

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

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 DUBACQ 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 hominés 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 identifiés soient nos ancêtres.

Les débats et les incertitudes concernant l'identification et la classification des différents fossiles d'hominés 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 :

$$\begin{aligned} N^{87}\text{Sr} &= (N^{87}\text{Rb})_{\text{initial}} - N^{87}\text{Rb} \\ N^{87}\text{Sr} &= (N^{87}\text{Rb})_{\text{initial}} [1 - \exp(-\lambda t)], \\ \text{en utilisant [1]} : \\ N^{87}\text{Sr} &= N^{87}\text{Rb} \times [\exp(\lambda t) - 1]. \end{aligned}$$

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 :

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

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 :

$$\left[\left(\frac{N^{87}\text{Rb}}{N^{86}\text{Sr}} \right)_{\text{mesuré}} \quad \left(\frac{N^{87}\text{Sr}}{N^{86}\text{Sr}} \right)_{\text{mesuré}} \right]$$

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 $\left(\frac{N^{87}\text{Sr}}{N^{86}\text{Sr}} \right)_{\text{initial}}$).

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

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

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 graniotoïdes

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 graniotoïdes, 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 graniotoïde (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 graniotoïdes, 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.

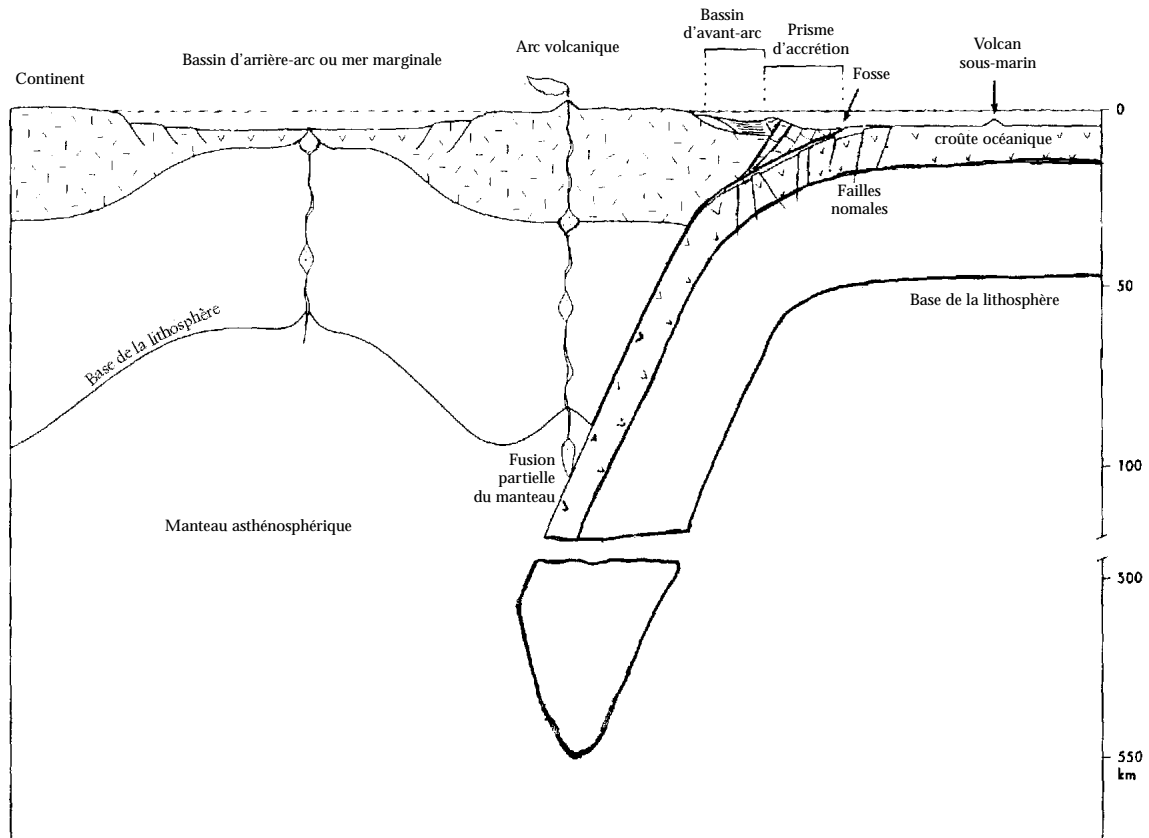
Sans que cela puisse faire l'objet d'une question à l'examen, on peut évoquer le processus d'érosion qui, couplé à la poussée d'Archimède s'appliquant à la racine crustale, est présenté comme un des moteurs du retour à une épaisseur normale de la croûte.

