le **document 3** fait le lien avec un autre type de facteur que sont les infections virales. Il s'agit d'une étude épidémiologique facile à interpréter pour établir ce lien.

Le **document 4** poursuit l'étude de l'influence des infections à papillomavirus. Le lien est établi et va maintenant être expliqué en montrant l'action du virus sur la protéine p53. Un parallèle est donc établi avec ce qui a été abordé sur ce sujet page 287 et le professeur pourra même choisir de traiter le rôle de la p53 en partant de l'exemple du papillomavirus.

Le **document 5** termine sur cette thématique en traitant du dépistage.

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :**On voit que le risque de développer un cancer pulmonaire est à peu près le même que l'on ait des antécédents familiaux ou pas. En revanche, un cas de cancer

précoce chez un parent proche multiplie par 5 le risque d'en développer un soi-même. Il y a donc sans doute une part génétique dans le déclenchement des cancers pulmonaires. Les deux autres études montrent que l'exposition à des fumées de tabac ou à un air pollué augmentent considérablement le risque de développer ce type de cancer. Il y a donc de multiples facteurs favorisant la formation d'un cancer pulmonaire, mais aucun n'induit ce développement de façon obligatoire, ils ne font qu'augmenter le risque.

**Doc. 3 et 4 :** Plus de 80 % des femmes ayant développé un cancer du col de l'utérus montrent une infection par le papillomavirus contre moins de 20 % pour les autres. Il y a donc bien un lien entre une infection par le papillomavirus et le développement d'un cancer de l'utérus. On voit sur le document 4 que des protéines virales détruisent les protéines p53. Or, on a vu précédemment le rôle protecteur de cette protéine contre la formation de cellules cancéreuses.

**Doc. 5 :** Le dépistage des infections par le papillomavirus permettent de repérer les femmes présentant un risque accru de cancer du col de l'utérus. Elles pourront être suivies attentivement pour rechercher la présence de cellules anormales indiquant un cancer débutant. Ces dépistages et la prise en charge précoce des cancers a permis de faire reculer le nombre de décès de façon importante depuis une trentaine d'années.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

De nombreux facteurs agissent sur le développement des cancers ; leur point commun est cependant de n'être ni nécessaires ni suffisants pour ce développement. Ils ne font qu'augmenter le risque. Parmi ces facteurs, on trouve des facteurs génétiques, mais surtout de nombreux facteurs environnementaux comme le tabagisme, la pollution atmosphérique ou l'infection par certains virus comme le papillomavirus.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas :**  
Fiche documentaire « Papillomavirus et cancer : comment s'en protéger ? »
- **Site ressources Bordas :** ressource sur les modes de prévention contre le papillomavirus.
- **Site de l'Institut National du Cancer :**  
<http://www.e-cancer.fr/>
- **Site de l'Institut Gustave Roussy :**  
[http://www.igr.fr/fr/page/les-cancers\\_95](http://www.igr.fr/fr/page/les-cancers_95)

## La résistance bactérienne aux antibiotiques (p. 290-291)

Connaissances	Capacités et attitudes
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Des mutations spontanées provoquent une variation génétique dans les populations de bactéries. Parmi ces variations, certaines font apparaître des résistances aux antibiotiques.</li> <li>- L'application d'un antibiotique sur une population bactérienne sélectionne les formes résistantes et permet leur développement. L'utilisation systématique de traitements antibiotiques peut augmenter la fréquence des formes résistantes par sélection naturelle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concevoir et mettre en place un protocole permettant de montrer la sensibilité de microorganismes à différents antibiotiques.</li> <li>- Recenser, extraire et organiser des informations pour :</li> <li>- identifier la sensibilité ou la résistance de microorganismes à différents antibiotiques</li> <li>- calculer le taux d'apparition de résistances dans une population.</li> <li>- Comprendre, sur un exemple, l'application du raisonnement évolutionniste en matière médicale.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

La notion d'antibiotiques et leur rôle ont normalement déjà été abordés en classe de Troisième. Même si un rappel de ces définitions n'est pas inutile, on cherchera davantage ici à montrer un effet pervers de l'utilisation de ces molécules en médecine avec l'apparition de formes de résistance. C'est l'occasion de réinvestir également les notions vues en classe de Seconde et de Troisième sur les mécanismes de sélection naturelle. L'étude des documents présentés sur ces deux pages peut être complétée, selon le choix du professeur, par des comparaisons de séquences ou la réalisation d'un antibiogramme ; il pourra pour cela utiliser l'exercice 10 p. 301. Les séquences ainsi qu'un diaporama décrivant les étapes de la réalisation de l'antibiogramme sont sur le **manuel numérique BORDAS**.

Le **document 1** permet de rattacher la résistance bactérienne aux antibiotiques à une mutation d'un gène.

Le **document 2** relie ensuite le développement d'une population résistante à une sélection naturelle des porteurs de la mutation.

Les **documents 3 et 4** font enfin le lien entre les pratiques médicales de ces dernières décennies et le développement de formes résistantes. Le cas des bactéries super-résistantes est l'occasion de faire réfléchir les élèves sur les conséquences dans le futur à court, moyen et long terme (voir aussi « Pour aller plus loin », p. 296).

### 2. Les pistes de travail

#### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** Les bactéries produisent des enzymes capables de détruire certains antibiotiques. Une mutation du gène de cette enzyme peut lui permettre de détruire de nouvelles molécules antibiotiques. La bactérie développe donc une nouvelle résistance.

**Doc. 2 :** Les mutations se font au hasard. Si un antibiotique est ajouté au milieu de vie de bactéries, seules celles possédant la mutation survivront. Elles vont donc se multiplier et l'ensemble de la population devient résistante à l'antibiotique.

**Doc. 3 :** On voit une bonne correspondance entre la consommation des antibiotiques qui est multipliée par 4 en 10 ans et le pourcentage de formes résistantes qui varie

dans les mêmes proportions. C'est donc l'utilisation importante des antibiotiques en médecine qui est responsable de l'augmentation des formes résistantes.

**Doc. 4 :** Les souches bactériennes résistantes se multiplient et l'on voit apparaître des bactéries contre lesquelles très peu d'antibiotiques s'avèrent rester efficaces. Il est donc important de limiter au maximum l'emploi de ces molécules pour éviter de continuer à sélectionner les formes résistantes dans l'avenir.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

C'est un principe de sélection naturelle qui explique l'apparition de bactéries résistantes aux antibiotiques. L'utilisation de ces molécules en médecine constitue une pression sélective qui sélectionne les souches porteuses de mutations leur permettant de résister. Les populations évoluent donc et risquent de résister à toutes les molécules disponibles dans l'avenir.

## **3. Ressources complémentaires**

### ■ Manuel numérique Bordas :

- Diaporama « Réalisation d'un antibiogramme » ;
- Fiche documentaire « Les bactéries font de la résistance ».

La correction des exercices « **Tester ses connaissances** » figure à la fin du manuel de l’élève, page 353.

## 6 La démarche épidémiologique

- a. Faux. On ne prend pas le risque de rendre malades des personnes en les exposant volontairement à un composant suspecté dangereux. On regarde donc dans le passé et les habitudes alimentaires de ces personnes pour voir s’ils ont été exposés au composant A ou non.
- b. Vrai. Cette démarche remplace celle proposée en a.
- c. Vrai. Il faut veiller à ne faire varier qu’un seul facteur entre les deux groupes, sinon l’interprétation risque d’être faussée.
- d. Faux. Des cas de cancers peuvent apparaître sans influence de facteur mutagène. On va donc plutôt regarder la différence du nombre de cas entre les deux groupes.
- e. Faux. Le groupe « exposé » montre un nombre de cas de cancers identique au groupe « non exposé », mais l’effectif total est deux fois plus petit. Le calcul du pourcentage donne 7 % pour le groupe « exposé » et 2,6 % pour le groupe « non exposé ». On voit donc bien un risque plus important en cas d’exposition au composant alimentaire A.

## 7 Le diabète de type 2

- 1. Le tableau met en évidence un risque élevé de développement d’un diabète de type 2 si un membre de la famille proche est atteint. On suppose donc que des allèles partagés par les frères et sœurs sont responsables de ce risque plus élevé. L’origine génétique du diabète de type 2 est mise en évidence par cette étude.
- 2. Le graphique montre que le risque de développer un diabète de type 2 augmente de façon régulière avec l’IMC des individus. Un mode de vie sédentaire, une alimentation trop riche en sucres et en graisses, favorisent donc l’obésité, elle-même liée à un risque élevé de développement de diabète de type 2.

## 8 La phénylcétonurie

- 1. Comme le développement nerveux ne se fait pas normalement chez les sujets atteints, il paraît intéressant de proposer le test de dépistage à des nourrissons, pour pouvoir mettre en place un traitement le plus rapidement possible en cas de test positif.
- 2. Les parents du fœtus 2 ont déjà eu un enfant malade, ils sont donc tous les deux porteurs de l’allèle malade. Comme celui-ci est récessif, III.2 et III.3 sont tous deux hétérozygotes. Le fœtus 2 a une chance sur 4 d’être atteint avec des parents hétérozygotes. III.7 est extérieur à la famille et n’a pas d’antécédents familiaux connus, il a donc une probabilité de 1/60 d’être hétérozygote. Son épouse a des frères et sœurs malades, elle a donc des parents hétérozygotes. Elle a donc 2 chances sur 3 d’être hétérozygote le calcul final donne  $2/3 \times 1/60 \times 1/4$  soit 1/360.
- 3. Dans les deux cas, le risque est supérieur aux 1/16 000 de la population générale.

