

collection Lycée
série Accompagnement des programmes

Sciences de la vie et de la Terre

classe terminale scientifique

Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation nationale et de la Recherche
Direction de l'enseignement scolaire

applicable à la rentrée 2002

Centre national de documentation pédagogique

Ce document a été rédigé par le groupe d'experts sur les programmes de Sciences de la vie et de la Terre :

Président

Bernard CALVINO professeur des universités, ESPCI, Paris

Membres

Jean-Paul DUBACO maître de conférences, ENS, Paris

Philippe GILLET professeur des universités, ENS, Lyon

Roger PRAT professeur des universités, Paris VI

Marc TARDY professeur des universités, université de Savoie, Le Bourget-du-Lac

Gérard VIDAL maître de conférences, ENS, Lyon

Rosine BOYADJIAN professeur, lycée Victor-Hugo, Paris

Raymond CIRIO professeur, lycée climatique d'altitude, Briançon

Colette PORTHA-PONCEBLANC professeur, lycée Paul-Valéry, Paris

Béatrice SALVIAT professeur, lycée Louis-le-Grand, Paris

Marie-Claude YON-COTTON professeur, lycée François-1^{er}, Vitry-le-François

Bernard GISSOT IA-IPR, académie de Créteil

Jean-Claude HERVÉ IA-IPR honoraire

Dominique ROJAT inspecteur général de l'Éducation nationale

Coordination : Anne-Laure Monnier, bureau du contenu des enseignements (direction de l'enseignement scolaire).

Suivi éditorial : Christianne Berthet

Secrétariat d'édition : El Houssine Djennad et Nicolas Gouny

Maquette de couverture : Catherine Villoutreix

Maquette : Fabien Biglione

Mise en pages : Michelle Bourgeois

© CNDP, juin 2002

ISBN : 2-240-00786-9

ISSN : 1624-5393

Sommaire

Introduction	5
---------------------------	---

Enseignement obligatoire

Approche du temps en biologie et en géologie	9
---	---

Parenté entre êtres vivants actuels et fossiles – Phylogénèse – Évolution	11
--	----

La recherche de parenté chez les vertébrés – l'établissement de phylogénies	11
---	----

La lignée humaine – la place de l'Homme dans le règne animal	12
--	----

Les critères d'appartenance à la lignée humaine	12
---	----

Le caractère buissonnant de la lignée humaine	13
---	----

L'origine des hommes modernes, Homo sapiens	13
---	----

Stabilité et variabilité des génomes et évolution	14
--	----

L'apport de l'étude des génomes – les innovations génétiques	14
--	----

Méiose et fécondation participent à la stabilité de l'espèce	14
--	----

Méiose et fécondation sont à l'origine du brassage génétique	15
--	----

Étude de trois exemples de relation entre mécanismes de l'évolution et génétique	15
--	----

La mesure du temps dans l'histoire de la Terre et de la vie	17
--	----

Datation relative	17
-------------------------	----

Datation absolue	18
------------------------	----

La convergence litosphérique et ses effets	21
---	----

Convergence et subduction	21
---------------------------------	----

Convergence litosphérique et collision continentale	23
---	----

Annexe	23
--------------	----

Procréation	28
--------------------------	----

Du sexe génétique au sexe phénotypique	28
--	----

Régulation physiologique de l'axe gonadotrope – intervention de trois niveaux de contrôle	29
---	----

Rencontre des gamètes et début de grossesse	30
---	----

Aspect comportemental	30
-----------------------------	----

Maîtrise de la procréation	30
----------------------------------	----

Immunologie	32
Une maladie qui touche le système immunitaire – le SIDA	32
Les processus immunitaires mis en jeu – généralisation	32
Les vaccins et la mémoire immunitaire	33
Couplage des événements biologiques et géologiques au cours du temps	34
La limite Crétacé-Tertiaire – un événement géologique et biologique majeur	34
Les crises biologiques, repères dans l'histoire de la Terre	34

Enseignement de spécialité

Thème 1. Du passé géologique à l'évolution future de la planète	39
Les climats passés de la planète	39
Les variations du niveau de la mer	41
Annexe – Les isotopes stables de l'oxygène, marqueurs des variations climatiques et du niveau de la mer	42
Thème 2. Des débuts de la génétique aux enjeux actuels des biotechnologies	50
Les débuts de la génétique – les travaux de Mendel (1870)	50
La théorie chromosomique de l'hérédité	51
L'avènement de la biologie moléculaire – une nouvelle rupture	51
La révolution technologique du début des années 1970	51
Les enjeux actuels des biotechnologies	52
Thème 3. Diversité et complémentarité des métabolismes	53
Présentation de l'écosystème	53
L'autotrophie	54
Des métabolismes au mouvement – l'importance de l'ATP	55
Respiration et fermentation, sources d'ATP	55

Introduction

Conformément aux objectifs généraux de l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre, le programme de terminale scientifique se propose à la fois de développer l'apprentissage des savoirs scientifiques fondamentaux et de former l'esprit du futur citoyen, qu'il poursuive ensuite ou non des études scientifiques.

En ce qui concerne le contenu scientifique, l'objectif est de s'en tenir aux connaissances les plus fondamentales. Les données de base doivent être solidement mises en place, formant ainsi le socle sur lequel se construiront des études supérieures scientifiques ou, simplement, la trame d'une culture scientifique de l'homme moderne. Le parti est donc systématiquement pris de privilégier le qualitatif sur le quantitatif : si de nombreuses têtes de chapitres structurent le programme dans chaque partie, les documents d'accompagnement insistent sur la modestie des approfondissements attendus. On peut construire une image contemporaine du savoir scientifique sans en passer par l'exhaustivité des nouveautés.

Les objectifs cognitifs définis étant clairement délimités, il devient possible de s'attacher à la démarche pédagogique. Le travail qualitatif passe, aussi souvent que possible, par la mise en œuvre d'une démarche réflexive, dans laquelle l'élève n'est pas le simple spectateur – ou consommateur – de sa formation, mais un véritable acteur. Il participe à la construction de son savoir en même temps qu'à la formation de son esprit en s'impliquant aussi bien dans l'énoncé de la question que dans la recherche de la réponse. En continuité directe avec les évolutions de la didactique de la discipline des dernières années, l'élève est ainsi mis dans une situation de recherche (fondement de la démarche « par problème ») dont le but n'est pas de mimer la véritable recherche scientifique, ni de prétendre faire redémontrer en quelques minutes ce que plusieurs générations de chercheurs ont peiné à découvrir, mais simplement de faire comprendre ce qu'est cette démarche scientifique, faite de doute et d'imagination, d'habileté intellectuelle et manuelle, qui permet à la science de se construire par l'incessante confrontation des faits et des idées.

Cette confrontation des idées et des faits passe le plus souvent par une approche pratique : mise en œuvre de techniques appropriées d'observation, d'analyse, de description, de compte rendu ; conception, réalisation de protocoles expérimentaux ; analyse et critique des résultats. La science contemporaine fait souvent appel à des techniques hélas difficiles à mettre en œuvre au lycée, mais on recherchera toutes les occasions de faire appel à une démarche concrète. Les sciences de la vie et de la Terre doivent permettre l'exercice coordonné de l'intelligence de l'esprit et de l'intelligence de la main. Elles donnent ainsi l'occasion aux élèves de mettre en valeur des qualités parfois délaissées dans d'autres domaines de l'enseignement.

Au cours de l'année, professeurs et élèves abordent les différents aspects du programme en organisant leur argumentation à partir d'exemples concrets, et aboutissent ainsi à la mise en place des notions et concepts attendus. La manipulation argumentée des exemples forme l'esprit et justifie l'état actuel de la science : ces exemples n'ont pas à être mémorisés en tant que tels, mais l'élève doit avoir appris à utiliser les faits qu'on lui fournit. L'état actuel des théories présentées, les notions, les concepts, doivent être retenus.

Enseignement obligatoire



Approche du temps

en biologie et géologie

■ 1/2 semaine.

Sciences de la vie et sciences de la Terre.

Il est naturellement d'usage, pour le professeur, d'introduire son année en cherchant à capter l'attention de ses élèves, en éveillant leur intérêt, en suscitant chez eux une appétence pour le travail en sciences de la vie et de la Terre. Cette première partie a précisément cet objectif. Elle est assortie d'un horaire certes modeste, mais néanmoins significatif, ce qui donne au professeur le temps de cette introduction, sans qu'il ait à empiéter sur celui imparti au traitement du programme lui-même.

Par ailleurs, il est opportun de signifier les liens entre sciences de la vie et sciences de la Terre en associant des thèmes de chaque sous-ensemble au sein d'une même introduction dont le dénominateur commun (stabilité et variabilité au cours du temps) doit apparaître, conformément au fil conducteur du programme.

Il n'est pas question d'imposer une façon d'entrer dans le programme. Le professeur choisira sa manière de procéder en tenant compte de son intérêt personnel, des ressources de l'établissement, du goût et des capacités de ses élèves, mais aussi des choix de l'équipe pédagogique de l'établissement et de la façon dont ont été traités les programmes des classes antérieures. Il s'agit en effet de faire sentir, dès le début de l'année, en quoi le programme de terminale prolonge, précise et complète la formation menée tout au long de la scolarité qui se termine avec cette classe.

L'objectif de cette partie n'est pas d'apporter des connaissances, mais de poser une problématique générale, de lancer un questionnement. Le nombre des questions que l'on pourrait se poser est immense et on ne saurait chercher à les énumérer devant les élèves. Le choix réalisé devra viser l'exemplarité et l'efficacité aux dépens de l'exhaustivité.

Si le texte officiel n'impose aucun contenu spécifique à acquérir au cours de cette partie, il est évidemment possible de choisir une façon d'entrer dans le programme qui permettra, au passage,

d'introduire une notion exigible figurant dans l'une des parties suivantes.

Sur le plan méthodologique, cette partie pourra utiliser le savoir-faire acquis par les élèves en TPE, notamment dans le domaine de la pratique documentaire, dans l'usage des TICE, etc.

Quelques activités possibles sont proposées ci-dessous : ce n'est en rien une liste exhaustive, et encore moins une liste d'activités qui devraient être toutes réalisées. Il s'agit simplement de suggérer quelques idées et, surtout, de faire comprendre dans quel esprit ce travail est conçu.

Recherche documentaire sur la frise du temps

Les élèves sont invités à rechercher dans les programmes des classes antérieures, dans des encyclopédies classiques ou numériques, sur Internet, des événements majeurs de l'histoire de la Terre, leur date, leur durée (une liste indicative de ces événements est donnée dans le programme).

À partir de cette présentation, une rapide analyse critique conduit à des interrogations telles que :

- Comment les événements présentés ont-ils pu être datés ?
- Quelles en sont les durées ?
- Quel est le degré de fiabilité de la connaissance que nous avons de ces événements ?
- Quel intérêt scientifique y a-t-il à dater des événements et à en apprécier la durée ?
- Etc.

Étude critique d'une frise du temps

Au lieu de mobiliser les élèves pour la construction de la frise du temps, on peut la leur fournir, et faire alors porter l'essentiel de l'effort sur le questionnement critique. Le travail peut être collectif et coopératif.

Réflexions sur l'apparition de l'Homme

À propos de quelques documents sur l'histoire humaine convenablement choisis, on s'interroge sur la signification de l'événement « apparition de l'Homme » :

- S'agit-il d'un événement isolé ?
- Peut-on définir clairement son début, sa fin, sa durée ?
- Peut-on savoir où il s'est produit ? Comment ? Quand ?
- Etc.

Réflexions sur une chaîne de montagne

À partir d'une recherche documentaire, on présente un scénario de constitution et de destruction d'une chaîne de montagne. On réfléchit alors sur l'échelle de temps propre à ce type de phénomène géologique et les difficultés de datation et de mesure de durée que cela pose.

Réflexion sur les phénomènes cellulaires

À partir de ce qui a été étudié dans les classes antérieures, on réfléchit sur la durée des phénomènes biologiques à cette échelle d'organisation :

- Durée de vie d'une cellule (et difficulté d'en fixer le début et la fin).
- Durée d'existence d'une molécule (protéine par exemple).
- Durée de présence d'un élément chimique dans la cellule.
- Durée d'une division cellulaire.

On réfléchit sur les outils nécessaires à l'appréciation de ces durées, on les compare avec ceux qui apprécient des durées plus grandes (géologiques par exemple).

Réflexions sur les durées

Les élèves sont invités à faire une recherche documentaire sur les durées d'objets (ou de mécanismes) géologiques et biologiques. Ils en présentent quelques-uns et les classent selon leur durée. Une réflexion critique est lancée à propos de la comparaison avec l'échelle de temps humaine, le choix des outils appropriés pour la détermination de durées de différents ordres de grandeur, la fiabilité des résultats, etc.

P

arenté entre êtres vivants actuels et fossiles – Phylogenèse – Évolution

■ 3 semaines.

Sciences de la vie et sciences de la Terre.