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

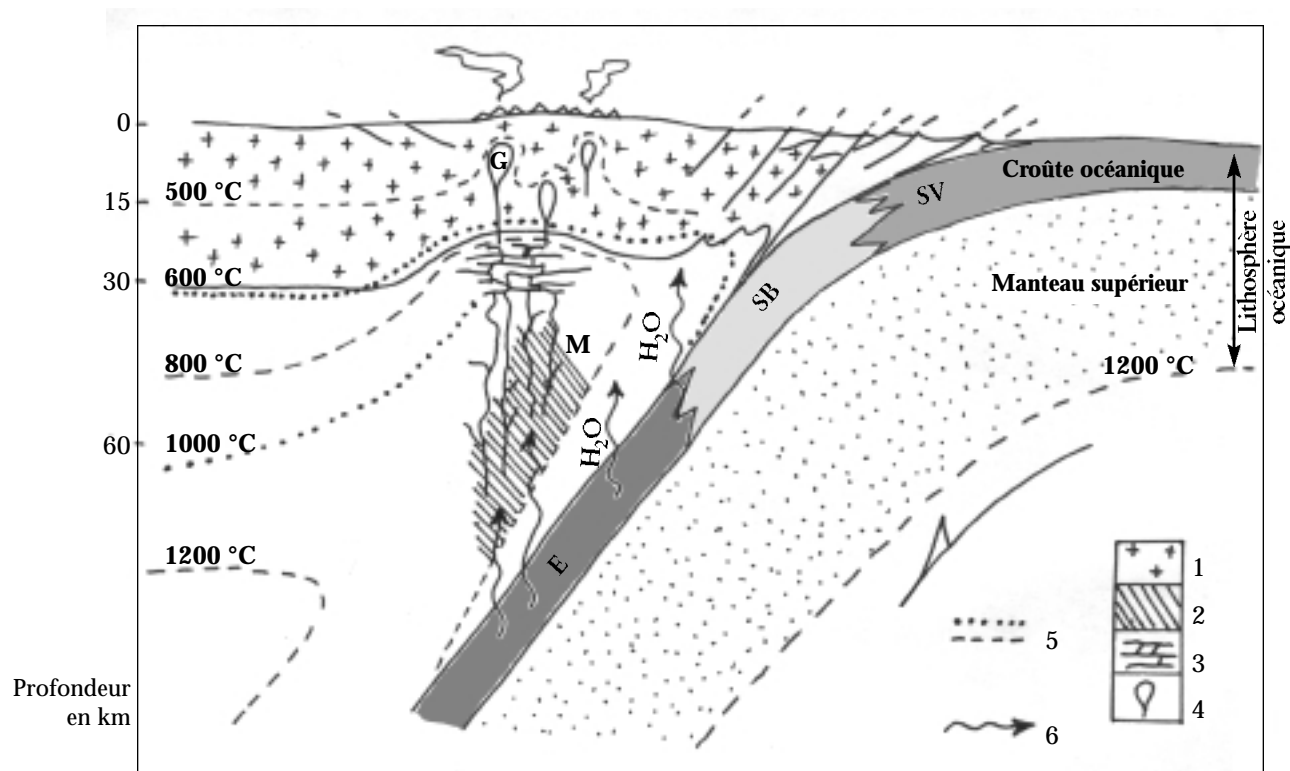
Les quatre figures présentées ci-après ont été conçues comme complément d'information pour le professeur. Elles ne constituent pas dans leur totalité une connaissance exigible pour les élèves.

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.