## 9 L'évolution de l'espérance de vie aux États-Unis

Le **premier graphique** montre une progression parallèle de l'espérance de vie en France et aux États-Unis jusque vers les années 1980. À partir de cette date, la pente pour les États-Unis s'infléchit et l'on observe même un début de baisse sur les dernières années. L'obésité peut être mise en cause car on voit une proportion de personnes en surpoids ou obèses presque trois fois plus forte aux États-Unis. Les habitudes alimentaires en sont la cause.

Le **dernier graphique** montre un lien existe entre l'obésité et le risque de survie d'un infarctus du myocarde : il est presque trois fois plus fort en cas d'obésité extrême. On peut donc supposer que la baisse de l'espérance de vie aux États-Unis peut s'expliquer par un taux d'obésité très élevé, responsable de maladies comme les maladies cardiovasculaires.

# La vision : de la lumière au message nerveux

## Activités pratiques

1

### Le cristallin : une lentille vivante (p. 304-305)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>Le cristallin est l'un des systèmes transparents de l'œil humain. Il est formé de cellules vivantes qui renouvellent en permanence leur contenu. Les modalités de ce renouvellement sont indispensables à sa transparence. Des anomalies de forme du cristallin expliquent certains défauts de vision. Avec l'âge sa transparence et sa souplesse peuvent être altérées.</p>	<p>Recenser, extraire et organiser des informations et/ou manipuler (dissection, maquette et/ou recherche documentaire) pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- localiser et comprendre l'organisation et le fonctionnement du cristallin ;</li> <li>- comprendre certains défauts de vision.</li> </ul>

#### 1. Les intentions pédagogiques

L'objectif de cette activité est très précis et bien exprimé par le programme : en effet, le fonctionnement optique de l'œil est désormais du ressort du programme de sciences physiques. Il s'agit donc uniquement de montrer que, malgré son apparence homogénéité et sa transparence, le cristallin est néanmoins un organe vivant. Ses particularités seront l'occasion de réinvestir des connaissances sur le fonctionnement cellulaire vu auparavant (cycle cellulaire, expression génétique, etc.). En aucun cas il ne s'agit donc d'expliquer ici la formation d'une image par l'œil : ce doit être fait en cours de physique. Il en sera de même des défauts purement optiques de la vision (myopie, hypermétropie) qui sont également du ressort de l'enseignement de sciences physiques.

Comme le précise l'introduction du programme, « *le programme de sciences de la vie et de la Terre fait le choix d'aborder une palette de thèmes variés et, par conséquent, accepte de ne pas trop les approfondir* ». Il convient donc de ne pas trop s'appesantir sur ce premier aspect de la vision : c'est pourquoi les auteurs proposent de ne pas s'attarder sur une étude anatomique de l'œil. On trouvera, en ouverture du chapitre, page 302, une photographie et un schéma qui permettent de s'interroger sur le rôle des différentes structures constituant l'œil.

Pour ceux qui le souhaitent, la version numérique du manuel propose une vidéo présentant la dissection de l'œil de bœuf.

D'emblée, le **document 1** présente les particularités anatomiques et fonctionnelles du cristallin : on trouvera dans cette présentation des caractéristiques communes à tout organe vivant, mais aussi des particularités, en lien notamment avec la transparence du cristallin. Le processus d'accommodation est brièvement décrit : l'exercice 7, page 321 permet éventuellement d'aller un peu plus loin (on comprend alors pourquoi

la contraction du muscle ciliaire produit paradoxalement un relâchement du cristallin et une augmentation de sa vergence).

Le **document 2** se situe à l'échelle cellulaire : il montre quelques particularités structurales, ultrastructurales et fonctionnelles des cellules du cristallin. Il ne s'agit pas de faire une étude exhaustive et approfondie des cellules du cristallin et de leur fonctionnement, mais de mettre en relation certains aspects de ce fonctionnement avec la propriété essentielle du cristallin qui est sa transparence.

Le **document 3** permet de réinvestir des connaissances sur la vie cellulaire abordées d'une façon générale dans la première partie du programme de Première S : cycle cellulaire, expression de l'information génétique notamment. Les informations apportées par ce document permettent à l'élève de trouver l'explication à certains phénomènes : on comprend en effet que le cristallin fonctionne sur les mêmes grands principes que toute cellule (mitose, expression d'une information génétique, renouvellement du contenu cellulaire) mais selon des modalités très particulières. La photographie exceptionnelle proposée ici peut être reliée à celle du document 2 : on comprend comment on peut passer d'une cellule banale nucléée (réperable dans l'assise externe antérieure du cristallin) à de longues cellules en rubans, arquées et anucléées.

Les anomalies de la vision présentées par le **document 4** (presbytie et cataracte) sont les seules qui peuvent être associées à une perturbation du fonctionnement biologique du cristallin (rappelons que myopie et hypermétropie sont dues à des phénomènes purement géométriques liés en général à la profondeur plus ou moins importante de l'œil). Dans le cadre d'une démarche d'investigation ou d'une tâche complexe, l'ensemble des documents de cette page fournit tous les éléments pour comprendre et expliquer presbytie et cataracte, deux défauts très courants de la vision.

La version numérique du manuel propose une animation expliquant le phénomène de presbytie et sa correction.

On trouvera page 319, « Des clés pour... mieux comprendre l'histoire des arts », une relation intéressante entre l'évolution de la peinture de Monet et la cataracte dont le peintre a été atteint.

La page 318, « Des clés pour... aller plus loin », présente les techniques modernes du traitement des déficiences du cristallin (implant notamment). Elle pourra donc compléter cette première approche.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** La fonction du cristallin est de laisser passer la lumière venant de l'extérieur de l'œil, en assurant une convergence des rayons lumineux. Le degré de vergence du cristallin est variable, ce qui permet l'accommodation, c'est-à-dire la mise au point d'une image nette sur la rétine lors de la vision d'objets rapprochés.

#### Doc. 2 :

- Forme parallélépipédique, en « ruban », perpendiculaire au trajet des rayons lumineux → pas de dispersion ;
- Cellules sans organites, sans noyau, protéines en réseau cristallin, cytoplasme sous forme de « gel » → transparence ;
- Nutrition à partir de nutriments solubles transmis par diffusion (pas de capillaires sanguins) → transparence.

**Doc. 2 et 3 :** Les cellules du cristallin ont une vie qui repose sur les mêmes principes que ceux qui régissent la vie de toute cellule : métabolisme exploitant des nutriments

fournis aux cellules, mitoses, expression d'un programme génétique, renouvellement du contenu cellulaire. Cependant, les modalités de ce fonctionnement sont très particulières :

- l'apport des nutriments ne se fait pas par les capillaires sanguins mais par simple diffusion à partir de l'humeur aqueuse ;
- l'information génétique est exploitée au début de la vie cellulaire puis le noyau est éliminé, ce qui explique la transparence du contenu cellulaire mais aussi les capacités limitées qu'ont ces cellules pour se réparer ;
- enfin, les cellules du cristallin se distinguent par leur exceptionnelle longévité.

**Doc. 4 :** La presbytie s'explique par un vieillissement normal des cellules du cristallin. En effet, l'accommodation nécessite une très bonne élasticité des cellules du cristallin. Comme ces cellules ne sont pas renouvelées, il est compréhensible que cette élasticité diminue avec l'âge.

Les cellules du cristallin ne se renouvellent pas et perdent rapidement leur noyau : elles ne pourront donc plus exploiter l'information génétique pour remplacer des protéines déficientes par exemple. Ainsi, contrairement aux autres tissus, les lésions subies par le cristallin et qui peuvent altérer sa transparence sont difficilement réparées.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les cellules du cristallin sont dépourvues de noyau et d'autres organites et leur cytoplasme est parfaitement transparent. Elles laissent donc passer la lumière. Elles ont une forme très allongée et sont agencées en un ensemble biconvexe qui assure la convergence des rayons lumineux. Leur élasticité permet une modification de la forme générale du cristallin et donc l'accommodation.

## 3. Ressources complémentaires

### ■ Manuel numérique Bordas :

- vidéo de la dissection de l'œil de bœuf ;
- animation expliquant le phénomène de presbytie et sa correction.