En classe de seconde, l'objectif général du thème « Cellule, ADN et unité du vivant » était de dégager la notion d'origine commune des espèces vivantes, confortant l'idée d'évolution déjà introduite au collège. Des études portant sur différents niveaux d'organisation – cellule, molécule et organisme – ont permis d'établir que les similitudes anatomiques des vertébrés s'inscrivent dans un plan d'organisation commun mis en place suivant un programme génétiquement déterminé.

En classe de première scientifique, la relation entre gènes et protéines a été approfondie. L'universalité des modalités d'expression des gènes et du code génétique a été soulignée, renforçant ainsi l'idée d'origine commune des êtres vivants.

En classe terminale scientifique, on cherche à établir des relations de parenté plus précises au sein des vertébrés actuels et fossiles. La place de l'Homme dans le règne animal et l'état actuel des idées sur l'évolution de la lignée humaine sont étudiés.

Alors que les phénomènes qui se déroulent à l'échelle d'un individu durent de quelques fractions de secondes (certaines réactions métaboliques) à quelques mois ou années (développement embryonnaire, croissance...), les phénomènes liés à l'évolution des espèces se conçoivent sur des échelles de temps plus indéterminées, avec des périodes de stabilité et des périodes de crise.

Cette partie du programme se prête particulièrement à des prolongements pluridisciplinaires en lien avec d'autres enseignements (éducation civique, juridique et sociale, enseignement de philosophie...).

La recherche de parenté chez les vertébrés – l'établissement de phylogénies

Depuis une trentaine d'années, la systématique phylogénétique a modifié les classifications biologiques traditionnelles. Il convient d'aller à l'encontre d'un

certain nombre d'idées fausses (vision linéaire de l'évolution, finalisme et anthropocentrisme conduisant à décrire l'évolution biologique comme une série de perfectionnements aboutissant à l'Homme, persistance du concept de « fossile vivant »...).

Il est important également de veiller à une bonne compréhension du vocabulaire scientifique : « ancêtre commun », « chaînon manquant », « lien de parenté », etc. En effet, si on n'y prêtait pas garde, la confusion entre un vocabulaire courant (ancêtre, parenté...) et un vocabulaire spécialisé risquerait d'aboutir au placage naïf d'une généalogie – au sens propre – sur une phylogénie.

La construction d'une phylogénie a pour but de reconstituer une histoire évolutive. La notion d'ancêtre commun est essentielle pour comprendre un arbre phylogénétique. Elle s'appuie sur l'idée que les caractères communs possédés par un groupe d'espèces sont hérités d'une population ancestrale commune. La notion d'ancêtre commun centrée sur l'idée de transmission héréditaire de caractères au fil des générations peut être abordée à partir des acquis de la seconde :

– ancêtre commun à tous les êtres vivants reposant sur l'idée que les propriétés communes à toutes les cellules sont un héritage des premiers organismes apparus sur Terre ;

– ancêtre commun exclusif d'un groupe d'êtres vivants, par exemple : plus récent ancêtre commun propre aux vertébrés, ayant le plan d'organisation partagé par tous. L'ensemble forme un groupe monophylétique.

On se limite à signaler que la classification traditionnelle ne contient pas seulement des groupes monophylétiques (ex. : les reptiles).

L'établissement de phylogénies chez les vertébrés est la conséquence de la recherche de parentés entre eux. À partir de cela, on peut dégager l'idée que les espèces sont plus ou moins apparentées en fonction de l'éloignement de leur plus récent ancêtre commun dans l'histoire de la vie, et en établir la traduction par un arbre phylogénétique.

La démarche suivie doit conduire les élèves à extraire les informations fournies par un arbre phylogénétique, c'est-à-dire :

- indiquer, de façon purement qualitative, le degré relatif de parenté des divers groupes systématiques (espèces, genres...) retenus dans l'échantillon analysé ;
- exploiter les données fournies pour broser un portrait des caractéristiques du plus récent ancêtre commun à un ensemble d'organismes. Cela implique que le document fournisse les innovations évolutives prises en compte pour la réalisation de cet arbre.

Une activité possible consiste en la construction d'un arbre relatif aux seuls vertébrés à partir d'une matrice de caractères. Dans cette matrice, les états dérivés des caractères sont soulignés et tous les caractères pris en compte sont homologues (homologie de descendance). Cette construction est un outil de compréhension de la notion d'arbre phylogénétique. Avec des exemples tels que l'absence ou la présence d'amnios, l'absence ou la présence de doigts à l'extrémité des membres..., il est possible d'illustrer les notions d'« état primitif » et d'« état dérivé » d'un caractère. On indiquera sommairement à l'élève que cette construction d'un arbre phylogénétique ne permet que d'approcher la méthode utilisée par les chercheurs, méthode dont la mise en œuvre est beaucoup plus exigeante. Elle ne peut cependant pas faire l'objet d'un sujet au baccalauréat.

En ce qui concerne les données moléculaires, on ne considère pas chaque nucléotide ou chaque acide aminé comme un caractère. Au niveau du lycée, on peut admettre que la séquence du gène ou celle du polypeptide constitue le caractère. La forte ressemblance entre les molécules de deux ou plusieurs espèces souligne leur homologie : elles dérivent d'une molécule possédée par le plus récent ancêtre commun aux espèces envisagées. Le degré de similitude renseigne sur le degré de parenté : cela signifie qu'on admet en première approximation que, dans toutes les lignées, la vitesse d'évolution des molécules envisagées a été à peu près la même (horloge moléculaire). Au lycée, on n'utilise donc pas les méthodes de la cladistique pour établir les relations de parenté à partir des données moléculaires : on n'utilise pas les expressions « état primitif » et « état dérivé » d'un caractère pour les données moléculaires.

Outre le degré de similitude entre molécules homologues, la possession de gènes communs, partagés seulement par un ensemble de groupes systématiques, peut être utilisée pour proposer des relations de parenté.

Limites (ne sont pas exigibles)

- La construction d'arbres phylogénétiques.
- L'exploitation quantitative d'une matrice de données moléculaires.
- Les notions de convergence et de réversion.
- Les notions d'homologie primaire et d'homologie secondaire.

- La distinction entre groupe monophylétique, paraphylétique et polyphylétique.
- La présentation et la discussion de différentes théories de l'évolution.
- La notion d'extragroupe.
- Les critères qui permettent de qualifier un caractère de primitif ou de dérivé.

La lignée humaine – la place de l'Homme dans le règne animal

Une recherche des âges approximatifs des plus anciens fossiles connus dans chacune des catégories auxquelles l'Homme appartient, montre qu'elles sont apparues successivement au cours de l'évolution : un eucaryote (– 1200 MA ?), un vertébré (– 500 MA ?), un tétrapode (– 390 MA ?), un amniote (– 340 MA ?), un mammifère (– 220 MA ?), un primate (– 65 MA ?), un hominoïde (– 23 MA ?), un hominidé (– 10 MA ?), un homininé (– 4 MA ?).

On peut ainsi faire le lien avec la partie « La mesure du temps dans l'histoire de la Terre et de la vie » (p. 18) et la datation absolue.

Le lien entre relations de parenté et classification étant établi, l'exploitation de données – notamment moléculaires – sur les primates conduit à préciser la place de l'Homme dans le règne animal.

L'idée d'une parenté étroite entre le Chimpanzé et l'Homme étant dégagée, il importe d'utiliser les raisonnements précédemment vus pour reconstituer les caractéristiques de leur plus récent ancêtre commun, y compris sur le plan comportemental.

Limites (ne sont pas exigibles)

- La connaissance précise d'une classification des êtres vivants.

Les critères d'appartenance à la lignée humaine

On précise que les homininés actuels ne sont représentés que par une seule espèce, *Homo sapiens*, dont le bassin est élargi et court tandis qu'il est long et étroit chez les autres hominoïdes. D'autres critères sont signalés : le prémaxillaire présente un redressement vertical et l'arcade dentaire est parabolique.

Pour définir les critères d'appartenance à la lignée humaine on peut :

- comparer le Chimpanzé et l'Homme. Le danger est évidemment d'induire l'idée fautive que l'ancêtre commun à l'Homme et au Chimpanzé était un Chimpanzé ;

– les états dérivés des principaux caractères anatomiques de la lignée humaine étant reconnus, cela permet de comprendre pourquoi un spécialiste peut ranger tel os fossile ou telle mâchoire dans la lignée humaine.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *La connaissance de la diversité des industries humaines.*
- *Tout critère d'appartenance à la lignée humaine autre que ceux cités dans le programme.*

Le caractère buissonnant de la lignée humaine

On appelle « lignée humaine » toute l'histoire évolutive des hominins à partir du plus récent ancêtre commun à l'Homme et au Chimpanzé.

La cladistique a rendu caduque la recherche de l'« ancêtre commun ». Certes, toute espèce actuelle ou fossile a des ancêtres plus ou moins lointains. L'Homme et le Chimpanzé ne font pas exception à cette règle ; ils ont eu un ancêtre commun récemment (à l'échelle des temps géologiques). Cependant, dans la mesure où, comme le soulignait Darwin, les descendants sont forcément différents de leurs ancêtres (ceci est le sens même de l'évolution !), il n'y a pas de moyen d'identifier à coup sûr cet ancêtre sur des critères descriptifs parmi les fossiles retrouvés. Un arbre phylogénétique ne peut pas illustrer les processus évolutifs eux-mêmes car l'évolution n'est pas graduelle, mais fait intervenir des ruptures, des discontinuités.

De nombreuses interrogations sur la structure de la lignée humaine subsistent. Assigner un fossile à une espèce particulière est toujours sujet à caution, car en paléontologie l'espèce ne peut pas être soumise au critère d'interfécondité.

De plus, la découverte d'ossements et de traces d'activités est fragmentaire et dépend des aléas des fouilles et des hasards de la conservation de vestiges. La plupart des fossiles humains ne sont connus que par un crâne ou des fragments crâniens, calotte, mandibules et dents. Il a fallu attendre l'an 2000 pour que soit exhumé à Drimolen, en Afrique du Sud, le premier spécimen d'australopithèque dont le crâne était associé à une mandibule complète. La découverte d'un squelette entier âgé de plus de trois millions d'années comme celui de Lucy est exceptionnelle ; pourtant il n'était pas véritablement complet puisqu'il manquait le crâne.

Outre la prise de conscience du caractère buissonnant de l'évolution dans la lignée humaine, l'intérêt de l'étude d'arbres phylogénétiques relatifs à la lignée humaine est surtout de montrer le caractère révisable de ces arbres en fonction des fossiles nouvellement découverts. Ainsi, l'élève doit-il saisir qu'un arbre phylogénétique n'est pas une donnée à l'état brut, mais qu'il est toujours inféré à partir de données.

L'idée selon laquelle une espèce du genre *Australopithecus* aurait évolué en *Homo habilis*, évoluant à son tour en *Homo erectus* et finalement en *Homo sapiens* est donc beaucoup trop simple. Elle mérite d'être discutée en adoptant un point de vue critique. Il y a une probabilité très faible pour que Lucy ou d'autres australopithèques identifiées soient nos ancêtres.

Les débats et les incertitudes concernant l'identification et la classification des différents fossiles d'hominins sont encore très nombreux. Les élèves sont amenés à comprendre que la science n'est pas figée.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *La construction d'un arbre buissonnant.*
- *Les noms scientifiques des fossiles autres que ceux du programme.*

L'origine des hommes modernes, *Homo sapiens*

Cette partie du programme a pour but de sensibiliser les élèves à l'origine très récente de l'*Homo sapiens* et à l'idée que toutes les populations actuelles seraient issues d'une même population ancestrale, ce qui est en accord avec le fait qu'il n'y a pas d'allèles particuliers capables de spécifier une population. En revanche, la principale cause des différences de fréquences géniques entre les populations est la distance géographique, qui traduit le processus de migration et de dérive de composition à partir d'un *pool* initial commun très diversifié. Ainsi trouve-t-on la plus grande diversité d'allèles à l'intérieur même des différentes populations africaines ; les distances génétiques s'avèrent simplement corrélées à la distance géographique qui sépare les autres populations à travers le globe.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Les arguments liés aux données sur l'ADN mitochondrial.*
- *La discussion sur l'origine polycentrique ou monocentrique de l'Homme moderne.*

S

tabilité et variabilité des génomes et évolution

■ 6 semaines.

Sciences de la vie et sciences de la Terre.

Cette partie du programme permet le réinvestissement de connaissances et compétences acquises en classes de seconde et surtout de première S : nature du programme génétique, notions de mutation, de parenté, rôles respectifs des gènes et de l'environnement dans la réalisation du phénotype, relations entre gènes et protéines, diversité allélique au sein d'une espèce et conséquences phénotypiques.

La notion de variabilité du génome est connue ; l'origine des innovations génétiques – formation de nouveaux allèles et de nouveaux gènes – est précisée et complétée.

Le polymorphisme des gènes et les familles de gènes au sein d'une espèce doivent être compris comme les résultats d'une accumulation d'innovations génétiques au cours des générations successives. Des liens entre génétique et mécanismes de l'évolution deviennent compréhensibles : trois exemples sont abordés. Dans les cycles de développement des espèces à reproduction sexuée, deux événements fondamentaux, méiose et fécondation, sont toujours présents : ils assurent en même temps la stabilité des espèces et le brassage des allèles des gènes.