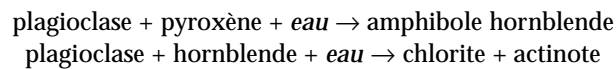
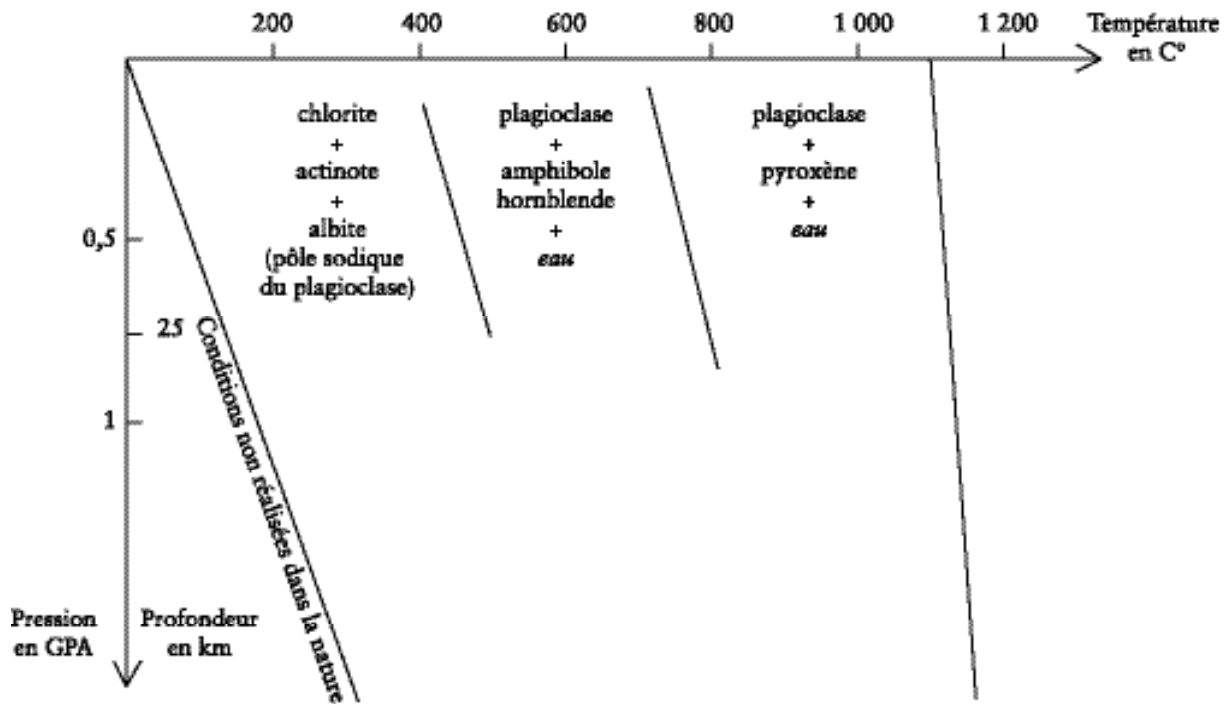
5. Tracés des isothermes.

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.