## La rétine : une mosaïque de photorécepteurs (p. 306-307)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La rétine est une structure complexe qui comprend les récepteurs sensoriels de la vision appelés photorécepteurs. Celle de l'Homme contient les cônes permettant la vision des couleurs (trois types de cônes respectivement sensibles au bleu, au vert et au rouge) et les bâtonnets sensibles à l'intensité lumineuse.</p>	<p>Extraire et exploiter des informations (maquette, logiciel et/ou recherche documentaire et/ou observations microscopiques) pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– comprendre l'organisation de la rétine ;</li> <li>– déterminer le rôle des photorécepteurs.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Cette activité permet de comprendre le rôle fondamental joué par la rétine dans la vision. Ce sera l'occasion de découvrir l'architecture de la rétine et les deux catégories de photorécepteurs qui la constituent. Leur rôle de récepteur sensoriel (genèse d'un signal nerveux en réponse à un stimulus) sera mis en évidence.

Le **document 1** présente une belle observation microscopique de la rétine : cette microphotographie pourra compléter des observations microscopiques faites par les élèves eux-mêmes. L'objectif est d'abord de constater que la rétine est bel et bien un tissu nerveux, constitué de neurones : trois couches principales de neurones sont identifiables. En leur sein, la couche la plus externe présente des cellules très particulières, sensibles à la lumière : ce sont les photorécepteurs, cônes et bâtonnets. Bien entendu, on observe bien moins de fibres et de connexions nerveuses que de corps cellulaires : il faut faire comprendre qu'une coupe très fine a été réalisée et que si cette coupe passe par un grand nombre de corps cellulaires, il est beaucoup plus rare que le plan de coupe contienne des fibres sur une grande longueur.

Le schéma permet d'établir la correspondance avec la photographie et de comprendre les trajets inverses de la lumière et du message nerveux.

Le **document 2** propose une spectaculaire observation des cônes et bâtonnets par microscopie électronique à balayage (en fait, on n'observe ici que les segments terminaux de ces cellules). On pourra aussi exploiter la belle photographie d'ouverture de chapitre, page 303. À noter que le diamètre des cônes est très variable (ils sont beaucoup plus gros dans la région périphérique de la rétine). Les deux encadrés permettent de trouver les informations essentielles concernant les caractéristiques structurales des cônes et des bâtonnets qui tapissent la rétine.

L'intérêt du **document 3** est de confirmer le rôle de récepteur sensoriel, plus particulièrement de photorécepteur, attribué aux cônes et aux bâtonnets. D'une façon plus générale et sans aller trop loin, il s'agit ici de bien faire comprendre que la vision est, biologiquement, un phénomène nerveux. En effet, les photorécepteurs présentent une modification de leur potentiel électrique quand ils sont soumis à un stimulus lumineux. On pourra signaler, sans entrer dans les détails de la transduction, que cette propriété est dépendante de la présence d'un pigment photosensible dans ces cellules. À noter que la réponse du photorécepteur varie en amplitude, en fonction de l'intensité de la stimulation, jusqu'à une certaine limite (saturation). On verra ultérieurement (page 313) que le message nerveux présente, lui, d'autres caractéristiques (variation en fréquence).

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Les cellules photoréceptrices de la rétine sont les cônes et les bâtonnets. Elles sont localisées dans la couche cellulaire la plus externe de la rétine.

**Doc. 1 :** Chaque photorécepteur est lié à un neurone bipolaire, lui-même connecté à un neurone ganglionnaire dont le prolongement cytoplasmique constitue une fibre du nerf optique.

**Doc. 3** Cette étude montre que le cône réagit à un stimulus lumineux par une variation du potentiel électrique de sa membrane. Cette cellule est donc sensible à la lumière. De plus, on constate que plus l'intensité du stimulus est importante, plus la variation du potentiel électrique l'est également, jusqu'à une valeur qui semble être maximale.

**Doc. 1 à 3 :** La rétine est un tissu nerveux car elle est constituée d'un ensemble de cellules nerveuses interconnectées. Elle possède la propriété de réagir par une variation de potentiel électrique à une stimulation extérieure (ici la lumière), ce qui est une propriété caractéristique d'un récepteur sensoriel.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les cellules photoréceptrices de la rétine constituent l'assise cellulaire périphérique de cette fine membrane. Ce sont de petites cellules, allongées et très fines, renfermant un pigment photosensible et réagissant à un stimulus lumineux par une variation de potentiel électrique. Ces cellules sont connectées à des neurones qui forment les fibres du nerf optique.

## 3. Ressources complémentaires

- « Le cerveau à tous les niveaux : les photorécepteurs » :

[http://lecerveau.mcgill.ca/flash/i/i\\_02/i\\_02\\_m/i\\_02\\_m\\_vis/i\\_02\\_m\\_vis.html](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/i/i_02/i_02_m/i_02_m_vis/i_02_m_vis.html)

## Les rôles complémentaires des photorécepteurs (p. 308-309)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La rétine est une structure complexe qui comprend les récepteurs sensoriels de la vision appelés photorécepteurs. Celle de l'Homme contient les cônes permettant la vision des couleurs (trois types de cônes respectivement sensibles au bleu, au vert et au rouge) et les bâtonnets sensibles à l'intensité lumineuse.</p> <p>Des anomalies des pigments rétiniens se traduisent par des perturbations de la vision des couleurs.</p>	<p>Extraire et exploiter des informations (maquette, logiciel et/ou recherche documentaire et/ou observations microscopiques) pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- comprendre l'organisation de la rétine ;</li> <li>- déterminer le rôle des photorécepteurs.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

Cette activité complète la précédente : après avoir compris que la rétine est un tissu nerveux tapissé d'une multitude de cellules photosensibles et qu'il existe deux grands types de photorécepteurs, il est logique de s'interroger sur leurs rôles respectifs.

Le **document 1** permet de constater la très inégale répartition des photorécepteurs dans la rétine. Le graphique est accompagné d'une schématisation « à plat » de cette répartition : à noter que l'on observe non seulement une variation de la densité relative des deux types de photorécepteurs mais aussi une variation importante du diamètre des cônes (les cônes de la fovéa sont beaucoup plus fins). Cette inégale répartition est à rapprocher de la différence d'acuité visuelle entre la vision centrale et la vision périphérique. On établit donc une première relation entre les propriétés de la vision et la répartition spatiale des différents photorécepteurs. La mise en relation du graphique montrant l'acuité visuelle en fonction de l'excentricité et la densité des cônes et bâtonnets conduit à la compréhension de l'importance de la fovéa dans la vision diurne : la fovéa correspond à la densité maximale des cônes, permettant la vision en couleurs avec la meilleure acuité. Il faut bien faire comprendre que l'essentiel de la vision diurne implique cette zone restreinte de la rétine (d'où les conséquences de la DMLA, voir exercice 6 page 320).

Le **document 2** exploite différentes informations concernant les propriétés des différents photorécepteurs (notamment celles vues au cours de l'activité précédente) : il permet alors une comparaison de la vision nocturne et de la vision diurne. Comme la vision nocturne fait appel aux bâtonnets, actifs seulement pour un faible éclairement et que ceux-ci ne permettent pas la perception des couleurs, cette dimension de la vision du monde n'est pas perceptible dans de telles conditions. Par ailleurs, l'étude de la répartition des bâtonnets dans la rétine (doc. 1), reliée aux informations de ce document, permet de montrer que la meilleure acuité visuelle nocturne est obtenue quand les objets observés ne sont pas situés sur l'axe optique. C'est pour une excentricité de 20 degrés que l'image d'un objet se forme sur la rétine dans la zone où elle comporte la densité maximale des bâtonnets.

Cependant, dès que les conditions d'éclairement sont suffisantes, c'est la vision diurne impliquant les cônes qui est mise en œuvre (les bâtonnets sont alors saturés et inopérants).

La complémentarité des deux types de photorécepteurs rétiniens est ainsi mise en évidence.

Avec le **document 3**, on approfondit le rôle des cônes dans la vision des couleurs : ceci permettra d'une part de mieux comprendre l'importance des pigments contenus dans les photorécepteurs, d'autre part de préparer l'activité suivante qui fait le lien entre la vision des couleurs et l'évolution. Le rôle des opsines est donc précisé et matérialisé par la comparaison de leur spectre d'absorption. Une étude de leurs modèles moléculaires (une vidéo est proposée dans la version numérique du manuel) permet de constater la grande similitude de ces molécules. On comprend ensuite que la vision des couleurs repose sur un déterminisme génétique : en, effet, on réinvestit ici les connaissances de la première partie du programme sur la relation gène-protéine. L'étude du daltonisme vient confirmer ce constat ; dans le cadre d'une démarche d'investigation, il est d'ailleurs tout à fait possible de proposer comme objectif motivant cette activité la recherche de la cause du daltonisme. À noter que le test proposé ici n'est qu'une approche du test d'Ishihara qui comporte en réalité de nombreuses mires. Dans le cas présent, un daltonien deutéranope (qui ne perçoit pas le vert) ne distinguera pas le chiffre 5.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** La vision centrale se fait au niveau de la fovéa, essentiellement garnie de cônes. Ceux-ci étant peu sensibles, elle nécessite un plus fort éclairement (vision diurne). Du fait de la densité maximale des cônes, l'acuité visuelle est excellente dans ces conditions. Comme cette vision implique les différentes catégories de cônes, la vision des couleurs est possible.