L'apport de l'étude des génomes – les innovations génétiques

Depuis la classe de seconde, l'élève sait que les mutations modifient la séquence de la molécule ADN, et sont responsables de l'apparition de nouveaux allèles. Trois types de mutations sont à connaître : substitution, addition et délétion.

On a expliqué également en première S les relations entre le phénotype d'un individu et son génotype. En classe terminale, il s'agit d'orienter l'étude sur les populations au sein des espèces. La notion de polymorphisme génique, au-delà de celle de polyallé-

lisme, implique la prise de conscience que pour beaucoup de gènes de l'espèce, il existe plusieurs allèles répandus dans les populations. On rappelle qu'un gène est qualifié de polymorphe si au moins deux de ses allèles sont présents dans l'espèce à une fréquence supérieure ou égale à 1 %.

L'objectif principal de cette partie est d'aboutir à l'idée que le polymorphisme actuel est le résultat de mutations survenues dans le passé au sein des populations de l'espèce.

Seuls les principes des innovations génétiques sont à connaître : duplication du gène ancestral, divergence plus ou moins grande des copies. Il est important de savoir que les duplications d'un gène peuvent suivre une évolution indépendante, enrichissant ainsi le génome et rendant compte de fonctions nouvelles. Il est nécessaire d'insister sur le caractère aléatoire de ces innovations, leur relative rareté dans les conditions naturelles et l'existence de facteurs variés pouvant augmenter leur fréquence.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Les mécanismes à l'origine des mutations et les modes d'actions des agents mutagènes.*
- *Les mécanismes à l'origine des duplications de gènes dans les familles multigéniques.*
- *La connaissance des codons du code génétique.*
- *La connaissance d'un exemple précis.*
- *L'ADN extragénique.*
- *Les mécanismes de correction des mutations.*

Méiose et fécondation participent à la stabilité de l'espèce

À partir de deux exemples de cycle de reproduction (celui d'un mammifère, celui d'un champignon ascomycète), on montre la signification biologique de deux phénomènes : méiose et fécondation permettent le maintien de la garniture chromosomique de l'espèce (stabilité de l'espèce).

Par l'exemple « champignon ascomycète », la méiose est dissociée de celle de processus générateur des gamètes.

À partir de documents, les événements chromosomiques de la méiose sont reconnus, les conséquences de perturbations dans le déroulement de ces événements conduisant à des anomalies du nombre de chromosomes sont comprises. Ces événements doivent pouvoir être schématisés.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *La spermatogenèse et l'ovogenèse.*
- *L'étude et la construction de cycles autres que ceux d'un mammifère et d'un champignon ascomycète.*
- *Les mécanismes cellulaires et moléculaires de la fécondation.*
- *Les différentes étapes de la prophase de la première division de la méiose.*
- *La connaissance d'exemples d'anomalies du nombre et de la forme (translocation) des chromosomes (l'élève doit savoir repérer l'existence d'une anomalie simple et typique, mais il n'a pas à retenir d'exemple précis, ni à savoir les reconnaître et les nommer).*

Méiose et fécondation sont à l'origine du brassage génétique

La relation entre polyallélisme de l'espèce et fréquence de l'hétérozygotie, évoquée dans le programme, est naturellement une simplification qui n'est acceptable qu'au sein d'une population panmictique, se reproduisant selon une modalité « classique » de reproduction biparentale.

L'étude du contenu des asques (cas d'un couple d'allèles) d'un champignon ascomycète a pour objectif de montrer les rôles de la méiose dans la ségrégation des allèles à la première ou deuxième division, les échanges entre chromatides homologues, et le positionnement aléatoire des chromosomes et chromatides. En se limitant à l'étude d'un couple d'allèles, on met en évidence le brassage du matériel chromosomique, mais on ne peut pas parler de brassage génétique, notion qui est abordée avec des exemples de diplontes.

Chez un organisme diploïde (cas de deux couples d'allèles), il faut faire comprendre que les brassages génétiques conduisent à l'unicité génétique des individus. L'expression « méiose et fécondation à l'origine de la variabilité génétique » utilisée dans le texte du programme doit donc bien être comprise à l'échelle de l'individu. Ces deux phénomènes cellulaires sont cause de la diversité génétique des individus et non de la diversité allélique au sein de la

population. Les élèves doivent pouvoir réaliser une représentation schématique des événements principaux conduisant à la réalisation d'un génotype alors que le génotype des parents est connu.

L'analyse des résultats de croisements expérimentaux (première génération et *test-cross*) permet de discuter :

- du nombre de gènes impliqués dans le déterminisme de la différence phénotypique étudiée ;
- de la localisation chromosomique des gènes impliqués.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Les mécanismes de crossing-over.*
- *Les calculs de distance génique et la localisation relative de plusieurs gènes à partir de calculs de pourcentages de recombinaison.*
- *Les termes de postréduction et de préréduction.*
- *La connaissance d'exemples de transmission de caractères héréditaires (la compréhension d'un exemple fourni est demandée, mais la mémorisation d'aucun exemple étudié dans l'année n'est exigée).*
- *Les prévisions en génétique humaine.*
- *L'étude de l'hérédité liée au sexe.*

Étude de trois exemples de relations entre mécanismes de l'évolution et génétique

Cette partie du programme est une ouverture intellectuelle. Elle a pour but d'envisager des hypothèses explicatives de l'évolution des espèces. La complexité des relations possibles entre mécanismes de l'évolution et génétique est telle qu'il est impossible d'en donner une vision d'ensemble ou des mécanismes explicatifs. C'est pourquoi, à l'aide de trois exemples ponctuels, il s'agit seulement d'illustrer le fait que des innovations génétiques se traduisent au cours du temps par des modifications du patrimoine génétique des espèces. Cette partie du programme a un statut particulier et ne peut à elle seule être l'objet d'une question au baccalauréat.

Les innovations génétiques qui affectent aussi bien des gènes de structure que des gènes du développement, apparaissent chez des individus ; seules celles qui affectent les cellules germinales peuvent être transmises à leur descendance. Mais ce sont les populations et les espèces qui évoluent. Au cours des générations successives, les fréquences des allèles des gènes au sein des populations sont modifiées :

- les individus porteurs d'allèles qui, dans des conditions de milieu données, leur donnent une probabilité plus grande de parvenir à la maturité sexuelle et de contribuer à la reproduction de l'espèce, ont plus de descendance. La fréquence des allèles dont

ils sont porteurs augmente dans la population: on parle de sélection naturelle;

– lorsque la mutation est neutre (aucun avantage ni désavantage particulier n'est conféré aux individus qui les portent), il est possible malgré tout qu'elle se répande dans la population;

– des mutations concernant les gènes du développement pourraient avoir des conséquences phénotypiques plus importantes que celles qui affectent les gènes de structure. Elles pourraient ainsi rendre compte de l'apparition de nouveaux plans d'organisation et donc d'une évolution des espèces. L'hétérochronie (ontogenèse modifiée dans sa durée ou sa vitesse d'évolution) peut affecter le développement des caractères de l'espèce.

Le premier cas de figure permet d'illustrer le fait qu'une mutation dans une espèce donnée peut avoir des conséquences sur l'individu et sur la population dans sa totalité: il indique la notion de sélection naturelle. Ce type de mutation peut être expliqué avec le paludisme ou le mélanisme de la phalène du bouleau.

Le deuxième cas de figure permet d'illustrer le fait qu'une mutation d'un gène de structure, envisagée dans le cadre de l'évolution des espèces et de la phylogénie, peut ne pas être déterminante, mais accompagner et tracer l'évolution. Cet exemple de mutation peut être expliqué avec la comparaison des hémoglobines de mammifères.

Le troisième cas de figure permet d'illustrer le fait qu'une mutation peut affecter des gènes du développement (notamment des gènes homéotiques). De telles mutations (« petite cause ») peuvent induire des décalages (ralentissements ou accélérations) de certaines phases du développement chez de nombreux vertébrés et invertébrés, et peuvent avoir pour conséquence, par exemple, l'apparition d'un nouveau plan d'organisation comme le passage de la nageoire à la patte chez les tétrapodes (« grand

effet »). On appelle hétérochronie ces modifications de durée et de vitesse d'ontogenèse au cours de l'évolution. Ce mécanisme, qui peut contrôler l'apparition de caractères fondamentaux de l'espèce, peut être expliqué avec l'exemple du blocage du trou occipital à la base du crâne chez l'Homme, qui impose une bipédie permanente, alors que la bascule vers l'arrière chez le chimpanzé âgé de un an accompagne la quadrupédie des adultes (voir programme: « Comparaison des caractères crâniens du fœtus de chimpanzé et du fœtus humain »). Il en est de même avec l'exemple de l'allongement de la durée du développement embryonnaire du système nerveux central chez l'Homme par rapport au Chimpanzé, pouvant être lié à une multiplication des cellules nerveuses conférant à l'Homme un développement plus important du cerveau.

Les phénomènes d'hétérochronie ont probablement joué un grand rôle dans l'évolution humaine. Ils se manifestent par une accélération ou un retard dans le développement embryonnaire ou dans la croissance. Ainsi, l'Homme pourrait-il être le « descendant néoténique » d'un animal qui aurait conservé à l'âge adulte des traits que l'on trouve aussi chez les hominés actuels (Chimpanzé, Bonobo), mais seulement lorsque ceux-ci sont jeunes. Ces caractéristiques sont modifiées lors du passage à l'état adulte (bipédie, front haut et bombé, yeux volumineux par rapport au reste de la face, membres supérieurs courts par rapport aux membres inférieurs...). Des mutations finalement assez limitées sur le plan de la quantité de matériel génétique concernée, mais ayant des conséquences majeures sur le développement, ont pu être transmises d'un coup à la descendance.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Les mécanismes et les effets de la dérive génique.*
- *Les modèles formels de la génétique des populations.*

L a mesure du temps dans l'histoire de la Terre et de la vie

■ 2 semaines.

Sciences de la Terre et sciences de la vie.

Les notions de temps et de durée sont sous-jacentes à la plupart des parties du programme (I.1, I.2, I.3, I.4, I.5, I.8 et spécialité). La compréhension des phénomènes biologiques et géologiques traités dans ces parties repose nécessairement sur une perception cohérente des échelles de temps. Au niveau de la classe terminale, les élèves apprécient spontanément les durées d'événements qui s'étendent de quelques secondes à quelques années (I.3 et I.2 *pro-parte*). L'enseignement général du collège et du lycée a permis une réflexion transversale sur les temps historiques. L'enregistrement et la compréhension de phénomènes s'étendant sur des durées plus longues n'ont été qu'ébauchés.

Cette partie regroupe en une entité cohérente les concepts, les principes et les méthodes qui sont utilisés pour aborder les durées supérieures au millier d'années.

La présentation des notions telle qu'elle apparaît dans le programme n'est pas la seule possible. Il est parfaitement envisageable d'intégrer tout ou partie de ce thème dans d'autres parties du programme.

Datation relative

L'objectif est de positionner relativement dans le temps des événements biologiques ou géologiques. L'interprétation d'observations choisies en liaison avec les autres parties du programme conduit à l'utilisation d'une « relation d'ordre » pour situer des objets géologiques, des êtres vivants ou des phénomènes les uns par rapport aux autres. Elle est fondée sur un nombre limité de principes qui sont systématiquement mis en pratique lors des observations géologiques : principe de superposition, principe de recoupement, principe de continuité, principe d'identité paléontologique.

Il est nécessaire de ne pas multiplier le nombre d'exemples pour éviter la mise en place par l'élève d'attitudes réflexes face à des situations supposées

standard, et pour favoriser au contraire la mise en place d'une méthode qui lui permette d'appliquer les principes énoncés.

Limites (ne sont pas exigibles)

– *Le détail des structures, leur inventaire exhaustif et les mécanismes de déformation.*

– *L'utilisation des principes pour l'établissement de l'échelle stratigraphique internationale.*

– *La connaissance de l'échelle stratigraphique des temps géologiques.*

– *La reconstitution de l'histoire géologique d'une région n'est pas au programme ; on se limitera à l'étude de successions simples d'événements géologiques.*

Le principe de superposition

Il permet de caractériser des successions ordonnées ; son application dépend des propriétés du phénomène ou du système étudié. Par exemple, pour la sédimentation (ou pour le volcanisme), dans une série sédimentaire (ou une pile de coulées volcaniques) ordinaire non déformée, une couche (ou une coulée) donnée est plus récente que la couche qui lui est sous-jacente et plus ancienne que la couche qui lui est sus-jacente.

Limites (ne sont pas exigibles)

– *La sédimentation oblique et la stratigraphie séquentielle.*

Le principe de recoupement

Il permet de traiter toutes les situations d'intersection entre couches ou formations. Par exemple pour la déformation (ou pour le magmatisme intrusif) : l'événement ayant généré les changements de géométrie des couches (plis) ou les discontinuités (failles) (ou la limite de l'intrusion), est postérieur à la formation qu'il affecte.