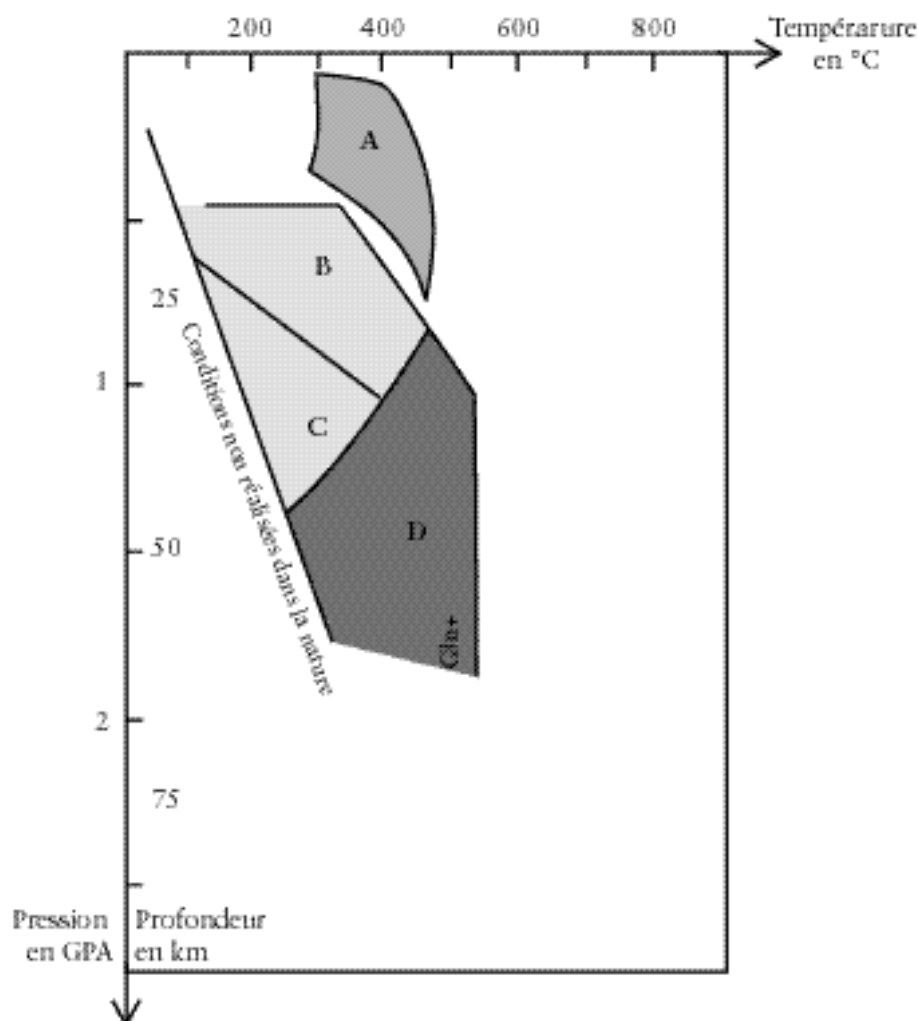


Rappel du programme de première S

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 :

$$\text{plagioclase} + \text{chlorite} \rightarrow \text{glaucophane} + \text{H}_2\text{O}.$$

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 antimüllerienne 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'ovogenèse.*
- *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 sécrétors 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.

Enseignement de spécialité



u passé géologique

à l'évolution future de la planète

■ 7 semaines.

Sciences de la Terre.

La spécialité en sciences de la Terre se concentre sur les variations du climat et les variations du niveau de la mer au cours de l'histoire de la Terre. Les objectifs de cet enseignement sont les suivants :

- 1) Établir que des phénomènes et événements géologiques majeurs qui se produisent à la surface de la Terre ont des causes qui sont liées au fonctionnement de l'intérieur de la planète, mais aussi au fait que la Terre appartient au système solaire et subit l'influence du Soleil.
- 2) Découvrir la richesse des enregistrements dans les roches, sédiments et glaces des changements de l'environnement de la Terre au cours du temps.
- 3) Rechercher les mécanismes physiques élémentaires qui permettent d'expliquer et de quantifier l'ampleur des changements climatiques et du niveau de la mer au cours du temps.
- 4) Faire le lien, quand il existe, entre les phénomènes biologiques et géologiques dans la régulation du climat (ex. : baisse du taux de CO₂, augmentation du taux de l'O₂ et glaciation lors du carbonifère).
- 5) Montrer que la recherche des mécanismes qui contrôlent la variation des climats de la Terre dans le passé est importante pour appréhender l'évolution future de notre environnement. En dehors de l'aspect purement scientifique, cette partie du programme doit aussi être l'occasion de sensibiliser les élèves à la gestion de l'environnement qui les entoure (accords internationaux, protocole de Kyoto).

Il s'agit d'initier aux raisonnements qui permettent la reconstitution des climats de la Terre et les variations du niveau de la mer. Ces raisonnements reposent sur l'application du « principe d'actualisme ».

Les climats passés de la planète

Les changements climatiques des 700 000 dernières années

Le premier objectif est de reconstituer à partir d'indices physico-chimiques les climats de la Terre dans un passé géologiquement très récent. On utilise les variations du rapport isotopique ¹⁸O/¹⁶O (noté δ¹⁸O, delta isotopique de l'oxygène ; voir annexe p. 42) des glaces polaires dans un premier temps, celles des tests de foraminifères des sédiments océaniques dans un second temps.