La vision périphérique fait, quant à elle, appel aux portions de rétine situées en dehors de la fovéa, plus riches en bâtonnets qu'en cônes. Du fait des caractéristiques des bâtonnets, la vision périphérique est donc possible même si l'éclairement est faible (vision nocturne) ; en revanche, la vision périphérique est peu précise. Les bâtonnets ne permettent pas de distinguer les couleurs (une seule sorte de photorécepteurs) et la vision s'effectue donc en « nuances de gris ».

**Doc. 1 et 2 :** La lecture nécessite un bon éclairement puisqu'elle est réalisée par les cônes (photorécepteurs ultra-majoritaires dans la fovéa), qui sont peu sensibles (moins que les bâtonnets). Or, cette zone où la densité des cônes est maximale est de petite taille : pour que l'image du texte se forme continuellement sur cette zone, l'œil doit suivre la ligne, mot à mot en permanence, de façon très précise.

**Doc. 3 :** En effet, chez une personne qui ne peut pas produire d'opsine sensible au vert, une radiation lumineuse verte ne pourra être perçue que par les cônes sensibles au rouge. Comme le montre les spectres d'absorption, une radiation verte (ex. 525 nm) sera absorbée avec la même intensité par les cônes sensibles au rouge qu'une radiation rouge (ex. 625 nm). Ces deux couleurs seront donc perçues de la même façon.

**Doc. 3 :** Il existe d'autres anomalies de la vision des couleurs. Par exemple, d'autres formes de daltonisme sont dues à l'absence d'opsine sensible au rouge ou à l'absence d'opsine sensible au bleu (beaucoup plus rare). Dans tous ces cas, l'ensemble des nuances colorées ne sont restituées qu'à partir de deux sources au lieu de trois : de ce fait, certaines couleurs sont perçues de façon identique et sont donc confondues.

L'achromatopsie, due à l'absence totale d'opsines, existe mais est rarissime : dans ce cas, le sujet ne voit le monde qu'en nuances de gris.

## Synthèse : réponse au problème à résoudre

Les cônes sont des photorécepteurs relativement peu sensibles à la lumière mais permettant une vision très précise. L'existence de trois types de cônes, renfermant des pigments différents, permet une vision trichromatique des couleurs. La très grande densité des cônes dans la fovéa (région centrale de la rétine), permet la vision centrale diurne (exigeant un bon éclairement) que l'on utilise par exemple au cours de la lecture.

Les bâtonnets sont beaucoup plus sensibles à la lumière, mais ils ne permettent de percevoir ni les détails ni les couleurs. La prédominance des bâtonnets dans la région périphérique de la rétine permet néanmoins une vision dans de faibles conditions d'éclairement.

### 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas :**

- fiche documentaire « Un nouvel implant a permis à un aveugle de déchiffrer des lettres et des mots » ;
- fiches documentaires « Une affection chronique, la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) », « John Dalton et le daltonisme » ;
- vidéo des trois modèles moléculaires des opsines.

- **Site ressources Bordas** : modèles moléculaires des différentes opsines (fichiers pdb).

- **« Les daltoniens », un site bien documenté sur ce sujet :**

<http://daltoniens.fr/>

- **« Le test d'Ishihara »** : explications complètes sur le site du Syndicat National des Ophtalmologistes de France (SNOF) <http://www.snof.org/vue/couleurs4.html>

## Vision des couleurs et parenté chez les primates (p. 310-311)

Connaissances	Capacités et attitudes
Les gènes des pigments rétiniens constituent une famille multigénique (issue de duplications) dont l'étude permet de placer l'Homme parmi les primates.	Extraire et exploiter des informations (maquette, logiciel et/ou recherche documentaire et/ou observations microscopiques) pour faire le lien entre la vision des couleurs et l'évolution.

### 1. Les intentions pédagogiques

L'objectif de cette activité est de montrer que l'on peut utiliser ce que l'on sait des modalités de la perception des couleurs comme mode d'établissement d'une parenté entre l'Homme et d'autres espèces animales. On montre ainsi que le concept d'évolution repose sur des arguments bien établis. C'est à travers cette activité que l'idée d'une complexification des génomes reposant sur la constitution de familles multigéniques est abordée. Cette notion importante sera réinvestie en classe de Terminale : il convient donc de ne pas négliger cet aspect.

Le **document 1** complète les informations établies au cours de l'activité précédente concernant les bases génétiques de la vision des couleurs : la similitude apparente entre les trois opsines ayant été établie visuellement par l'observation des modèles moléculaires, il apparaît nécessaire de recourir à d'autres outils pour faire une comparaison plus précise de la séquence des acides aminés des trois opsines humaines. On peut, pour mener à bien une telle activité, utiliser le logiciel « Phylogène » ou encore « Anagène » (bien noter qu'il s'agit ici d'une matrice des différences). On réinvestit alors les connaissances de la partie 1 du programme sur la relation gène-protéine : la similitude des opsines traduit une similitude des gènes qui codent pour ces protéines.

Le **document 2** est purement explicatif et informatif : en effet, si l'on peut tirer de l'étude précédente un argument en faveur de l'origine commune des gènes codant pour les différentes opsines, il serait vain de chercher à en faire deviner le mécanisme. Néanmoins, ce document permet de mettre les élèves en situation d'activité : en exploitant le modèle proposé ici d'une façon générale, il leur sera demandé de l'appliquer précisément au cas de la famille multigénique des opsines.

Avec le **document 3**, on s'intéresse au cas d'autres espèces de mammifères. Cette première approche, très simple, consiste à comparer les séquences des allèles du gène codant pour l'une des opsines pour quatre primates et un mammifère non-primate. La comparaison des portions de séquences montre la grande ressemblance entre les espèces de primates, et un moindre degré avec la Souris ; ces informations sont concordantes avec celles du tableau. On peut ainsi d'ores et déjà regrouper l'Homme avec les autres primates (plus grande proximité qu'avec la Souris) et préciser la place de l'Homme au sein de ce groupe (très grande proximité génétique avec le Chimpanzé).

Le **document 4** va un peu plus loin : en reliant les informations données ici avec ce qui a été vu précédemment (document 2 notamment), on met en évidence que certaines espèces ont acquis un gène supplémentaire, celui de l'opsine V, et donc qu'un enrichissement du génome a effectivement eu lieu au cours l'histoire évolutive des primates, permettant à la plupart d'entre eux de bénéficier d'une vision trichromatique (contrairement à la plupart des mammifères non primates).

Le **document 5** est un arbre phylogénétique simplifié des espèces présentées dans le document 3. Les élèves ont déjà vu ce type d'arbre au collège en classe de 3<sup>e</sup> et sont donc en mesure de l'analyser. La mise en relation des informations des documents 3 et 4 avec ce dernier document permet de réaliser une synthèse et de montrer la parenté entre les primates trichromates. La Souris et le Saïmiri étant dichromates, l'acquisition du gène de l'opsine V peut donc être située après la divergence de la lignée du Saïmiri. L'Homme est ainsi placé parmi les primates trichromates, comme le Macaque et le Chimpanzé (d'après les documents 3 et 4) et possède une parenté plus étroite avec ce dernier (comme les comparaisons du document 3 le montrent).

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Les pigments rétiniens (opsines) présentent de grandes similitudes. La séquence de l'opsine sensible au bleu présente plus de 40 % d'identité avec la séquence de l'opsine sensible au rouge. Cette dernière possède plus de 95 % d'identité avec celle de l'opsine au vert. Ces protéines sont bien entendues codées par des gènes. Il serait très surprenant que de telles similitudes soient dues au simple hasard. Il est beaucoup plus logique de faire l'hypothèse que ces gènes ont en fait une origine commune, ce qui expliquerait alors l'existence de telles similitudes.

Les différences entre ces gènes peuvent alors facilement s'expliquer : l'ADN étant relativement instable (voir Partie 1 chapitre 2), des mutations ponctuelles s'accumulent au cours du temps, ce qui différencie peu à peu ces gènes, initialement identiques.

**Doc. 1 et 2 :** Le schéma sera construit à partir de celui du document 2.

Une première duplication, sur deux chromosomes différents (7 et X), suivie de mutations ponctuelles aboutit au gène B et au gène R. Ensuite, une duplication du gène R, cette fois-ci sur le même chromosome (X), aboutira après mutations ponctuelles à différencier le gène V.

**Doc 2. et 4 :** Le document 2 propose un mécanisme d'enrichissement du génome à partir d'un unique gène ancestral. De fait, le document 2 montre que certaines espèces de primates possèdent deux gènes codant pour deux opsines alors que d'autres en ont trois. On peut donc penser que la duplication génique qui a doté certains primates d'un troisième gène codant pour l'opsine verte s'est produite au cours de l'histoire évolutive des primates : tous les primates qui descendent du premier primate ayant bénéficié de cette innovation sont donc dotés d'une vision trichromatique.