L'étude des minéraux se limite au cas où un minéral est inclus dans un autre et lui est antérieur, et au cas où l'apparition d'un minéral caractéristique

d'une réaction métamorphique la situe par rapport aux minéraux préexistants.

Limites (ne sont pas exigibles)

– *Les superpositions de plis, les figures résultant de la superposition de plis et plus généralement les systèmes polyphasés.*

Plusieurs principes sont utilisés simultanément pour expliquer des situations plus complexes.

Par exemple pour la discordance : une discordance est l'expression d'une interruption de la continuité de la sédimentation. Les couches situées sous la discordance sont antérieures à celles qui sont au-dessus. L'événement tectonique ou sédimentaire responsable de la discordance est postérieur à la dernière couche au-dessous et antérieur à la première couche au-dessus de la discordance. L'inventaire exhaustif des exemples ou des situations doit être évité. L'élève doit pouvoir appliquer un principe de datation relative lors de questions portant sur la collision et les phénomènes associés.

Limites (ne sont pas exigibles)

– *La description détaillée de la mise en place des structures choisies, leur formation ou leur évolution au cours du temps.*

– *Les mécanismes de sédimentation et de maturation des sédiments.*

– *La typologie des structures tectoniques et sédimentaires.*

– *Les mécanismes de déformation qui engendrent les plis et les failles et les mécanismes de l'orogénèse.*

Deux autres principes fournissent la possibilité de corréler des observations locales et dispersées ; ils permettent de déterminer si les interprétations sont généralisables à l'échelle de l'affleurement, de la région, du continent ou de l'océan, ou même de toute la planète.

Le principe de continuité

Il permet d'étendre un marqueur temporel sur toute la surface où la couche est représentée. Ce principe est énoncé et appliqué dans la situation locale la plus simple. Les écoles de terrain ou les reconstitutions paléogéographiques des musées peuvent permettre d'illustrer ce principe ; ce peut être aussi l'occasion de prendre conscience, sur des exemples naturels, du fait que toutes les couches d'un âge donné ne sont pas les mêmes à la surface de la Terre et du fait que les facteurs climatiques ou géographiques lors du dépôt induisent des faciès différents.

Limites (ne sont pas exigibles)

– *Les passages latéraux ainsi que toutes les figures sédimentaires.*

Le principe d'identité paléontologique

Il est fondé sur la reconnaissance de fossiles stratigraphiques ; il permet d'étendre un marqueur temporel lorsque le principe de continuité n'est pas applicable. On choisit un exemple que l'on peut réinvestir dans l'étude du calage temporel de l'une des crises (ex. : Crétacé-Tertiaire). Les écoles de terrain ou les reconstitutions paléogéographiques des musées peuvent également permettre d'illustrer ce principe.

L'utilisation de ces principes a permis de construire une référence temporelle qui a une valeur générale et qui s'applique à toutes les études géologiques : c'est l'échelle stratigraphique internationale des temps géologiques.

Limites (ne sont pas exigibles)

– *La construction et la connaissance de l'échelle stratigraphique internationale.*

– *Le découpage en étages, systèmes, biozones.*

Datation absolue

La datation relative fournit un moyen efficace d'ordonner dans le temps une succession d'objets ou d'événements. Cette méthode dans certaines circonstances favorables (grande richesse en fossiles stratigraphiques et taux de sédimentation élevé) peut permettre un repérage d'une grande finesse, mais ne donne pas l'âge d'un événement. Il est donc impossible par cette approche de chiffrer (en millions d'années) l'âge d'un phénomène ou d'aborder directement la durée des phénomènes observés.

Pour obtenir l'âge d'un phénomène, d'une roche, d'un minéral et exceptionnellement d'un fossile, on utilise une méthode s'appuyant sur la décroissance radioactive d'isotopes de certains éléments chimiques. Cette méthode de datation est appelée méthode de datation absolue. En se référant aux parties du programme concernées, elle permet par exemple :

– de dater des émissions volcaniques intercalées dans les sédiments contenant des fossiles d'homininés d'Afrique de l'Est ;

– de dater des roches métamorphiques d'une chaîne de collision ;

– de dater les roches volcaniques et plutoniques d'un arc magmatique associé à une subduction.

La faisabilité de la datation et la qualité de la date calculée dépendent de :

– la qualité et la pertinence de l'échantillon utilisé ;

– la période de l'isotope choisi pour l'analyse.

Qualité et pertinence de l'échantillon utilisé

La date que l'on obtient est celle qui correspond au moment où les isotopes de l'échantillon utilisé (fraction minérale, roche totale) ont été confinés : aucun constituant n'a pu quitter l'échantillon et aucun des constituants extérieurs n'a pu y entrer. À partir de cette date les éléments chimiques ont évolué spontanément en suivant les lois physiques de désintégration sans interaction avec le milieu. On parle de système fermé. On désigne par « fermeture » le moment où les échanges d'éléments chimiques entre les minéraux – et éventuellement le verre – de la roche cessent. La date trouvée est celle de la fermeture du système. On signale qu'en général les roches sédimentaires ne sont jamais des systèmes fermés. Sauf cas particuliers comme le ^{14}C , la radiochronologie ne permet pas de dater les roches sédimentaires.

On se limitera au cas des roches magmatiques et métamorphiques pour lesquelles, dans des conditions de pression données, la fermeture du système est due à l'abaissement de la température en-deçà d'un certain seuil.

Période de l'isotope choisi pour l'analyse

Une fois le système fermé, la quantité d'isotope susceptible de se désintégrer diminue. La datation n'est valide que si l'on mesure des durées allant du centième à dix fois la période de l'isotope choisi.

Limites (non exigibles en SVT, mais abordées en physique)

– *Les principes physiques de la désintégration des éléments.*

Le programme de terminale est l'occasion d'aborder différentes échelles de temps ; il n'existe pas de méthode universelle de datation pour aborder l'éventail de ces durées.

Le carbone 14, du fait de sa demi-vie de 5 370 ans, est particulièrement bien adapté à la mesure de durées de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'années au plus. Le ^{14}C est produit en haute atmosphère à partir de l'azote de l'air. On considère qu'il est produit régulièrement et qu'il est donc en proportion constante et connue dans tous les milieux et tous les êtres vivants. Lorsqu'un animal ou une plante meurt, son métabolisme cesse et son carbone n'est plus renouvelé ; le ^{14}C qu'il contient au moment de sa mort se désintègre ; il en est de même pour le ^{14}C d'un carbonate précipité et isolé, ou celui d'une masse d'eau isolée.

En connaissant la proportion $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans le milieu, la mesure de la proportion $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans les restes d'êtres vivants (os, cheveux, bois, coquille) fournit la durée écoulée depuis la mort ou « l'isolement » (fermeture du système). Au-delà de 30 000 à 40 000 ans, la quantité de ^{14}C restante dans l'échantillon est insuffisante pour permettre une mesure fiable.

Dans le cas du ^{14}C , le calcul de l'âge est donc aisé, car la composition au moment de la fermeture est connue et on mesure la quantité d'isotope radioactif restant.

Le couple potassium-argon (K-Ar) correspond à une situation intermédiaire entre le ^{14}C et le couple rubidium-strontium (Rb-Sr, cas le plus général). Il permet d'aborder des datations de roches beaucoup plus anciennes. Contrairement au ^{14}C , dans le cas du couple K-Ar la quantité initiale de l'isotope issu de la désintégration radioactive est nulle ; ceci illustre le fait que pour calculer un âge il est équivalent de mesurer des rapports isotopiques exprimant le nombre d'isotopes disparus ou le nombre d'isotopes apparus lors de la réaction de désintégration radioactive. Enfin, la méthode au K-Ar permet de suggérer l'existence de limites à la datation absolue. L'isotope de l'argon existe en quantité non négligeable dans l'atmosphère et les fluides circulants ; l'échantillon daté peut donc être contaminé et conduire à des dates erronées.

La méthode de datation la plus courante utilise un couple d'isotopes dont la quantité initiale d'isotopes est inconnue (nombre d'isotopes lors de la fermeture de l'échantillon). Ce cas général est plus complexe que les deux précédents puisque le problème de datation posé renferme deux inconnues :
– la quantité initiale d'isotope ;
– l'âge de l'échantillon.

Pour résoudre ce problème il est nécessaire de disposer d'au moins deux équations. Pour ce faire, on effectue une mesure sur deux constituants équivalents du même échantillon. Pour éviter le problème posé par le fait que les quantités initiales dans les deux échantillons des isotopes impliqués dans les réactions radioactives sont différentes, on mesure les rapports isotopiques qui sont bien sûr identiques (mais inconnus) à l'origine.

Un isotope de ^{87}Rb donne par désintégration un isotope de ^{87}Sr . La demi-vie est de 50 millions d'années ($50 \cdot 10^6$ ans). Le ^{87}Sr est un isotope stable tout comme le ^{86}Sr qui n'est impliqué dans aucune réaction de désintégration. Dans ce qui suit, $N^{87}\text{Sr}$ et $N^{86}\text{Sr}$ représentent les nombres d'atomes de ^{87}Sr et de ^{86}Sr présents dans un fragment de roche ou un minéral à l'instant t , et $N^{87}\text{Rb}$ représente le nombre d'atomes de ^{87}Rb :

$$N^{87}\text{Rb} = (N^{87}\text{Rb})_{\text{initial}} \times \exp(-\lambda t) \quad [1]$$

Limites (ne sont pas exigibles)

– La signification des rapports isotopiques initiaux.
– L'étude de l'expression mathématique de la désintégration du rubidium n'est pas au programme de SVT. Le développement mathématique et physique permettant d'aboutir à la détermination de l'âge d'une roche ne peut pas faire l'objet d'une question au baccalauréat dans l'épreuve de SVT. Le développement qui conduit de l'expression précédente à un système d'équations linéaires dont la solution est fonction de l'âge est fourni à titre d'information.

Le nombre d'atomes de ^{87}Sr formés est égal au nombre d'atomes de rubidium désintégrés soit :

$$N^{87}\text{Sr} = (N^{87}\text{Rb})_{\text{initial}} - N^{87}\text{Rb}$$
$$N^{87}\text{Sr} = (N^{87}\text{Rb})_{\text{initial}} [1 - \exp(-\lambda t)],$$

en utilisant [1] :

$$N^{87}\text{Sr} = N^{87}\text{Rb} \times [\exp(\lambda t) - 1].$$

Le nombre total d'atomes de ^{87}Sr , somme des atomes présents initialement et de ceux provenant de la désintégration du rubidium, est donné par :

$$N^{87}\text{Sr} = (N^{87}\text{Sr})_{\text{initial}} + N^{87}\text{Rb} \times [\exp(\lambda t) - 1].$$

On introduit le rapport isotopique en divisant par le nombre d'atomes de strontium-86 présents dans l'échantillon actuellement, ce qui conduit à :

$$\frac{N^{87}\text{Sr}}{N^{86}\text{Sr}}_{\text{mesuré}} = [\exp(\lambda t) - 1] \frac{N^{87}\text{Rb}}{N^{86}\text{Sr}}_{\text{mesuré}} + \frac{N^{87}\text{Sr}}{N^{86}\text{Sr}}_{\text{initial}} \quad [2]$$

La résolution et la détermination de l'âge est faite le plus souvent de manière graphique en reportant les mesures de rapports isotopiques dans le repère [x y] suivant :

$$\frac{N^{87}\text{Rb}}{N^{86}\text{Sr}}_{\text{mesuré}} \quad \frac{N^{87}\text{Sr}}{N^{86}\text{Sr}}_{\text{mesuré}}$$

L'expression [2] peut être exprimée sous la forme $y = Ax + B$, où les inconnues recherchées sont A (pente de la droite $\exp(\lambda t) - 1$) et B (valeur de y à l'origine, rapport isotopique initial $\frac{N^{87}\text{Sr}}{N^{86}\text{Sr}}_{\text{initial}}$).

L'âge de la roche est fonction de la pente de la droite

$$A = [\exp(\lambda t) - 1] \quad t = \frac{\ln(A + 1)}{\lambda} : \text{plus la pente est forte, plus les deux échantillons sont vieux.}$$

Il est possible d'approcher empiriquement l'alignement des mesures dans le repère des rapports isotopiques en simulant les deux (ou plus) constituants du même échantillon par deux (ou plus) sacs de boules colorées contenant la même proportion de boules représentant ^{87}Sr , ^{87}Rb et ^{86}Sr , mais contenant des quantités différentes. Le « vieillissement » est réalisé en effectuant des tirages au hasard dans le sac. Chaque fois qu'une boule ^{87}Rb est tirée, elle est remplacée par une boule ^{87}Sr ; chaque fois qu'une boule ^{87}Sr ou ^{86}Sr est tirée elle est remise dans le sac de départ (il est important de respecter un nombre suffisant de tirages pour satisfaire aux contraintes statistiques de ce type d'expérimentation).