Les prérequis portent sur la notion d'isotopes stables, en prenant comme support les isotopes ¹⁶O et ¹⁸O de l'oxygène, sur la possibilité de déterminer par une méthode analytique le rapport de ces isotopes dans un matériel glaciaire ou sédimentaire, et sur la notion de delta isotopique.

À partir des données que constituent les variations du δ¹⁸O des glaces, divers aspects de la pratique scientifique peuvent être mobilisés :

- extraction d'informations pertinentes à partir de données analytiques ; appréciation de la concordance des informations tirées de données portant sur des lieux différents (ex. : Groenland, Antarctique) ;
- recherche de la signification des faits constatés à partir de l'exploitation de données sur le δ¹⁸O des précipitations en divers lieux ;
- mise en évidence d'une corrélation entre le delta isotopique de l'eau de pluie ou de la neige et la température ;
- exploitation de cette corrélation pour convertir les variations du δ¹⁸O des glaces en changements de température ; évaluation quantitative de ces changements. D'autres aspects de la pratique scientifique peuvent être mobilisés :
- conception d'un modèle de la Terre en rapport avec le problème posé : système clos où le volume d'eau et le δ¹⁸O global de l'eau terrestre est

constant, existence de réservoirs de volume inégal où le $\delta^{18}\text{O}$ n'est pas le même, existence de flux entre ces réservoirs ;

- prévision de l'évolution du $\delta^{18}\text{O}$ d'un compartiment (réservoir océanique) quand la répartition de l'eau entre les divers compartiments change ; pour l'océan, le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau et ses variations sont déduites des variations du $\delta^{18}\text{O}$ des tests de foraminifères benthiques (voir annexe p. 42) ;
- établissement d'un système de relations entre plusieurs paramètres : volume des glaces, $\delta^{18}\text{O}$ des glaces, $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau des océans, $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates des tests ;
- discussion sur la concordance des conclusions extraites de l'étude des glaces et des sédiments.

Le deuxième objectif est de rechercher l'étendue planétaire des changements climatiques à partir d'un autre type de données : les pollens, recueillis en des lieux différents.

Les mécanismes de formation des modelés glaciaires (moraine...) ne sont pas au programme mais l'existence de ces modelés peut être utilisée pour retrouver les climats anciens.

Le troisième objectif est de rechercher les causes possibles des variations climatiques des 700 000 dernières années, de l'alternance de périodes glaciaires et des périodes interglaciaires. Les acquis de la seconde doivent conduire les élèves à proposer des explications (connaissances sur les mécanismes à l'origine des températures de la Terre). C'est donc l'occasion de confronter de nouvelles données à ces hypothèses, de développer l'esprit critique en ne confondant pas corrélation et causalité dans un seul sens (température et CO_2), de faire saisir la complexité des interactions.

Les cycles de réchauffement/refroidissement observés entre deux maximums glaciaires avec des périodes de 43 000 ans, 24 000 ans et 19 000 ans peuvent être signalés.

Les variations de température induites par les phénomènes astronomiques sont amplifiées par leurs rétroactions positives sur les variations de l'albédo de la planète et de la teneur en CO_2 atmosphérique.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *L'étude de chacune des glaciations en tant que telle.*
- *Les mécanismes de fractionnement isotopique de l'oxygène.*
- *Les interactions entre les différents phénomènes qui modulent l'effet astronomique.*
- *L'étude des paramètres orbitaux de la Terre.*
- *Le $\delta^{18}\text{O}$ relatif aux foraminifères planctoniques.*

Les changements climatiques aux plus grandes échelles de temps

La reconstitution des climats du Carbonifère et du Crétacé moyen, à partir de données paléontologiques, sédimentologiques et morphologiques nécessite aussi de prendre en compte la situation et la répartition des masses continentales à ces époques. La prise de conscience de l'importance des changements climatiques de la Terre au cours de son histoire est ainsi établie. Une vue d'ensemble de l'évolution climatique depuis le Crétacé jusqu'à aujourd'hui présente l'intérêt de sensibiliser à la nécessité de prendre en compte les échelles de temps : les alternances de périodes glaciaires et interglaciaires précédemment envisagées apparaissent comme des changements rapides au sein d'une période froide marquée par la formation de la calotte glaciaire antarctique il y a vingt millions d'années environ.