**Doc 3. à 5 :** D'après le document 3, tous ces mammifères sont apparentés car leur gène qui code pour l'opsine sensible au bleu présente de grandes similitudes. Le degré de similitude permet d'affiner cette parenté : ainsi, par exemple, on peut faire un regroupement des quatre espèces de primates (très nettement plus apparentées entre-elles qu'avec la souris). Au sein de ce groupe, et pour la même raison, c'est le Chimpanzé qui apparaît le plus étroitement apparenté avec l'Homme. Le document 4 confirme et précise cette parenté : parmi ces mammifères, trois espèces seulement (le Macaque, l'Homme et le Chimpanzé) ont une vision trichromatique (ils possèdent en plus le gène de l'opsine sensible au vert) : elles sont donc plus étroitement apparentées, comme le montre cet arbre phylogénétique.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

L'étude comparée des pigments rétiniens chez les primates révèle de grandes similitudes. Cette similitude est un argument scientifique établissant une étroite parenté entre

ces espèces. Une étude plus précise montre qu'il s'est produit, au sein du groupe des primates, un phénomène d'enrichissement du génome, à la base de la vision trichromatique qui caractérise l'Homme et d'autres primates. L'étude comparée des pigments rétiniens montre donc que la vision est bel et bien un produit de l'évolution des espèces.

### 3. Ressources complémentaires

- **Site ressources Bordas** : séquences nucléotidiques des gènes des opsines pour différentes espèces animales (fichiers exploitables avec Anagène ou GénieGen).

## De la rétine au cerveau (p. 312-313)

Connaissances	Capacités et attitudes
Le message nerveux issu de l'œil est acheminé au cerveau par le nerf optique.	Extraire et exploiter des informations (maquette, logiciel et/ou recherche documentaire et/ou observations microscopiques) pour comprendre l'organisation des voies visuelles.

### 1. Les intentions pédagogiques

L'activité qui clôture ce chapitre a pour but de montrer que la vision est effectivement une fonction qui nécessite une activité nerveuse : il s'agit donc de présenter les voies le long desquelles circulent les messages nerveux issus de la rétine et de montrer que voir est une activité impliquant nécessairement une partie du cerveau. Il ne s'agit ici que d'une première approche. Le rôle du cerveau dans la vision sera détaillé dans le chapitre suivant.

Les auteurs proposent de commencer par montrer que la vision implique le cerveau : ainsi la problématique du lien entre rétine et cerveau et de la nature des messages circulant se trouvera clairement posée. Cette façon de procéder s'inscrit donc parfaitement dans une démarche d'investigation.

Les images du **document 1** (obtenues par tomographie par émission de positons et IRM) permettent de montrer l'existence d'une spécialisation des régions du cerveau, et en particulier de localiser les aires visuelles au niveau occipital. L'image correspondant aux mots écrits constitue une première approche de la liaison entre vision et langage qui sera détaillée dans le chapitre 5.

Le **document 2** permet de préciser les informations tirées du document 1. On y voit que l'aire visuelle occipitale est une carte du champ visuel : à chaque portion du champ visuel (et donc de la rétine) correspond une partie du cortex visuel primaire. On remarque de plus que la portion du champ visuel dont l'image se forme sur la fovéa est celle à laquelle correspond la plus grande surface corticale. Ceci montre la liaison entre la densité des photorécepteurs et la surface corticale correspondante. À ce stade, on se contentera de cette première approche (cortex visuel primaire). Les rôles plus complexes des autres aires visuelles seront envisagés au cours du chapitre 5.

Le trajet des voies visuelles est présenté sur le **document 3**. La mise en relation des deux images, l'une montrant le point aveugle de la rétine (et donc le départ des fibres nerveuses issues de la rétine), l'autre montrant la suite des voies visuelles, permet de bien visualiser la connexion entre les photorécepteurs rétiniens et le cortex occipital. L'existence du « point aveugle » (zone dépourvue de photorécepteurs) pourra être mise en évidence grâce à la célèbre expérience de Mariotte (voir l'exercice, page 323). C'est bien à ce stade de l'étude que la mise en évidence de cette particularité de la rétine se justifie.

Le **document 4** permet enfin une approche simplifiée de la nature de l'information circulant par les voies visuelles découvertes dans le document 3. Les messages nerveux sont de nature électrique et sont codés en fréquence. En première approche, on considérera qu'un stimulus lumineux engendre une salve de potentiels d'action, la réa-

lité étant cependant bien plus complexe. En comparant un tel message avec la réponse électrique d'un cône à un stimulus nerveux (document 3 page 307), on peut d'ailleurs constater, sans entrer dans les détails, qu'un traitement du message nerveux a été réalisé au sein même de la rétine.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** L'image obtenue par tomographie par émission de positons alors que l'individu lit des mots montre que l'arrière du cerveau ainsi qu'une zone située sur la partie arrière-droite sont actives. Ce sont les seules zones actives, et elles diffèrent de celles actives lors d'une stimulation auditive. La vision est donc associée à une activité de régions précises du cerveau, qui apparaissent spécialisées dans la fonction visuelle.

**Doc. 2 :** La zone occipitale (arrière du cerveau) qui est activée par des stimulations visuelles (document 1) est une « cartographie du champ visuel » : chaque secteur de ce cortex correspond à une partie du champ visuel. Les zones du champ visuel correspondant à la fovea (la partie de rétine la plus riche en cônes) sont « représentées » dans le cerveau par une zone très étendue. On remarque que l'hémisphère cérébral droit correspond au champ visuel gauche.

**Doc. 2 et 3 :** Voir schéma bilan page 317 : le champ visuel gauche est perçu par les deux moitiés droites des rétines des deux yeux. Les messages nerveux partant de la moitié droite de la rétine de l'œil gauche passent par les fibres du nerf optique gauche et rejoignent les messages issus de la moitié droite de la rétine de l'œil droit et passant, elles par les fibres du nerf optique droit (jonction au niveau du chiasma optique). Ces deux groupes de fibres sont ensuite reliées au cortex occipital droit.

**Doc. 4 :** Le message transmis depuis la rétine est composé de signaux électriques dont le nombre est en relation avec l'intensité de la stimulation : c'est un message nerveux. Les stimulus lumineux sont ainsi codés par la fréquence des signaux constituant ce message nerveux.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Le message visuel est transmis au cerveau sous la forme d'un message nerveux (salves de variations du potentiel électrique des fibres nerveuses) qui cheminent le long des nerfs optiques. Dans le cerveau, les voies visuelles se croisent en partie avant de rejoindre la partie arrière du cerveau, dénommée cortex visuel. L'arrivée de ces messages dans cette partie du cerveau engendre une perception visuelle.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas :** fiche documentaire « Anton Räderscheidt (1892 - 1970) ».
- **Le cerveau à tous les niveaux, la vision :**  
[http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d\\_02/d\\_02\\_cr/d\\_02\\_cr\\_vis/d\\_02\\_cr\\_vis.html](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_02/d_02_cr/d_02_cr_vis/d_02_cr_vis.html)

La correction des exercices « **Tester ses connaissances** » figure dans le manuel de l’élève, page 353.

## 6 La dégénérescence maculaire liée à l’âge

La DMLA correspond à une disparition progressive, plus ou moins rapide, des cônes de la partie centrale de la rétine. En conséquence, il se forme une tache noire dans le centre du champ visuel. Inversement, le sujet est facilement ébloui car la vision s’effectue avec les bâtonnets, photorécepteurs très sensibles à la lumière. Le handicap est très important car le sujet ne peut, par exemple, plus lire (perte de la partie centrale du champ visuel, très mauvaise acuité de la vision périphérique, mauvaise perception des couleurs). Cependant, la cécité ne sera pas totale car les bâtonnets ne sont pas atteints.

## 7 Le mécanisme de l’accommodation

*Dans la première impression des spécimens, les quatre affirmations ont été numérotées dans l’ordre : a, b, d, c. L’ordre normal (a, b, c, d) sera rétabli dans la réimpression du manuel destiné aux élèves.*

- a. Faux. En A, le muscle ciliaire est relâché (diamètre plus grand).
- b. Vrai. En B, le muscle ciliaire étant contracté, les filaments diminuent leur traction et le cristallin prend sa forme naturellement plus bombée, donc plus convergent.
- c. Vrai. En A, le relâchement du muscle ciliaire provoque une tension des filaments qui étire le cristallin. Celui-ci est donc moins bombé donc moins convergent.
- d. Faux. En B, le muscle ciliaire est contracté (diamètre plus petit).

## 8 Acuité visuelle et structure de la rétine

1. Dans la région de la fovéa, la rétine ne comporte que des cônes, en forte densité (180 000 par mm<sup>2</sup>). Chaque cône est relié à un neurone intermédiaire et finalement à une fibre du nerf optique.

En région périphérique, la très grande majorité des photorécepteurs sont des bâtonnets (20 fois plus de bâtonnets que de cônes). Le câblage s’établit par convergence, de telle sorte qu’une même fibre du nerf optique transmet les messages issus de plusieurs bâtonnets.

2. Les cônes permettent une meilleure acuité visuelle. Dans la fovéa, leur nombre, leur petite dimension et le câblage de la rétine permettent de transmettre au cerveau des informations différentes pour des points très rapprochés. En région périphérique, la perception par les bâtonnets, moins nombreux, plus gros et convergents ne permet pas une telle acuité visuelle : des points rapprochés donneront naissance à un message finalement transmis par la même fibre du nerf optique et ne seront donc pas distingués les uns des autres.