En effectuant plusieurs mesures du rapport isotopique après n, m et p tirages (au cours du vieillissement), on observe que la pente de la droite augmente : la pente de la droite est fonction de l'âge de l'échantillon.

Conclusion

Les notions exigibles pour l'élève sont :

– La méthode de datation absolue est fondée sur la mesure de la variation du rapport isotopique entre le moment de la fermeture de l'échantillon daté et le présent.

– Suivant les couples d'isotopes choisis, il est possible de calculer un âge soit en mesurant les rapports isotopiques d'un isotope qui disparaît lors de la réaction et dont la quantité initiale est connue, soit en mesurant les rapports isotopiques d'un isotope qui apparaît lors de la réaction et dont la quantité initiale est nulle.

– Dans le cas général, on ne connaît pas la quantité initiale d'isotope ; l'âge de la roche est obtenu par résolution d'un système simple d'équations linéaires. Dans le cas d'une roche, les équations sont obtenues en effectuant des mesures sur plusieurs minéraux de la même roche.

– Le choix du couple d'isotopes pour calculer un âge dépend de l'âge présumé et de la nature de la roche.

– Savoir exploiter un document ou des données numériques sur les rapports isotopiques en relation avec le calcul de l'âge absolu des roches ; dans tous les cas où des formules mathématiques sont nécessaires ($y = Ax + b$, $y = \exp(\lambda t)$), celles-ci sont fournies.

L a convergence lithosphérique et ses effets

■ 4 semaines.

Sciences de la Terre.

L'étude de la dynamique de la lithosphère s'effectue de façon continue et progressive sur les deux dernières années du lycée.

Le modèle de la cinématique globale des plaques lithosphériques, la divergence et les phénomènes associés ont été développés en classe de première S. La convergence des plaques, présentée en classe de première, est développée en classe terminale S.

Convergence et subduction

La convergence se traduit par la disparition de la lithosphère océanique dans le manteau, ou subduction

Les marges actives témoignent de la convergence lithosphérique et en particulier de la subduction. Les principaux caractères morphologiques, géométriques et phénoménologiques (séismicité, déformations, magmatisme et métamorphisme) des zones de subduction sont présentés et analysés.

Pour cela, on utilise aussi bien des cartes et coupes géologiques simplifiées des chaînes de subduction (cartes au 1/250 000^e ou plus petite échelle seulement) que des cartes sismo-tectoniques (répartition des séismes par rapport aux grandes structures tectoniques), des cartes du relief terrestre ou des images satellitales.

Limites (ne sont pas exigibles)

– *L'analyse et l'interprétation des cartes géologiques au 1/50 000^e et 1/80 000^e.*

– *Les caractéristiques gravimétriques des zones de subduction.*

– *L'étude exhaustive de la diversité des structures et des fonctionnements des zones de subduction. On se limite à la distinction entre subduction sous une marge continentale et subduction intraocéanique.*

Dans une marge active, la frontière de plaques est généralement marquée par la présence de reliefs négatifs majeurs : les fosses océaniques. Il existe aussi dans le dispositif de subduction des reliefs positifs, arcs magmatiques et chaînes de subduction. La présentation des arcs magmatiques (relief positif et activité magmatique), portés par la croûte océanique ou continentale de la plaque chevauchante, est l'occasion de constater la coexistence de roches plutoniques et volcaniques.

La notion de déformation lithosphérique est abordée par l'observation des structures des chaînes de montagnes et par l'étude du prisme d'accrétion.

Cette notion de prisme d'accrétion est limitée à celle de prisme tectonique, constitué de matériaux sédimentaires déformés, localisé à la frontière entre plaque subduite et plaque chevauchante. La déformation (limitée aux plis et failles inverses) des matériaux sédimentaires du prisme permet de souligner le raccourcissement et l'épaississement imposés par la convergence.

Les bassins d'arrière-arc ne sont présentés que comme l'un des marqueurs éventuels de la subduction.

Limites (ne sont pas exigibles)

– *Les divers types de plis et les mécanismes de leur genèse.*

– *Les mécanismes de la formation des bassins d'arrière-arc.*

– *L'étude exhaustive des chaînes de subduction.*

La répartition des foyers des séismes en profondeur sert à identifier le panneau lithosphérique subduit.

Limites (ne sont pas exigibles)

– *L'étude de la séismicité en tant que telle (puissance, magnitude, mécanismes au foyer...).*

– *L'approche tomographique de la subduction.*

La répartition particulière des flux de chaleur des zones de subduction est présentée : flux faible au voisinage de la fosse et flux élevé associé à l'arc magmatique.

La présence d'un flux faible au droit de la fosse s'interprète par la subduction de la lithosphère

océanique froide. Cette dernière reste froide parce que la vitesse à laquelle elle s'enfonce est trop importante pour qu'elle puisse atteindre l'équilibre thermique avec son environnement.

En revanche, le flux élevé reflète l'ascension et l'accumulation des magmas à la base de la croûte de la plaque chevauchante (voir figure 1, page 24).

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Le régime thermique des bassins arrière-arc.*
- *Les caractéristiques gravimétriques des zones de subduction.*
- *L'étude exhaustive de la diversité des subductions, en particulier l'opposition subduction « forcée »/ subduction « spontanée ».*

La différence de densité entre lithosphère océanique et asthénosphère est présentée comme l'un des moteurs essentiels de la subduction.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *La diversité et la répartition des forces (tectoniques et gravitaires) agissant lors de la subduction.*
- *Le couplage entre convection globale et subduction.*

Les zones de subduction sont le siège d'une importante activité magmatique caractéristique : volcanisme, mise en place de granitoïdes

Quelques roches magmatiques et métamorphiques générées dans un contexte de subduction sont étudiées. Il est souhaitable de favoriser les observations et les descriptions d'échantillons naturels de granitoïdes, de roches volcaniques et de roches métamorphiques de haute pression et basse température. Sur l'ensemble des roches produites en subduction, seules les roches volcaniques se forment en surface et sont donc directement accessibles. En revanche, les autres roches ne sont accessibles que parce qu'elles ont été remontées en surface selon des processus que l'on n'étudiera pas. Ce sont des études expérimentales qui ont permis aux géologues de localiser ces roches sur les différents niveaux d'une zone de subduction selon le schéma 2 figuré en annexe (page 25).

Cependant, on limite cette présentation à un granitoïde (granite ou grano-diorite), une andésite, une rhyolite, un ou deux méta-gabbros (ou méta-basaltes) de haute pression et basse température (schistes bleus, écolite).

L'étude des roches sera macroscopique et microscopique (microscopie photonique) afin de pouvoir pré-

senter leurs textures ainsi que leurs compositions minéralogiques.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Les caractéristiques géochimiques des séries magmatiques calco-alcalines.*
- *Les processus de différenciation magmatique liés à la cristallisation fractionnée.*
- *La connaissance des compositions chimiques des minéraux et leur reconnaissance au microscope photonique.*
- *Les mécanismes à l'origine de la diversité des laves.*
- *Les mécanismes de mise à l'affleurement des roches générées dans les parties profondes des zones de subduction.*

Le rôle de l'eau est présenté en tant qu'agent déclenchant la fusion partielle des péridotites du manteau lithosphérique de la plaque chevauchante (abaissement du point de fusion, à pression et température données, par hydratation).

La réflexion à propos de l'origine de l'eau est l'occasion de réinvestir les acquis de la classe de première S. C'est en effet une lithosphère océanique hydratée et transformée qui entre en subduction. Sa déshydratation, qui accompagne les réactions de formation des minéraux métamorphiques de haute pression et basse température, libère l'eau qui déclenche la fusion partielle du manteau à l'origine des magmas.

On se limite à la présentation des transformations qui s'accompagnent d'une libération d'eau, d'un méta-gabbro (ou d'un méta-basalte) océanique (à chlorite et actinote) en un méta-gabbro à glaucophane et jadéite (schistes bleus) puis en un méta-gabbro à grenat et jadéite (écolite).

Ces associations minéralogiques sont localisées sur un diagramme pression-température très simplifié qui permet de comprendre leurs conditions de réalisation (voir figures 3a et 3b, pages 26 et 27).

Ces transformations, qui se réalisent en phase solide, ont une cinétique très lente par rapport aux transformations chimiques connues des élèves. On signale les durées très lentes de ces phénomènes par rapport à l'échelle des temps humains.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *La mémorisation des équations de transformations métamorphiques.*

En conclusion, on souligne que la genèse des granitoïdes, et donc des roches caractéristiques de la croûte continentale, est liée au mécanisme de subduction (mais les processus géochimiques qui conduisent du magma initial au magma différencié sont hors programme).

Convergence lithosphérique et collision continentale

La collision continentale est l'aboutissement du processus de fermeture océanique résultant de la convergence des plaques lithosphériques. On s'attache à identifier, dans les chaînes de collision :

- d'une part, les témoins d'un ancien domaine océanique (ophiolites, où l'on retrouve les constituants d'une lithosphère océanique) et de ses marges passives (blocs basculés, séries sédimentaires associées aux processus d'extension) ;
- d'autre part, les témoins de la subduction antecollision (métamorphisme de haute pression et basse température).

D'une manière générale, on présente les principales caractéristiques morphologiques et géométriques des chaînes de collision. On identifie ainsi les principaux marqueurs de la collision continentale :

- un marqueur morphologique : le relief ;
- un marqueur structural : la racine crustale identifiable grâce aux profils sismiques jusqu'à plus de 50 km de profondeur ;
- des marqueurs tectoniques : les plis, les failles inverses et les charriages.

L'analyse de l'ensemble de ces marqueurs permet de démontrer que les chaînes de collision sont des lieux de raccourcissement et d'épaississement de la lithosphère continentale.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Les mécanismes de la déformation des roches.*
- *Les caractéristiques gravimétriques et magnétiques des chaînes de collision.*
- *La typologie des structures tectoniques.*

Ces différentes approches des caractères des chaînes de collision sont développées de façon simple à partir de l'exemple des Alpes occidentales franco-italiennes et ce grâce à l'étude :

- d'affleurements (dans le cadre d'une éventuelle classe de terrain) ;
- de photographies d'affleurements ;
- de coupes géologiques et cartes simplifiées ;
- d'images satellitales ;
- de profils sismiques.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Les méthodes d'analyse des profils sismiques.*
- *Le repérage et l'identification des structures tectoniques sur une carte géologique.*
- *Une présentation de l'histoire géologique de la chaîne alpine.*

La collision est accompagnée et suivie d'autres phénomènes géologiques (fusion partielle, métamorphisme, formation de granites, érosion, extension, effondrement gravitaire...) qui ne font pas partie du programme.

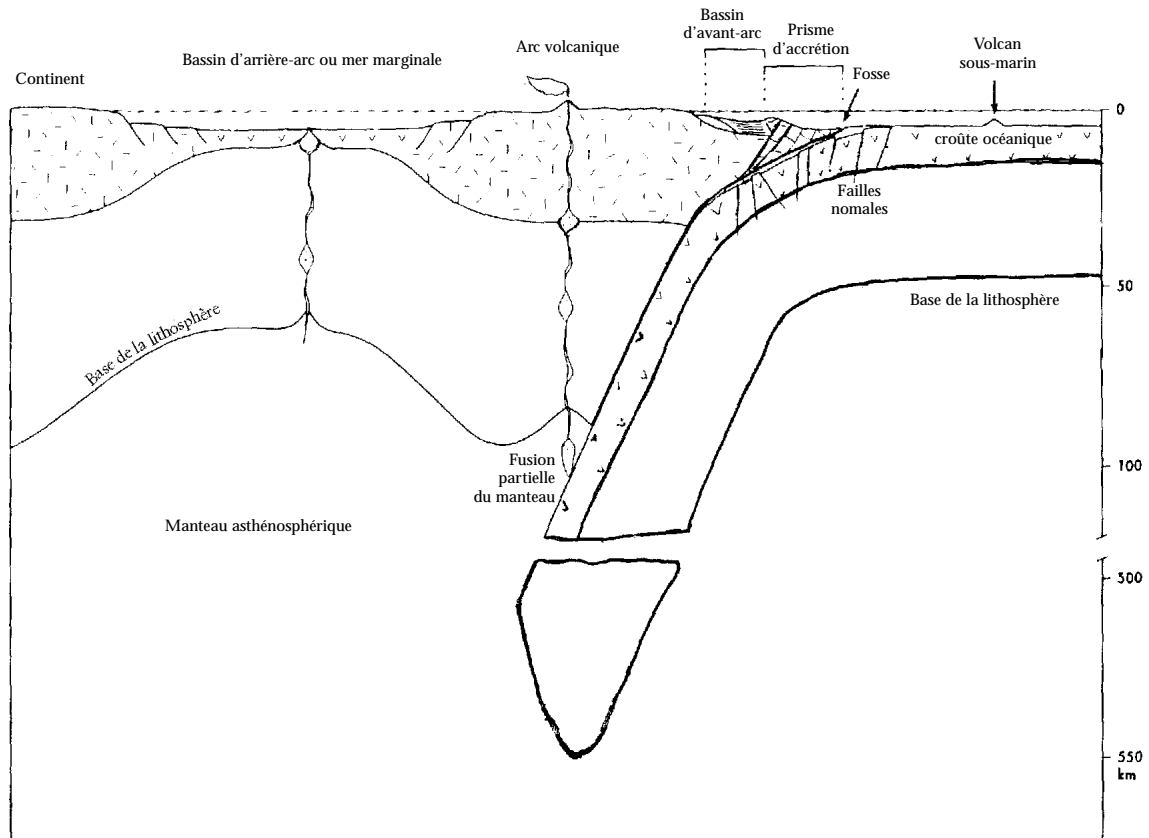
Sans que cela puisse faire l'objet d'une question à l'examen, on peut évoquer le processus d'érosion qui, couplé à la poussée d'Archimède s'appliquant à la racine crustale, est présenté comme un des moteurs du retour à une épaisseur normale de la croûte.