La perception de l'échelle de temps doit conduire l'élève à saisir que les mécanismes explicatifs des changements climatiques du Pléistocène, notamment ceux liés aux variations d'insolation engendrées par les modifications orbitales, ne peuvent rendre compte de l'installation d'un climat glaciaire ou d'une période chaude pendant des dizaines de millions d'années. Dans la recherche d'explications, on cible sur les paramètres qui modifient l'ampleur de l'effet de serre et que les élèves connaissent : changement d'albédo et concentrations en CO_2 . L'hypothèse de changements de longue durée de ces paramètres étant émise, les élèves sont conduits à la tester à partir de l'analyse de données multiples faisant intervenir les processus physico-chimiques et géologiques inscrits au programme : développement des plantes au Carbonifère et piégeage de la matière organique, accroissement de l'altération des roches en relation avec les orogénèses, accroissement de l'activité des dorsales et du volcanisme au Crétacé... La liaison avec la partie « Diversité et complémentarité des métabolismes » facilite la perception de l'importance de la fossilisation de la matière organique.

Les équations chimiques des réactions de précipitation/dissolution des carbonates, d'une part, et des réactions d'altération des silicates calciques, d'autre part, illustrent les flux de CO_2 entre les différents réservoirs. En effet, ces équations montrent que la seule précipitation/dissolution des carbonates a un bilan nul sur la quantité de CO_2 présent dans l'atmosphère sur les grandes périodes de temps. En revanche, le couplage de ces réactions avec celles de l'altération des silicates est le mécanisme chimique qui explique le piégeage de CO_2 atmosphérique dans les roches carbonatées sur les grandes périodes de temps. Par ailleurs, les éruptions volcaniques massives introduisent dans le système océan-atmosphère des quantités appréciables de CO_2 .

Les études ainsi réalisées doivent faire prendre conscience de la complexité du système climatique de la Terre. On peut sensibiliser l'élève à l'idée que les scientifiques testent leurs hypothèses explicatives à l'aide de modèles reposant sur des relations entre les divers paramètres. Ces modèles constamment affinés pour rendre compte des climats d'un passé plus ou moins lointain sont nécessaires pour prévoir des scénarios des climats du futur.

Les changements brutaux des climats dus aux activités humaines (ex. : augmentation brutale des gaz à effet de serre) amènent à prendre en compte dans ces modèles des vitesses différentes d'évolution des paramètres.

Ce réchauffement dû à l'effet de serre, à l'échelle du siècle, se superpose à un refroidissement de plus grande ampleur commencé il y a vingt millions d'années (notamment, mise en place d'une calotte glaciaire polaire). La notion de refroidissement ou de réchauffement des climats observé à un moment donné dépend de l'échelle de temps à laquelle on l'analyse.

On signale l'existence d'autres périodes glaciaires, mais aucune étude sur les processus ayant pu conduire à leur genèse n'est au programme.

Limites (ne sont pas exigibles)

– *L'étude des mécanismes à l'origine des traces de changements climatiques.*

– *L'étude des processus de maturation et de conservation des roches carbonées ainsi que l'étude du dégazage du manteau.*

– *Le principe des reconstitutions paléogéographiques.*

– *La présentation et l'utilisation de données isotopiques de l'oxygène des carbonates du Carbonifère et du Crétacé.*

Les variations du niveau de la mer

Cette partie prolonge celle des changements climatiques et la référence aux conséquences sur le niveau des mers du réchauffement climatique anthropique est une piste possible pour l'introduire.

La prise en compte de l'importance quantitative des divers réservoirs impliqués dans le cycle de l'eau doit permettre la formulation d'hypothèses sur les facteurs pouvant entraîner des variations du niveau de la mer au cours des temps géologiques. L'analyse de données relatives au Crétacé et au Pléistocène, examinées de façon quantitative, permet de les tester. Ainsi on établit qu'au Crétacé la seule absence de calottes glaciaires permanentes ne suffit pas à rendre compte du niveau des mers fourni par les données géologiques, et qu'il faut y adjoindre une diminution du volume des bassins océaniques. Cette dernière étant causée par une augmentation de l'activité des dorsales, on rejoint l'explication du climat chaud de cette époque. C'est cette cohérence entre les données diverses qui valide les explications proposées.