## 9 Le trajet des voies visuelles

1. Les lésions C et D suppriment toutes les voies nerveuses qui arrivent au cortex visuel droit. Or, on constate dans ce cas une cécité du champ visuel gauche perçu par chacun des deux yeux. Le champ visuel droit, en revanche, est perçu correctement.

Ainsi :

- le cortex visuel de l’hémisphère droit perçoit le champ visuel gauche ;
- le cortex visuel de l’hémisphère gauche perçoit le champ visuel droit.

## 2. Pour l'œil droit :

- Une lésion en A se traduit par la cécité totale de l'œil droit : le nerf optique issu de l'œil droit transmet donc tous les messages nerveux issus de l'œil droit.
- Une lésion en B se traduit par une cécité partielle : le sujet ne perçoit plus le champ visuel droit perçu par l'œil droit. Cela signifie que les fibres nerveuses de l'œil droit qui perçoivent cette partie du champ visuel (côté nasal de la rétine) ont été sectionnées.
- Les lésions en C et D entraînent une cécité partielle du champ visuel gauche. Cela signifie que les fibres nerveuses issues de l'œil droit et correspondant à la perception du champ visuel gauche (côté temporal de la rétine) ont été sectionnées. En revanche, le champ visuel droit, est perçu correctement : cela signifie que ces sections n'ont pas affecté les fibres nerveuses issues de l'œil droit permettant de percevoir la partie droite du champ visuel (côté nasal de la rétine de l'œil droit).

Ainsi, les fibres nerveuses issues de l'œil droit sont toutes regroupées dans le nerf optique droit. Au niveau du croisement des nerfs optiques, la moitié des fibres nerveuses (celles correspondant à la perception du champ visuel gauche, donc issues du côté temporal de la rétine) restent dans la partie droite du cerveau. L'autre moitié, celles correspondant à la perception du champ visuel droit, donc issues du côté nasal de la rétine) traversent la zone de croisement et rejoignent le cortex visuel de l'hémisphère gauche.

C'est évidemment l'inverse pour l'œil gauche.

## 10 Pigments rétiniens et parenté entre espèces

**1.** Cette comparaison révèle un degré de similitude important (supérieur à 47 %) de la séquence des acides aminés de l'opsine sensible au bleu entre toutes les espèces. Si on considère qu'une telle similitude ne peut être due à un simple hasard, cela signifie qu'elle traduit une parenté entre ces espèces.

**2.** Une opsine est une de protéine, elle est donc codée par un gène. Du fait des nombreuses similitudes constatées, il faut admettre que toutes ces espèces ont hérité ce gène d'un ancêtre commun. Depuis, au cours de l'histoire évolutive de chaque espèce, chaque gène a pu subir indépendamment des mutations ponctuelles, ce qui les différencie.

**3.** Puisque les différences constatées sont dues à des mutations ponctuelles accumulées au cours du temps, on peut considérer que le taux d'identités entre deux opines traduit le temps écoulé depuis la divergence entre les deux espèces. Il est donc possible de préciser le degré de parenté entre les espèces : ici, l'espèce la plus proche de l'Homme est le Macaque, la plus éloignée est la Poule.

## 11 L'expérience de Mariotte

Lorsque le livre est éloigné, l'œil droit perçoit le rond et la croix, mais lorsque l'on rapproche l'image (vers 25 cm environ), la croix semble disparaître...

Schéma : se reporter par exemple au schéma du document 1 page 306. Dans la région du nerf optique, on constate l'absence de photorécepteurs et de neurones, l'espace étant occupé par le regroupement des fibres constituant le nerf optique. Dans cette région, aucun stimulus nerveux ne peut donc générer un message nerveux visuel.

Si les images de la croix et du rond se forment chacune sur une région comportant des photorécepteurs, la croix et le rond sont vues. À la distance de 25 cm, l'image de la croix se forme exactement sur la région du nerf optique, dépourvue de photorécepteurs : elle n'est donc pas perçue.

# Cerveau et vision

## Activités pratiques

1

### La vision : une construction cérébrale (p. 326-327)

Connaissances	Capacités et attitudes
Plusieurs aires corticales participent à la vision. L'imagerie fonctionnelle du cerveau permet d'observer leur activation lorsque l'on observe des formes, des mouvements. La reconnaissance des formes nécessite une collaboration entre les fonctions visuelles et la mémoire.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exploiter des données, notamment expérimentales, pour comprendre qu'une image naît des interactions entre différentes aires du cortex cérébral.</li> <li>- Interpréter des observations médicales et/ou des imageries cérébrales chez l'Homme.</li> </ul>

#### 1. Les intentions pédagogiques

Cette activité a pour but de montrer que la perception visuelle est finalement une activité cérébrale et qu'elle est réalisée par des traitements séparés des différents aspects de la scène vue, puis d'une intégration des informations perçues par le cortex visuel à tout instant. Comme les programmes le recommandent, les documents font appel à des études de cas cliniques et à des résultats d'exploration fonctionnelle du cerveau. Les exemples présentés ici s'appuient pour une large part sur les travaux célèbres de Semir Zeki (University College London).

Ainsi, le **document 1** présente le cas d'un individu souffrant d'un défaut de perception des couleurs (identifiable d'après la comparaison du tableau de Mondrian et de sa reproduction) suite à la lésion d'une zone précise du cortex visuel (aire V4). En revanche, les formes, leur position dans le champ visuel, sont bien perçues.

Le **document 2** permet de localiser cette aire visuelle ainsi qu'une seconde aire, cette fois associée à la perception des mouvements. La comparaison de ces images d'exploration fonctionnelle permet de se rendre compte qu'il existe des zones différentes pour traiter deux aspects d'une scène observée, ces deux aires étant situées dans des endroits distincts du cortex visuel. Conformément au programme, il ne s'agit pas ici d'entrer dans une description anatomique du cerveau pour localiser précisément ces aires visuelles. Elles sont citées ici uniquement pour donner l'idée d'un traitement séparé des informations visuelles.

Le **document 3**, par l'étude d'un second cas clinique, montre l'existence d'une troisième zone spécialisée cette fois dans le traitement des informations relatives aux formes présentes dans une image. En effet, ici la couleur et le mouvement n'interviennent pas : le sujet est incapable de reconnaître les objets à leur seule forme. Dans leur vécu quotidien, les sujets atteints de tels troubles utilisent souvent uniquement la couleur pour identifier les objets, ce qui conduit, inévitablement, à de nombreuses erreurs.

Cette présentation est nécessairement schématique : la réalité est beaucoup plus complexe, plusieurs aires visuelles secondaires pouvant être impliquées dans la vision des couleurs par exemple.

Le **document 4** réalise la synthèse des informations tirées des documents 1, 2 et 3 : trois zones corticales spécialisées traitent chacune une partie des informations de l'image, et l'intégration de ces traitements permet une perception visuelle unique, qui est donc bien une activité cérébrale complète.

Cette activité cérébrale se fait de façon différente d'un individu à l'autre : dans le cas d'une illusion d'« optique » de type image ambiguë, comme celle présentée dans le **document 5**, la même image (et donc la même stimulation rétinienne) ne produit pas la même perception. Chacun intègre dans la perception visuelle des informations qui lui sont propres et qui ne sont pas nécessairement les mêmes d'un individu à un autre.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** Le tableau de Mondrian est caractérisé par sa richesse en couleurs : sa vision « active » l'aire V4 (document 2) tandis qu'une lésion de cette même aire cérébrale se traduit par un déficit de la vision des couleurs du tableau (les autres caractéristiques de la vision comme la forme ou la disposition spatiale n'étant pas affectées). On peut donc penser que V4 est responsable de la vision des couleurs. Le second tableau (document 2B) suggère le mouvement et active l'aire V5. On peut penser que cette aire permet la vision des mouvements.

**Doc. 3 :** L'aire V3 intervient dans la perception des formes. En effet, les patients qui présentent des lésions dans cette zone cérébrale sont incapables de reconnaître la forme d'un modèle parmi un ensemble de propositions, et se fondent surtout sur la couleur des objets pour les reconnaître.

**Doc. 1 à 4 :** Quand un individu voit une scène, les messages nerveux issus de la rétine arrivent dans la région occipitale du cerveau et activent simultanément plusieurs aires spécialisées. L'aire V3 assure la perception des formes, l'aire V4 celle des couleurs et l'aire V5 celle des mouvements. L'ensemble de ces informations permet de reconnaître l'ensemble des éléments de la scène, aboutissant ainsi à une perception unique, intégrant les différentes informations parvenant au cortex visuel.