À titre de synthèse, on illustre schématiquement l'évolution de la dynamique de la lithosphère depuis l'ouverture océanique jusqu'à la collision continentale.

Annexe

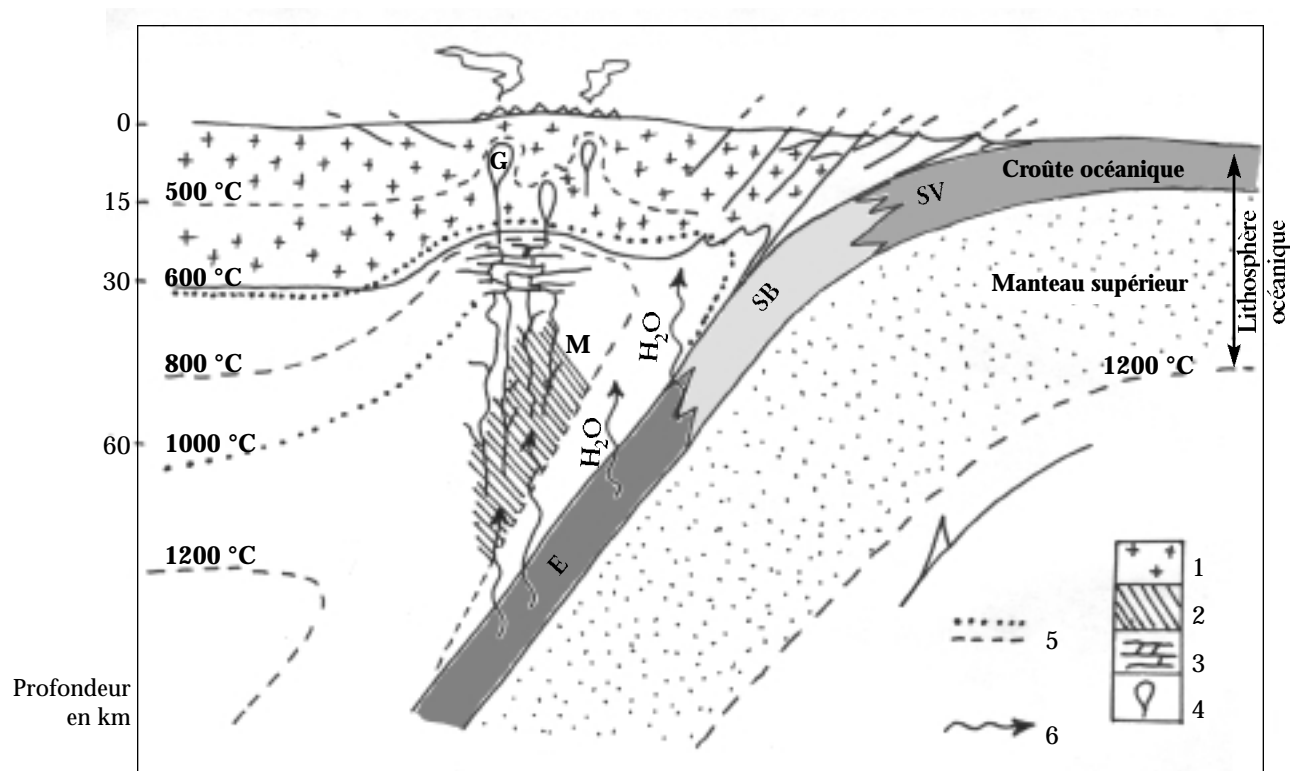
Les quatre figures présentées ci-après ont été conçues comme complément d'information pour le professeur. Elles ne constituent pas dans leur totalité une connaissance exigible pour les élèves.

Figure 1. Schéma synthétique d'une zone de subduction (modifié d'après Lallemand, 1999) regroupant les différentes structures connues dans les marges actives.



Bassin d'arrière-arc, arc volcanique, prisme d'accrétion et fosse océanique sont localisées. Le bassin d'avant-arc est identifié à titre indicatif. Les zones de fusion partielle du manteau sont localisées et les structures particulières connues dans la croûte océanique (volcans sous-marins, failles normales océaniques) sont représentées. Au niveau des zones d'activité magmatique, le flux de chaleur est élevé. Au niveau de la fosse océanique, le flux de chaleur est faible. À titre indicatif, on a identifié la rupture de la plaque plongeante afin de souligner que ce processus peut exister dans certaines zones de subduction.

Figure 2. Schéma localisant les différents matériaux générés en subduction et présentant le couplage entre métamorphisme et magmatisme (modifié d'après Kornprobst, 2000).



Légende :

SV – Méta-basalte ou méta-gabbro à actinote et chlorite (schistes verts formés par hydrothermalisme océanique).

SB – Méta-basalte ou méta-gabbro à glaucophane (schistes bleus).

E – Méta-basalte ou méta-gabbro à grenat et jadéite (eclogites).

M – Production et propagation des magmas basaltiques issus de la fusion partielle du manteau. Les liquides basaltiques provoquent à la base de la croûte continentale une anomalie thermique (remontée des isothermes) et une fusion partielle à l'origine de la formation des granitoïdes (G).

1. Croûte continentale de la marge active.

2. Domaine d'extraction des magmas du manteau supérieur hydraté.

3. Stockage des magmas basaltiques en base de croûte continentale.

4. Diapir de granitoïdes.

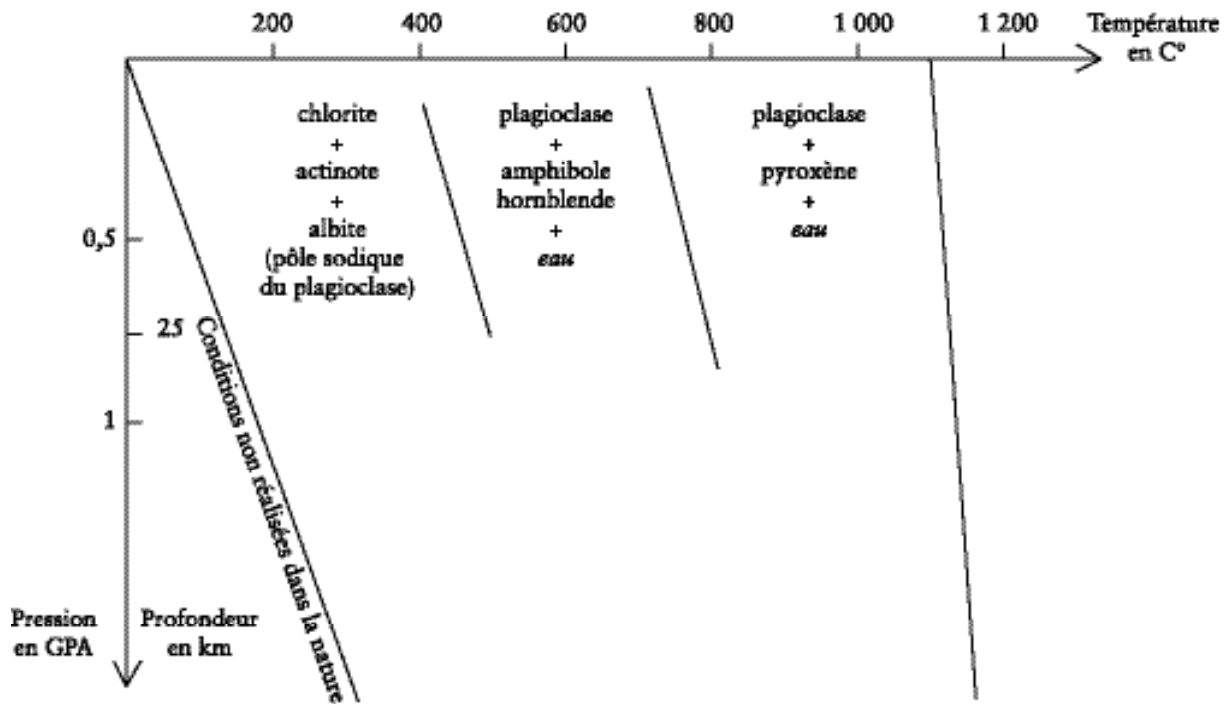
5. Tracés des isothermes.

6. Percolation de l'eau à partir de la lithosphère océanique métamorphisée.

La plaque plongeante est soumise à un régime de haute pression tout en présentant des températures inférieures aux températures que l'on rencontre généralement aux profondeurs mentionnées.

Au droit de la colonne de fusion partielle du manteau et de genèse des granitoïdes, les températures sont plus élevées que celles que l'on rencontre généralement aux profondeurs mentionnées.

Figure 3a. Diagramme pression/température simplifié rappelant les transformations minéralogiques qui accompagnent l'évolution (refroidissement, hydratation) des roches de la croûte océanique au fur et à mesure qu'elles s'éloignent de la dorsale.



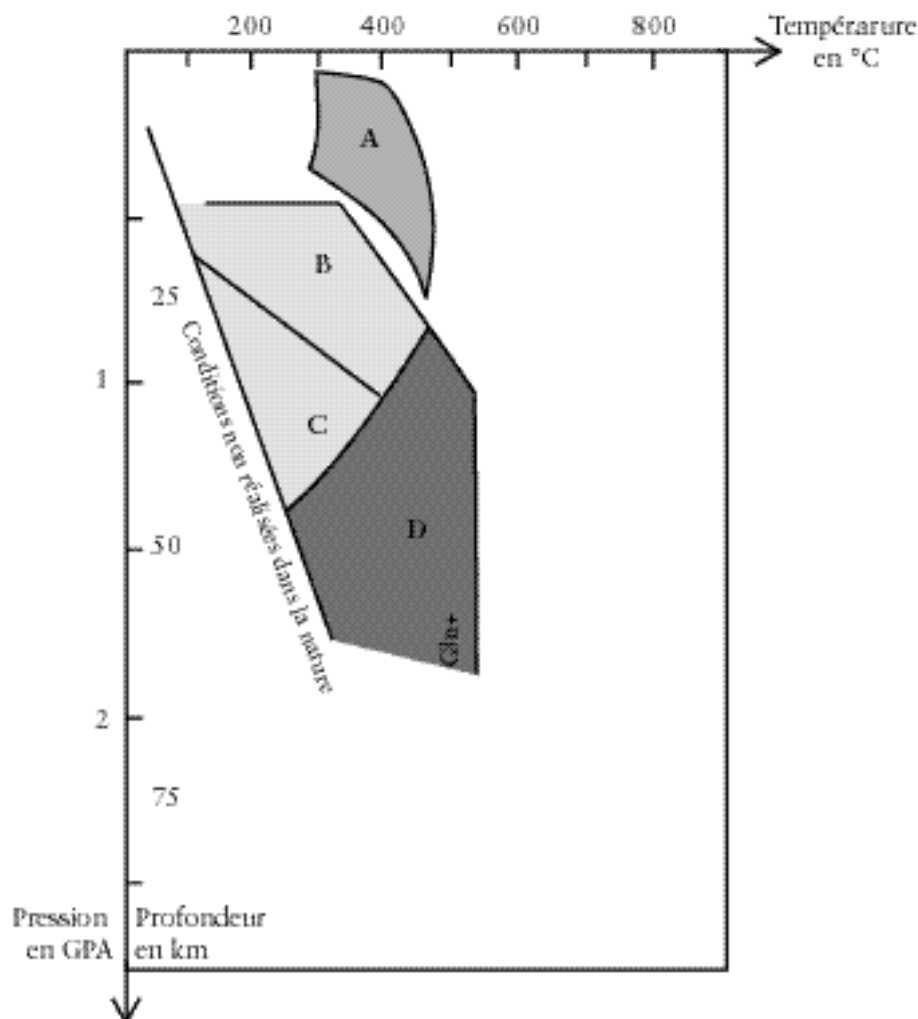
plagioclase + pyroxène + eau amphibole hornblende
 plagioclase + hornblende + eau chlorite + actinote

Rappel du programme de première S

Contenu. En s'éloignant de la dorsale, la lithosphère océanique se refroidit, s'hydrate et s'épaissit.

Activité envisageable. Nature et chimie de la lithosphère océanique: roches initiales, roches hydratées et/ou déformées.

Figure 3b. Diagramme pression/température très simplifié montrant les domaines de stabilité de quelques associations de minéraux caractéristiques. Ces domaines de stabilité sont déterminés expérimentalement.