Les isotopes stables de l'oxygène, marqueurs des variations climatiques et du niveau de la mer

Les carottes de glace forées dans les calottes polaires et les carottes sédimentaires des fonds océaniques ou lacustres permettent de reconstituer les variations climatiques des 700 000 dernières années. Le rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) est un outil performant pour l'étude des paléotempératures et des variations du volume des glaces à la surface de la Terre. Les variations de températures sont déduites de la composition isotopique de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de la glace ou des carbonates (CaCO_3) des tests d'organismes fossilisés. Il ne s'agit pas d'expliquer les mécanismes de fractionnement isotopiques, mais les élèves doivent en comprendre les fondements et leurs utilisations.

Isotopes de l'oxygène et archives glaciaires

La lecture des variations du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) repose sur les propriétés suivantes. Les mesures de composition isotopique de l'oxygène montrent que la proportion de ^{18}O dans les eaux de pluie et les précipitations neigeuses actuelles diminue avec la température (figure 1). C'est cette propriété qui est à l'origine de l'interprétation des mesures du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) dans les glaces en terme de température. On trouve souvent dans les ouvrages une notation, $\delta^{18}\text{O}$, pour exprimer les changements de composition isotopique de l'oxygène. Cette notation est simple, elle s'écrit :

$$\delta^{18}\text{O} = \left\{ \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{échantillon}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}}} \right\} \times 1000$$

Au lieu d'utiliser les quantités absolues des isotopes, on utilise les rapports ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) qui donnent en fait des proportions. Cette notation est introduite pour deux raisons.

La première concerne la nécessité d'avoir une référence par rapport à laquelle on compare des compositions isotopiques. La valeur référence du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) est celui de la moyenne de l'eau de l'océan actuel (SMOW = Standard Mean Ocean Water).

La deuxième raison d'utilisation de la notation $\delta^{18}\text{O}$ est liée à la faible abondance de l' ^{18}O dans l'eau (facteur multiplicatif 1000). La valeur de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer actuelle vaut 0 ‰. Un exemple permet de comprendre la manipulation de cette équation.

La valeur moyenne du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de l'eau de mer actuelle est de 2.10^{-3} . La mesure de ce rapport dans la neige d'une station au Groenland où la température moyenne sur l'année est de -30°C donne ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) = $1,93.10^{-3}$. En introduisant ces données dans l'équation qui définit $\delta^{18}\text{O}$ on obtient :

$$\delta^{18}\text{O} = \left\{ \frac{1,93.10^{-3} - 2.10^{-3}}{2.10^{-3}} \right\} \times 1000 = -35$$

L'usage est de dire que la valeur vaut « - 35 pour mille » et s'écrit $\delta^{18}\text{O} = -35 \text{ ‰}$.

Figure 1. Variations de la composition isotopique de l'oxygène des précipitations de différentes localités en fonction de la moyenne des températures annuelles de l'air. La pente de cette droite est de $0,7 \text{ ‰} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