**Doc. 5 :** « Illusion d'optique » n'est pas une expression adaptée ici. Il s'agit plutôt d'une « illusion cérébrale », puisque c'est le cerveau qui interprète de façon différente les mêmes informations visuelles pour construire les images des deux portraits. C'est finalement le cerveau qui donnera à chacun la perception visuelle de l'image observée. Autres exemples : l'image proposée en ouverture de chapitre (page 324) donne l'illusion d'un mouvement. Alors que les formes sont bien évidemment parfaitement statiques, le cerveau « ajoute » l'impression de mouvement du fait de la forme en spirale de cet ensemble. De nombreux autres exemples peuvent être trouvés : voir « Ressources complémentaires » ci-dessous.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Après son arrivée au cortex visuel, le message nerveux visuel est traité par plusieurs aires cérébrales spécialisées dans la perception des formes, des couleurs, des mouvements. L'ensemble est ensuite intégré en une perception visuelle unifiée.

## 3. Ressources complémentaires

- **Manuel numérique Bordas** : fiche documentaire « L'IRM (bases physiques) ».
- **Logiciel de visualisation des données de neuroimagerie EduAnatomist** :  
[http://acces.inrp.fr/acces/ressources/neurosciences/Banquedonnees\\_logicielneuroimagerie/eduanatomisi](http://acces.inrp.fr/acces/ressources/neurosciences/Banquedonnees_logicielneuroimagerie/eduanatomisi)

- **Banque de données de neuroimagerie :**  
[http://acces.inrp.fr/acces/ressources/neurosciences/Banquedonnees\\_logicielneuroimagerie/test-architecture-neuropeda/architecture-de-la-banque-de-donnees-neuropeda-1/architecture-de-la-banque-de-donnees-neuropeda](http://acces.inrp.fr/acces/ressources/neurosciences/Banquedonnees_logicielneuroimagerie/test-architecture-neuropeda/architecture-de-la-banque-de-donnees-neuropeda-1/architecture-de-la-banque-de-donnees-neuropeda)
- **Données de neuroimagerie sur la vision des couleurs et les aires associées :**  
[http://acces.inrp.fr/acces/ressources/neurosciences/Banquedonnees\\_logicielneuroimagerie/test-architecture-neuropeda/fiches-pedagogiques/1-irm/1-3-imagerie-fonctionnelle/1-3-1-sensibilite-motricite/1-3-1-3-vision/1-3-1-3-3-vision-des-couleurs/1-3-1-3-3-vision-des-couleurs](http://acces.inrp.fr/acces/ressources/neurosciences/Banquedonnees_logicielneuroimagerie/test-architecture-neuropeda/fiches-pedagogiques/1-irm/1-3-imagerie-fonctionnelle/1-3-1-sensibilite-motricite/1-3-1-3-vision/1-3-1-3-3-vision-des-couleurs/1-3-1-3-3-vision-des-couleurs)
- **Données de neuroimagerie sur la vision des mouvements et les aires associées :**  
[http://acces.inrp.fr/acces/ressources/neurosciences/Banquedonnees\\_logicielneuroimagerie/test-architecture-neuropeda/fiches-pedagogiques/1-irm/1-3-imagerie-fonctionnelle/1-3-1-sensibilite-motricite/1-3-1-3-vision/1-3-1-3-2-vision-des-mouvements/1-3-1-3-2-vision-des-mouvements](http://acces.inrp.fr/acces/ressources/neurosciences/Banquedonnees_logicielneuroimagerie/test-architecture-neuropeda/fiches-pedagogiques/1-irm/1-3-imagerie-fonctionnelle/1-3-1-sensibilite-motricite/1-3-1-3-vision/1-3-1-3-2-vision-des-mouvements/1-3-1-3-2-vision-des-mouvements)
- **Le cerveau à tous les niveaux : la vision :**  
[http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d\\_02/d\\_02\\_cr/d\\_02\\_cr\\_vis/d\\_02\\_cr\\_vis.html](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_02/d_02_cr/d_02_cr_vis/d_02_cr_vis.html)
- **Les illusions d'optique :**  
<http://ophtasurf.free.fr/illusions.htm>

## Des substances qui perturbent la vision (p. 328-329)

Connaissances	Capacités et attitudes
Des substances comme le LSD perturbent le fonctionnement des aires cérébrales associées à la vision et provoquent des hallucinations qui peuvent dériver vers des perturbations cérébrales graves et définitives.	Interpréter des observations médicales et/ou des imageries cérébrales chez l'Homme.

### 1. Les intentions pédagogiques

À ce stade, les élèves ont bien compris que la vision est bien plus qu'un phénomène optique puisque la perception visuelle nécessite la genèse, le transfert et le traitement d'un message nerveux. L'objet de cette activité est de montrer que la chimie intervient dans ce processus et donc de comprendre comment des substances chimiques peuvent perturber la vision.

Cette activité se prête bien à une démarche d'investigation : le **document 1** permet d'établir le constat que des substances chimiques, parfaitement connues, peuvent générer des hallucinations visuelles. Conformément au programme, l'exemple du LSD est présenté : son origine et ses effets sont précisés. On trouvera, page 337, des informations complémentaires et une ouverture intéressante sur l'histoire des arts et l'histoire des sciences (« Mal des ardents » et peinture, histoire du LSD, etc.). L'étude du modèle moléculaire du LSD est nécessaire car elle sera exploitée par la suite pour comprendre l'origine possible des hallucinations engendrées par cette substance. L'exemple de la kétamine et de la psilocybine sont donnés pour ne pas restreindre le champ des hallucinogènes au seul LSD. Enfin, l'encadré permet de développer le volet « éducation à la santé », indispensable au cours de cette étude : en effet, il faut bien faire comprendre que toutes ces substances ont des conséquences délétères qui vont bien au-delà de leur simple effet hallucinogène.

Après avoir constaté que des substances chimiques telles que le LSD peuvent perturber la perception visuelle, on s'intéresse naturellement au mécanisme susceptible d'expliquer cet effet. Le **document 2** fournit les connaissances indispensables pour émettre des hypothèses explicatives. L'objectif essentiel est de montrer que des substances chimiques (les neurotransmetteurs) jouent un rôle primordial dans la transmission du message nerveux au niveau des synapses. Une approche concrète peut être réalisée par un examen attentif des électronographies. À noter que la qualité des documents permet de mener une réelle investigation : par exemple, la vue de détail montre parfaitement l'exocytose des vésicules synaptiques (le terme n'est pas à connaître, mais le phénomène permet de comprendre comment une substance chimique peut être déversée au contact du neurone postsynaptique).

Le **document 3** permet de prouver que ces substances (en l'occurrence la psilocybine) activent effectivement les récepteurs à la sérotonine. Ce document permet également de souligner les rôles variés attribués à la sérotonine (voir les précisions données en lexique) et montre la grande répartition de ces récepteurs dans le cerveau. Il convient donc de ne pas en rester à une vision trop simpliste de l'hallucination et de comprendre que les perturbations engendrées par la consommation d'une substance peuvent aller bien au-delà de la simple hallucination visuelle.

À l'issue de cette étude, on pourra utiliser le schéma bilan (et sa version animée proposée dans le manuel numérique) pour visualiser l'ensemble de ces mécanismes.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 :** La kétamine modifie la perception visuelle de l'environnement puisque les formes apparaissent « courbées, distordues », comme l'illustre bien la photographie. Le LSD a quant à lui un effet hallucinogène : en effet, il génère une perception visuelle (visions colorées) qui ne correspond pas à une stimulation de la rétine des yeux par de la lumière. Ces substances ont une action beaucoup plus profonde sur le fonctionnement cérébral : hallucinations en tous genres (visuelles et auditives), modification de l'état de conscience, troubles psychiques.

**Doc. 2 :** La transmission du message nerveux au niveau d'une synapse est chimique car la fente synaptique est un espace dans lequel les signaux électriques ne se propagent pas. À ce niveau, c'est la libération d'une substance chimique, le neurotransmetteur, qui permet la transmission du message.

**Doc. 3 :** Cette étude montre que la psilocybine peut se fixer sur les récepteurs à sérotonine du cerveau, puisque ceux-ci sont plus activés en présence de cette drogue.

**Doc. 1 à 3 :** La comparaison des modèles moléculaires montre que le LSD possède une similitude de forme tridimensionnelle avec la sérotonine, qui est un neurotransmetteur cérébral intervenant notamment dans la perception sensorielle. Le LSD est donc capable de se fixer (comme la psilocybine) sur les récepteurs synaptiques de la sérotonine. On peut penser que la fixation du LSD génère des messages nerveux transmis au cortex visuel, messages qui ne correspondent pas à des stimulations visuelles réelles, ce qui explique les hallucinations visuelles. La sérotonine étant un neurotransmetteur très répandu dans d'autres zones du cerveau, ceci explique les perturbations autres que visuelles.

### Synthèse : réponse au problème à résoudre

Des substances chimiques peuvent perturber la perception visuelle car leur similitude de forme avec certains neurotransmetteurs cérébraux leur permet de se fixer sur les récepteurs de ces neurotransmetteurs, au niveau de synapses impliquées dans la transmission ou le traitement du message nerveux visuel. La perception visuelle est alors altérée.

## 3. Ressources complémentaires

### ■ Manuel numérique Bordas :

- vidéo permettant une visualisation et une comparaison des modèles moléculaires de la sérotonine, du LSD, de la psilocybine et de l'ecstasy ;
- animation du schéma bilan (page 335) montrant comment des substances exogènes peuvent perturber la transmission chimique du message nerveux au niveau d'une synapse ;
- fiche documentaire « Drogue, un danger pour soi et pour les autres ».