Légende :

- A: domaine de stabilité de l'association à chlorite + actinote + plagioclase.
- B: domaine de stabilité de l'association à glaucophane + plagioclase.
- C: domaine de stabilité de l'association à glaucophane + jadéite.
- D: domaine de stabilité de l'association à grenat + jadéite +/- glaucophane.

Au sein des roches de la croûte océanique en cours de subduction, plusieurs transformations minéralogiques peuvent se produire qui conduisent à la formation de schistes bleus et d'éclogites. Le plus souvent, ces transformations libèrent de l'eau et toutes conduisent à des roches plus denses ($d = 3,1$ pour un schiste bleu et $d = 3,5$ pour une éclogite) que les basaltes et les gabbros ($d = 2,9$) de la croûte océanique. À titre d'exemple, on notera la transformation :

plagioclase + chlorite → glaucophane + H_2O .

P rocréation

■ 6 semaines. *Sciences de la vie.*

Cette partie du programme illustre et complète les notions acquises en première S concernant le rôle des gènes dans la réalisation du phénotype et permet le réinvestissement des notions d'« hormone » et de « régulation », acquises en première S. On étudie uniquement la reproduction sexuée chez les mammifères placentaires.

L'importance des mécanismes hormonaux est montrée à toutes les étapes de la reproduction, depuis la mise en place de l'appareil génital jusqu'à la grossesse. L'élève dispose ainsi des bases scientifiques nécessaires à la compréhension des problèmes individuels et de société en liaison avec la reproduction. À propos de régulation, l'élément nouveau appréhendé dans ce programme par rapport à la première S est la notion de « servomécanisme ». Il s'agit d'abord d'étudier, chez les mammifères placentaires, au cours du développement de l'individu, les mécanismes de la réalisation progressive du phénotype sexuel à partir du génotype. Il s'agit ensuite d'étudier, pour les deux sexes, la régulation de l'activité de l'axe gonadotrope avec ses trois niveaux d'intervention (gonades, hypophyse, hypothalamus) pour une compréhension graduée des rétroactions hormonales.

La viviparité, c'est-à-dire l'apparition de la nidation associée au développement de l'utérus, est une acquisition tardive dans l'évolution et se réalise pleinement chez les mammifères placentaires.

L'aspect comportemental abordé dans ce programme et limité aux mammifères a pour but de mettre en évidence le fait que le synchronisme entre les phénomènes physiologiques et comportementaux assurés par les hormones sexuelles contribue au succès reproductif. Dans l'espèce humaine, la dépendance du comportement sexuel vis-à-vis des hormones sexuelles est moins prégnante, ce qui conduit à une dissociation partielle entre sexualité et reproduction. À cette dissociation s'ajoute l'acquisition par l'homme des moyens de la maîtrise de sa procréation.

L'apparition des phénomènes essentiels que sont méiose et fécondation (mécanismes cellulaires déjà étudiés dans la partie « Stabilité et variabilité des

génomés et évolution », p. 14) est brièvement positionnée dans l'histoire de la vie, sans démonstration.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *La reproduction chez les eucaryotes unicellulaires.*
- *L'ovoviviparité.*
- *La physiologie de la viviparité.*

Du sexe génétique au sexe phénotypique

L'objectif est de comprendre comment le sexe génétique détermine le sexe phénotypique. Les descriptions anatomiques et physiologiques exhaustives sont exclues.

Dès la fécondation, le sexe génétique d'un individu est déterminé par ses chromosomes sexuels. L'étude de cette partie du programme doit se limiter strictement aux quatre étapes permettant par la suite l'acquisition des structures et de la fonctionnalité des appareils sexuels mâle et femelle. Chez un individu donné, on peut les énumérer ainsi :

- La première étape est caractérisée par la mise en place, au cours du développement, de gonades phénotypiquement indifférenciées mais génétiquement déterminées (mâles ou femelles) et des deux types d'ébauches de voies génitales (canaux de Müller et canaux de Wolff).

- Lors de la deuxième étape, chez le mâle, l'expression du gène Sry (localisé sur la partie spécifique du chromosome Y) dans les cellules des gonades, entraîne la synthèse de la protéine Sry. Cette protéine déclenche l'expression de nombreux gènes (rappel de la notion de « gène architecte ») qui conduisent à la différenciation de la gonade indifférenciée en testicule. Les étapes de la différenciation de la gonade ne sont pas au programme. On souligne que c'est à ce moment et à ce moment seulement que la différence XX, XY intervient dans l'élaboration du phénotype sexuel : en absence de protéine Sry, la gonade se transforme en ovaire.

- Lors de la troisième étape, dans le testicule, la production de testostérone par les cellules interstitielles et d'hormone antimullerienne par les cellules de Sertoli contrôle la masculinisation de l'appareil génital. Les mécanismes moléculaires, cellulaires et tissulaires de

la masculinisation ne sont pas au programme. Seul le schéma de principe sera retenu. Chez la femelle, l'absence d'hormones testiculaires est responsable de la persistance des canaux de Müller (futurs oviductes et utérus) et de la disparition des canaux de Wolff (féminisation de l'appareil génital).

– La quatrième étape, décalée dans le temps, est celle de la puberté. L'hormone antimullérienne n'intervient plus, la concentration de testostérone et d'œstrogènes, très faible chez l'enfant, augmente considérablement. Cette augmentation correspond à la mise en activité des gonades et à la maturation de l'appareil génital.

Les hormones ovariennes non indispensables pour la mise en place de l'appareil génital femelle sont nécessaires à l'acquisition de sa fonctionnalité chez la femelle.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Les étapes de la différenciation des gonades.*
- *Les mécanismes déclencheurs de la puberté.*
- *Les étapes de la différenciation des organes génitaux externes.*
- *Les mécanismes moléculaires, cellulaires et tissulaires de la masculinisation et de la féminisation.*

Régulation physiologique de l'axe gonadotrope – intervention de trois niveaux de contrôle

La présentation du fonctionnement des gonades conduit à poser la question du contrôle de leur fonctionnement. La concentration plasmatique des hormones gonadiques, indispensable à la réussite de la reproduction, est le paramètre réglé.

Chez l'homme

En se référant au modèle de régulation de la glycémie étudié en première S, on aborde la régulation de la testostéronémie. La concentration plasmatique de testostérone peut être considérée comme variable dans un intervalle de faible amplitude. Cette concentration résulte de l'intensité de deux phénomènes permanents : la dégradation de l'hormone et sa sécrétion.

Le maintien de cette concentration à une valeur stable résulte d'une rétroaction négative (*feedback* négatif caractérisant un homéostat) exercée par l'hormone elle-même sur les différents niveaux de l'axe gonadotrope (hypothalamus et adéno-hypophyse) contrôlant sa sécrétion.

Le système de régulation est constitué comme suit :
– paramètre réglé : concentration plasmatique de testostérone ;

- fonction réglée : fonction de reproduction ;
- système réglant (capteurs, centre intégrateur, messagers et effecteurs) : complexe hypothalamo-hypophysaire et testicules (cellules interstitielles).

L'originalité de ce système par rapport à la régulation de la glycémie réside dans le mécanisme de neurosécrétion par l'hypothalamus de l'hormone gonadolibérine ou lulibérine (GnRH). Par son intervention, le fonctionnement de ce système de régulation peut être modulé par des messages de l'environnement externe ou interne.

L'hypothalamus est un capteur et un centre intégrateur : il intègre des stimulus périphériques (signaux hormonaux et nerveux) et y répond par la modulation de la sécrétion pulsatile de GnRH.

Le rôle des hormones du complexe hypothalamo-hypophysaire (GnRH, LH, FSH) est mis en évidence. La testostérone inhibe la sécrétion de GnRH et de gonadostimuline (LH) par l'axe hypothalamo-hypophysaire (rétroaction négative).

Limites (ne sont pas exigibles)

- *L'inhibine et son rôle.*
- *Le rôle des cellules de Sertoli et leur participation dans la spermatogenèse.*
- *Les différentes étapes de la spermatogenèse.*
- *Les aspects histologiques et cytologiques de l'axe hypothalamo-hypophysaire.*
- *La nature chimique des sécrétions endocrines.*
- *Les mécanismes d'action des hormones au-delà de la fixation à leur récepteur ne sont pas abordés. La localisation précise de ces récepteurs est hors programme.*
- *La localisation précise de cellules-cibles sur lesquelles s'exerce le rétrocontrôle négatif. L'élève cependant, doit être capable d'exploiter des documents relatifs aux sites d'action de ces hormones (tissu, organe).*

Chez la femme

La physiologie de l'axe gonadotrope chez la femme est plus complexe, elle permet une régulation de paramètres dont les variations sont quantitativement importantes et cycliques : les concentrations plasmatiques des hormones ovariennes.

Les hormones ovariennes contrôlent l'activité cyclique des effecteurs (utérus...) et sont indispensables à la fécondation et à une nidation éventuelle de l'embryon. Le cycle menstruel est ainsi défini.

Comme chez l'homme, les éléments du schéma régulateur sont dégagés :

- paramètre réglé : concentration plasmatique des hormones ovariennes ;
- fonction réglée : fonction de reproduction ;
- système réglant (capteurs, centre intégrateur, messagers et effecteurs) : complexe hypothalamo-hypophysaire et ovaires.

Le rôle des hormones du complexe hypothalamo-hypophysaire (GnRH, LH, FSH) est mis en évidence. On montre que la rigoureuse chronologie des sécrétions endocrines ovariennes repose sur deux types de rétroactions – rétroactions négative et positive – s'exerçant à des moments différents sur l'axe hypothalamo-hypophysaire :

- une rétroaction négative est exercée en début de phase folliculaire par l'œstradiol à faible concentration plasmatique ;
- une rétroaction positive en fin de phase folliculaire est exercée par l'œstradiol à concentration plasmatique élevée et maintenue pendant vingt-quatre heures ou plus (notion de servomécanisme: il s'agit du pilotage de la variation du *sens de la régulation* qui de négative devient positive) ;
- une rétroaction négative est exercée en phase lutéinique par le couple œstradiol/progestérogène.

L'accent est mis sur l'importance du pic de sécrétion de LH, déclencheur de l'ovulation et nécessaire à la mise en place du corps jaune ainsi que sur le rôle de l'hormone LH dans la production de progestérogène. La synchronisation des événements permettant la fécondation puis la nidation est soulignée.

Il est également important de souligner qu'en fin de cycle, la chute de la concentration d'œstrogènes et de progestérogène diminue les rétroactions négatives, entraînant ainsi la production accrue de FSH et le redémarrage du cycle.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *L'action des hormones ovariennes au niveau vaginal et mammaire.*
- *La connaissance de la localisation précise de cellules-cibles sur lesquelles s'exercent les rétrocontrôles. L'élève cependant doit être capable d'exploiter des documents relatifs aux sites d'action de ces hormones (tissus, organes).*
- *Les aspects histologiques et cytologiques de l'axe hypothalamo-hypophysaire.*
- *Les différentes étapes de l'ovogénèse.*
- *La coopération entre les cellules de la thèque et les cellules de la granulosa.*
- *La nature chimique des sécrétions endocrines.*
- *Les mécanismes d'action des hormones au-delà de la fixation à leur récepteur ne sont pas abordés. La localisation précise de ces récepteurs est hors programme.*

Rencontre des gamètes et début de grossesse

À partir des éléments du programme, une discussion sur les périodes de fécondité s'engage, qui se prolongera par la suite par la partie « Maîtrise de la procréation » (voir ci-après).

La disparition temporaire des menstruations et la sécrétion d'HCG par l'embryon, détectable dans le plasma et dans les urines, signalent le début de la grossesse.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Le principe du fonctionnement du test de grossesse.*
- *Les aspects histologiques, cytologiques et physiologiques de la nidation et de la gestation, mis à part la sécrétion d'HCG, la sécrétion de progestérogène (par le corps jaune) et leur rôle dans le maintien de la grossesse.*
- *Les modalités du développement embryonnaire.*

Aspect comportemental

L'étude du comportement reproducteur permet de souligner à nouveau l'importance des régulations hormonales dans la réussite de la reproduction puisqu'elles interviennent aussi dans le comportement reproducteur.

Les femelles de mammifères autres que les primates présentent un cycle œstrien marqué par l'acceptation du mâle (*œstrus*) qui favorise la fécondation. C'est le pic plasmatique d'œstrogènes précédant l'ovulation qui est responsable de ce comportement.

L'Homme est capable de maîtriser sa reproduction. Il peut dissocier le comportement sexuel et la reproduction.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Les cycles et les périodes de reproduction des différents groupes de mammifères.*
- *La description des comportements reproducteurs.*

Maîtrise de la procréation

Régulation des naissances

L'étude du principe de la contraception hormonale féminine est l'occasion de réinvestir les connaissances acquises sur la physiologie sexuelle chez la femme (niveau ovarien et niveau glaire cervicale). Cette partie est aussi l'occasion de rappeler l'ensemble des moyens contraceptifs et de discuter de certains d'entre eux du point de vue de leur efficacité.