### ■ Site ressources Bordas : modèles moléculaires (fichiers « pdb ») du LSD et de la sérotonine.

## Apprentissage et plasticité cérébrale (p. 330-331)

Connaissances	Capacités et attitudes
<p>La mise en place du phénotype fonctionnel du système cérébral impliqué dans la vision repose sur des structures cérébrales innées, issues de l'évolution et sur la plasticité cérébrale au cours de l'histoire personnelle.</p> <p>De même la mémoire nécessaire par exemple à la reconnaissance d'un visage ou d'un mot repose sur la plasticité du cerveau.</p> <p>L'apprentissage repose sur la plasticité cérébrale. Il nécessite la sollicitation répétée des mêmes circuits neuroniques.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recenser, extraire et organiser des informations pour comprendre le phénomène de plasticité cérébrale et son importance dans l'établissement de différentes fonctions cognitives.</li> <li>- Interpréter des expériences sur la maturation du cortex visuel chez l'animal.</li> <li>- Interpréter des observations médicales et/ou des imageries cérébrales chez l'Homme.</li> </ul>

### 1. Les intentions pédagogiques

En s'appuyant sur l'exemple de la construction du « phénotype impliqué dans la vision », il s'agit de montrer que le fonctionnement cérébral n'est pas figé dès la naissance. Au contraire, il se construit progressivement au gré des expériences vécues et peut même subir d'importants remaniements, y compris chez l'adulte. On montre ainsi l'étonnante faculté de « plasticité » du fonctionnement cérébral. C'est aussi l'occasion de revenir sur les relations entre génotype et phénotype : la vision du monde requiert bien entendu des structures biologiques innées, caractéristiques de l'espèce, et résultant de l'évolution, mais s'élabore en interaction avec l'environnement pour finalement constituer un phénotype visuel propre à chaque individu.

Cette double page propose une sélection de documents scientifiques dont l'exploitation permet de fonder très concrètement ces notions, qui peuvent paraître au premier abord difficiles à appréhender.

Le **document 1** est destiné à montrer l'existence d'une organisation fonctionnelle du système visuel, de l'œil au cortex visuel, que l'on retrouve dès la naissance chez tous les primates. On montre ainsi l'importance de l'**« inné »**, c'est-à-dire des structures biologiques complexes, résultat de l'évolution, et qui sont évidemment indispensables à la fonction visuelle.

Dans cette technique très particulière, les acides aminés injectés (en général de la proline) sont incorporés dans des protéines dont certaines sont transportées jusqu'à l'extrémité des neurones où elles sont impliquées dans le fonctionnement synaptique. Une fraction de ces protéines est libérée dans l'espace synaptique, dégradée en acides aminés dont certains sont absorbés par le neurone postsynaptique. Grâce à ce transport transneuronal d'acides aminés marqués, on peut visualiser les circuits neuronaux correspondant à l'un des deux yeux. Cette expérience révèle donc bien l'existence de circuits neuronaux actifs dès la naissance, de la rétine jusqu'au cortex visuel. À noter que l'organisation du cortex visuel est très particulière (il s'agit ici d'une coupe réalisée dans le plan du cortex, comme s'il était vu du dessus) : chez le macaque, les domaines correspondant à chacun des deux yeux forment des bandes alternées de 0,5 mm environ qui occupent des surfaces à peu près égales au moment de la naissance (l'observation de l'autoradiographie est réalisée avec éclairage sur fond noir de telle sorte que les grains d'argent apparaissent en clair).

L'expérience présentée par le **document 2** montre que cette fonctionnalité innée peut être modifiée par l'expérience individuelle précoce : on met donc ici en évidence l'importance de l'« acquis ».

Le texte et les schémas associés doivent être bien étudiés afin de comprendre le protocole de ces expériences : notamment, il convient de bien distinguer la période pendant laquelle le chaton est privé de vue et le moment où l'étude des neurones est réalisée (âge adulte). Dans la deuxième expérience, on constate (sans l'expliquer) la diminution globale de l'activité des neurones due à la longue période de privation monosensorielle, mais il faudra surtout attirer l'attention sur le fait qu'il n'y a, dans ce cas, pas ou peu d'impact sur la répartition des neurones actifs (contrairement à la première expérience).

La seconde partie de l'activité illustre la plasticité cérébrale, y compris chez l'adulte, à partir de l'exemple de la lecture en Braille.

Le **document 3** met en évidence le changement possible de fonction des aires corticales associées à la vision chez les non-voyants. Celles-ci sont en effet sollicitées pour la lecture des mots écrits en Braille, c'est-à-dire perçus par l'intermédiaire du sens du toucher. Une sorte de « reprogrammation » des neurones des aires visuelles leur permet d'être utilisés pour une tâche différente, du fait de l'absence de stimulations visuelles reçues par le non-voyant. On pourra y associer le cas étonnant de la « vision avec la langue » présenté à la page 336 (« Des clés pour... aller plus loin »).

L'expérience récente relatée par le **document 4** montre que cette « reprogrammation » peut avoir lieu chez une personne voyante s'entraînant à lire le Braille dans les conditions d'un non-voyant (sans stimulation visuelle). L'intérêt de cette expérience est de démontrer que cette évolution peut se produire très rapidement et de façon transitoire. Une plasticité cérébrale à court terme est ainsi mise en évidence. Elle ne peut donc reposer sur une restructuration anatomique du cerveau mais plutôt sur l'activation de circuits neuronaux déjà existants.

## 2. Les pistes d'exploitation

### Informations déduites de l'analyse des documents

**Doc. 1 et 2 :** La photographie révèle l'existence de bandes claires qui prouvent que les acides aminés radioactifs ont été transportés depuis la rétine de l'œil droit jusqu'au cortex visuel. Ceci montre donc bien l'existence d'un circuit neuronal biologiquement actif, depuis la rétine jusqu'au cortex visuel. On peut noter que la surface du cortex correspondant à chacun des deux yeux est équivalente.

**Doc. 2 :** L'expérience réalisée chez le jeune chaton montre qu'après réouverture de l'œil occlus (et même longtemps après cette réouverture, à l'âge adulte), les neurones correspondant à l'œil qui a été privé de stimulation ne sont plus actifs. Ainsi, si l'œil n'exerce pas sa fonction visuelle, les neurones qui lui correspondent perdent définitivement leur fonctionnalité. Il n'en va pas de même chez le chat adulte.

C'est la raison pour laquelle une cataracte chez le jeune doit être impérativement opérée. Si ce n'est pas le cas, la perte de fonctionnalité du système nerveux visuel correspondant à l'œil malade risque d'être définitive, rendant inutile une opération tardive.

**Doc. 3 :** Les aires visuelles du patient non-voyant sont actives lorsqu'il lit du Braille, ce qui n'est pas le cas pour une personne voyante. Cela signifie que les neurones de cette partie occipitale du cerveau ont changé de fonction : au lieu de traiter les messages nerveux venant de la rétine, ils traitent maintenant ceux qui proviennent des récepteurs tactiles des doigts.

**Doc. 3 et 4 :** Le document 3 montre que les neurones peuvent changer de fonction (être « reprogrammés »), et le document 4 confirme ce fait puisque les personnes voyantes entraînées à lire le Braille les yeux bandés voient temporairement certains de leurs neurones normalement impliqués dans la vision se mettre à traiter des informations tactiles. Les aires cérébrales n’ont donc pas une spécialisation stricte et définitive, leur fonction dépend des stimulations sensorielles reçues. C’est la plasticité cérébrale.

### **Synthèse : réponse au problème à résoudre**

Le fonctionnement cérébral impliqué dans la perception visuelle repose sur des structures innées, fonctionnelles dès la naissance. Cependant, il nécessite aussi que la fonction visuelle soit exercée, notamment au plus jeune âge : le phénotype visuel se construit donc également grâce à l’expérience individuelle. La spécialisation et le fonctionnement des territoires cérébraux ne sont pas figés mais peuvent subir des remaniements, y compris chez l’adulte.

## **3. Ressources complémentaires**

- **Manuel numérique Bordas :** fiche documentaire « Notre œil voit d’abord en gros ».

La correction des exercices « **Tester ses connaissances** » figure dans le manuel de l’élève, page 353.

### 6 | Le cerveau se réorganise sans cesse

D’après cette étude, l’apprentissage de la lecture reposeraient sur le phénomène de plasticité cérébrale. En effet, il n’existerait pas dès la naissance une aire cérébrale dont le rôle serait prédéterminé pour la lecture : chez les personnes illettrées, cette zone est utilisée pour la reconnaissance des visages. La zone de reconnaissance des mots, que l’on trouve chez les personnes sachant lire, se formerait par reconversion d’une partie de la zone initialement dévolue à la reconnaissance des visages. Elle est plus importante si la personne sait bien lire. Cette reconversion, qui témoigne de la plasticité du cerveau, est possible chez l’adulte comme pendant l’enfance.