Le principe d'action du RU486 (analogue structural de la progestérogène) permet de définir une méthode contraceptive et consolide les connaissances sur le mode d'action des hormones.

L'exemple de la pilule du lendemain (forte dose d'œstrogène et/ou de progestérogène) montre l'importance du respect des équilibres des concentrations plasmatiques hormonales à chaque moment du

cycle. Un déséquilibre brutal, selon le moment du cycle, empêche l'ovulation, la fécondation ou bloque la nidation.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *L'étude exhaustive des différentes molécules et dosages contraceptifs.*
- *Les mécanismes pharmacologiques de l'IVG (association RU486 et prostaglandines).*

Aide médicalisée à la procréation

Le suivi de la grossesse

L'exemple de recherche de la trisomie 21 permet d'introduire la notion de dépistage (analyse sanguine, échographie) et de diagnostic (amniocentèse ou choriocentèse) et de soulever les problèmes éthiques qui s'y rapportent.

Infertilité et procréation médicalement assistée

Le constat de la très grande diversité des causes d'infertilité des couples peut être l'occasion de réinvestir certaines connaissances de cette partie sur la procréation.

Le principe général de l'insémination artificielle, de la FIVETE et de l'ICSI, est décrit. C'est aussi l'occasion de soulever les problèmes éthiques liés aux progrès médicaux dans la maîtrise de la reproduction humaine (lien avec l'enseignement d'éducation civique, juridique et sociale).

Limites (ne sont pas exigibles)

- *La connaissance exhaustive des différentes techniques de surveillance de la grossesse et leur interprétation.*
- *La connaissance exhaustive des causes d'infertilité d'un couple.*
- *Les modalités des techniques de PMA.*
- *La liste exhaustive des différentes techniques de PMA.*
- *Les problèmes éthiques soulevés par la maîtrise de la reproduction humaine.*

Immunologie

■ 4 semaines. *Sciences de la vie.*

L'objectif de cette partie n'est pas de traiter toute l'immunologie en quatre semaines : des choix ont été faits et des concepts importants de l'immunologie n'ont pas été retenus. Plus que pour d'autres parties, la rédaction a été détaillée pour clarifier les limites et éviter les débordements.

Il s'agit, à partir de l'exemple du SIDA, de mettre en évidence des aspects fondamentaux du fonctionnement du système immunitaire. Cet exemple a été choisi pour son impact en matière de santé publique.

Le thème du programme de première S, « Du génotype au phénotype, relations avec l'environnement », trouve naturellement un prolongement dans cette partie.

Les notions de « stabilité et de variabilité au cours du temps », thèmes du programme de terminale S s'appliquent aussi parfaitement : complémentarité entre stabilité de l'organisme face aux éléments étrangers et variabilité du répertoire immunologique en fonction de l'environnement naturel ou imposé (vaccination). La distinction classique entre *immunité non spécifique* et *immunité spécifique* est obsolète. En effet, de nombreuses cellules du système immunitaire dites « non spécifiques » interagissent avec leur cible grâce à des récepteurs membranaires qui présentent un certain degré de spécificité. Les récepteurs des cellules dites « spécifiques » sont des récepteurs qui peuvent subir au cours de la réaction immunitaire une modification de leur structure qui améliore leur capacité de reconnaissance de l'antigène.

La distinction entre *immunité à médiation cellulaire* et *immunité à médiation humorale*, certes classique, est source de confusion dans l'esprit des élèves. On choisit donc de ne pas utiliser ces termes. On précise simplement que le système immunitaire fait intervenir des molécules solubles dans les liquides extracellulaires (anticorps) et des cellules (macrophages, lymphocytes...). On introduit maintenant les notions d'« immunité innée » et d'« immunité acquise ». L'immunité innée représente l'ensemble des processus qui mettent en jeu des éléments du système immunitaire immédiatement effecteurs lors de la première rencontre avec l'antigène.

Après cette première rencontre, un ensemble de processus qualitatifs et quantitatifs s'engage, conduisant à l'immunité acquise. Seuls certains de ces processus sont abordés dans le programme : sélection des lymphocytes B et T, expansion des clones, production de cellules mémoires et de certaines cellules effectrices.

Une maladie qui touche le système immunitaire – le SIDA (syndrome d'immuno-déficience acquise)

Il ne s'agit en aucun cas d'effectuer une étude complète descriptive ou épidémiologique du SIDA. Cet exemple imposé permet :

- d'aborder les particularités structurales et fonctionnelles des virus ;
- de présenter les effecteurs (anticorps, lymphocytes T cytotoxiques) de l'immunité acquise (du système immunitaire) lors de la description des différentes phases de l'infection ;
- de prouver le rôle essentiel des lymphocytes T4 dans les défenses de l'organisme ;
- de localiser les réactions immunitaires.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *L'étude de tout virus autre que le VIH n'est pas au programme.*
- *La nature, l'origine de l'enveloppe virale et les mécanismes de prolifération, de libération du virus.*
- *Les protéines membranaires récepteurs du virus, autres que le CD4.*
- *Les traitements contre le VIH.*

Les processus immunitaires mis en jeu – généralisation

Compte tenu du temps imparti à l'étude de cette partie, des concepts majeurs de l'immunologie ne sont pas étudiés :

- Le concept de double reconnaissance (rôle du CMH) n'est pas étudié. On dit simplement que des cellules

infectées expriment à leur surface des « fragments » de l'antigène (fragments peptidiques issus des protéines du pathogène) que n'expriment pas les cellules saines. Les cellules infectées peuvent ainsi être reconnues par des lymphocytes T cytotoxiques spécifiques.

– Le concept de cellule présentatrice de l'antigène n'est pas abordé. En conséquence, l'activation des lymphocytes T4 n'est pas non plus expliquée. On se limite à la notion suivante: des cellules modifiées par la présence de peptides issus de l'antigène stimulent les lymphocytes T4 spécifiques de cet antigène, ces lymphocytes T4 deviennent sécréteurs de messagers chimiques (interleukines) indispensables à la majorité des réactions immunitaires acquises.

Le principe des réactions immunitaires (sélection clonale, différenciation) est étudié en prenant comme exemple les lymphocytes B, puis étendu aux lymphocytes T.

– Le rôle du complément dans l'élimination du complexe immun n'est pas abordé. Il suffit que les élèves comprennent qu'une coopération entre mécanismes innés et mécanismes acquis se réalise: la phagocytose des complexes immuns suffit à la compréhension de cette coopération.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *Les mécanismes d'élimination autres que la phagocytose.*
- *La mise en jeu des protéines du complément.*
- *L'origine des cellules immunocompétentes.*
- *Les différents types d'immunoglobulines.*
- *Les relations du système immunitaire avec la peau et le cerveau.*
- *L'étude des étapes de sélection, multiplication, différenciation, intervention des lymphocytes T4.*
- *L'étude de la nature des récepteurs T et des mécanismes de présentation des peptides antigéniques par les cellules présentatrices de l'antigène.*
- *Le CMH, son origine et ses rôles.*
- *Les cellules tueuses NK.*
- *Les réactions allergiques.*

Les vaccins et la mémoire immunitaire

On fera bien comprendre qu'à un instant t, il existe dans l'organisme de nombreux clones de lymphocytes T et B: les clones diffèrent par leurs récepteurs spécifiques. Cette très grande diversité du répertoire immunitaire est le résultat d'une expression complexe du génome. L'élève doit saisir que la réponse à l'existence de milliards de molécules antigéniques nécessite des mécanismes génétiques particuliers, puisqu'il n'existe pas les milliards de gènes correspondant aux milliards de récepteurs spécifiques impliqués dans les réponses immunitaires. Néanmoins, les mécanismes de cette diversité ne sont pas au programme.

La population qui constitue chaque clone de LT ou de LB est restreinte. Lorsque l'organisme entre en contact avec un antigène (environnement modifié), certaines populations voient leurs effectifs augmenter et il apparaît des lymphocytes B et T4 mémoire, spécifiques de cet antigène. Le phénotype immunitaire d'un individu évolue donc en même temps qu'évolue son environnement antigénique. L'évolution permanente du phénotype immunitaire permet le maintien de l'intégrité de l'organisme.

La vaccination réalise un contact avec un antigène (tout ou partie d'un agent pathogène rendu inoffensif) et prépare à un contact ultérieur possible avec l'agent pathogène portant le même antigène (construction d'une mémoire). La vaccination fait donc évoluer artificiellement le phénotype immunitaire de l'individu.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *L'étude des différents types de vaccins.*
- *Les mécanismes de diversité et de formation des clones de lymphocytes B et T.*
- *Les mécanismes de la délétion et/ou de l'inactivation de clones autoréactifs.*
- *Les maladies auto-immunes.*



couplage des événements biologiques et géologiques au cours du temps

■ 1 semaine $\frac{1}{2}$.

Sciences de la vie et sciences de la Terre.

Depuis l'apparition de la vie, la Terre est le siège d'interactions entre le monde vivant et les enveloppes fluides ou solides de la planète. Dans le cadre de l'horaire imparti, un seul sens de cette interaction est envisagé, celui de l'influence des événements ayant affecté la surface de la Terre sur le monde vivant. Le degré de cette influence a été variable au cours du temps.

On n'envisage dans cette partie que les périodes pendant lesquelles l'influence des événements qui ont affecté la surface de la Terre a été particulièrement importante pour les changements de la biosphère.

Dans la biosphère comme dans la géosphère, une crise est une discontinuité majeure à l'échelle planétaire et à l'échelle des temps géologiques qui sépare des périodes de plus grande stabilité.

La limite Crétacé-Tertiaire – un événement géologique et biologique majeur

La notion d'environnement planétaire abordée en seconde est réinvestie ici : un événement catastrophique local a des conséquences à l'échelle de la planète.

Parmi les grandes coupures référencées dans l'échelle stratigraphique internationale, on s'intéresse plus particulièrement au passage du Crétacé au Paléocène.

Les bouleversements de la géosphère sont considérés à l'origine des changements de la biosphère. En ce qui concerne la diversification après la crise, on se limite à un constat.

Cet exemple peut être utilisé pour renforcer l'idée du caractère non prévisible de l'évolution qui résulte de la combinaison des innovations génétiques, d'une part, et de la sélection naturelle, d'autre part.

La limite Crétacé-Tertiaire a été définie au XIX^e siècle par des changements faunistiques. Par la suite, des analyses stratigraphiques précises ont mis en évidence

l'existence d'une fine couche de composition caractéristique, intercalée dans des séries d'environnements sédimentaires variés en des lieux répartis sur toute la surface de la Terre. Cette couche souvent nommée « couche à iridium » sert de repère temporel à l'étude des changements biologiques qui ont affecté la diversité du monde vivant.

Le nombre de groupes systématiques peuplant les milieux continentaux et les milieux océaniques chute. On souligne que les extinctions d'espèces constatées à cette période coïncident avec les événements géologiques et cosmiques suivants : trapps du Deccan, cratère d'impact d'astéroïde de Chixculub (Mexique). Il n'y a pas lieu d'engager une discussion sur l'importance relative des deux hypothèses.

L'exploitation de documents géologiques divers (échantillons, carottes ou logs de forages, coupes, cartes, relevés faunistiques et floristiques, photographies) permet d'établir les changements biologiques (extension ou permanence de faune et de flore) à la limite Crétacé-Paléocène, dans les milieux pélagiques, benthiques et continentaux. Cette étude implique le réinvestissement des principes élémentaires de la stratigraphie et des notions de fossiles stratigraphiques acquis auparavant.

Il est attendu des élèves qu'ils puissent citer, parmi les formes disparues, les ammonites, les dinosaures, les foraminifères. En revanche, si des noms d'espèces figurent sur certains documents, aucune espèce n'est à retenir, *a fortiori* à reconnaître. De même, aucune liste n'est exigible en ce qui concerne les formes qui survivent à la crise, et celles qui apparaissent à la suite de celle-ci.

Les crises biologiques, repères dans l'histoire de la Terre

Dans cette partie, l'analyse des archives paléontologiques conduit à l'idée que d'autres crises biologiques sont survenues au cours de l'histoire de la planète.

On recherche les événements géologiques susceptibles d'expliquer les crises biologiques observées. Il est possible d'établir des corrélations entre extinctions massives, épisodes volcaniques comparables à celui des trapps du Deccan et/ou traces de collision avec astéroïdes.

On exige la reconnaissance de l'existence d'une crise mais pas la mémorisation des crises autres que la crise Crétacé-Tertiaire, ni des marqueurs biologiques et géologiques qui les caractérisent.

Limites (ne sont pas exigibles)

– *Les données géologiques associées au cratère d'impact.*

– *L'analyse de la complexité des conséquences climatiques des impacts météoritiques et du volcanisme.*

– *La connaissance d'un calendrier des événements géologiques (mais on peut l'utiliser comme document).*

En conclusion, on évoque l'action de l'Homme sur la biodiversité et sur les conditions physico-chimiques de la planète. Cette conclusion ne fera pas l'objet de questions au baccalauréat.