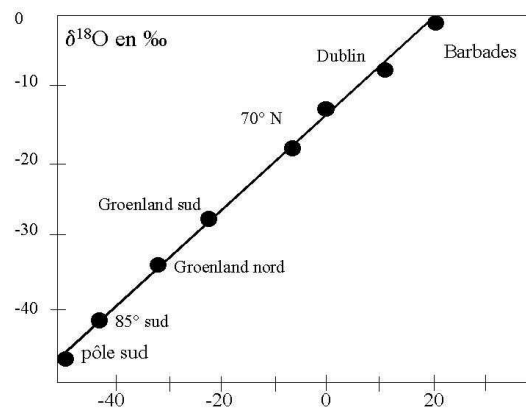
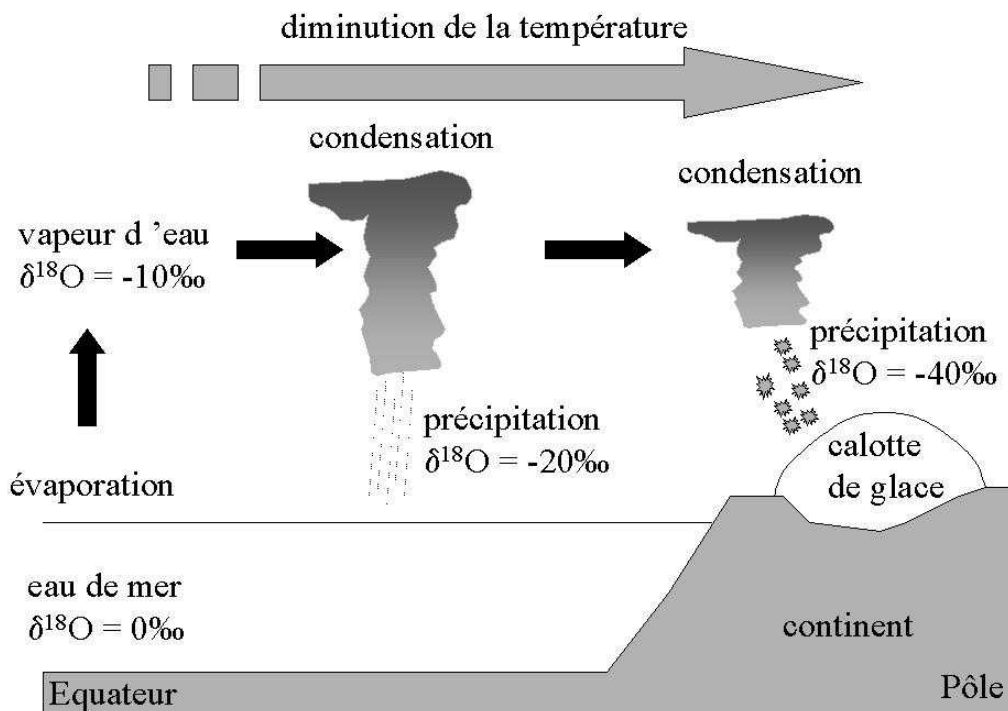


Figure 1. Moyenne des températures annuelles en °C.

Un schéma général du cycle de l'eau permet de cadrer l'origine des variations du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) des précipitations. Sur Terre, l'essentiel de l'évaporation de l'eau se fait à partir de l'océan dans les zones équatoriales. La vapeur d'eau formée (c'est un gaz) est appauvrie en ^{18}O par rapport à l'eau de l'océan dont elle est issue. L'air humide ainsi formé est transporté par la circulation atmosphérique générale vers les hautes latitudes. L'air perd progressivement son humidité à mesure qu'il se rapproche des pôles par des condensations successives (passage de l'eau de l'état gaz à l'état liquide). À chaque condensation, la vapeur d'eau (le gaz) s'appauvrit en isotope lourd (^{18}O), celui-ci se retrouvant préférentiellement dans la phase liquide à l'origine des précipitations. Plus la température du lieu de condensation est basse, plus la masse d'air a subi depuis sa formation un processus de condensation poussée et plus la teneur en isotope lourd (^{18}O) de la vapeur d'eau sera faible. Ainsi, de nos jours, de l'eau évaporée au niveau de l'équateur et précipitée au niveau de l'Antarctique sous forme de neige contient environ 4 % d' ^{18}O de moins que l'eau de mer dont elle est issue (son $\delta^{18}\text{O}$ est de l'ordre de -40 ‰).

Figure 2. Cycle de l'eau et variation de la composition isotopique de l'oxygène.



En un lieu donné, les variations de température moyenne au cours du temps sont enregistrées dans les précipitations. Reprenons l'exemple du Groenland (figure 3) : la calotte de glace s'y forme par accumulation et tassement progressif de la neige au fil des années. Si l'on identifie et date les diffé-

rentes couches de neige et que l'on mesure le rapport (¹⁸O/¹⁶O) dans ces différentes couches, on obtient par les variations observées de δ¹⁸O les changements de la température de l'air au cours du temps au-dessus du Groenland.

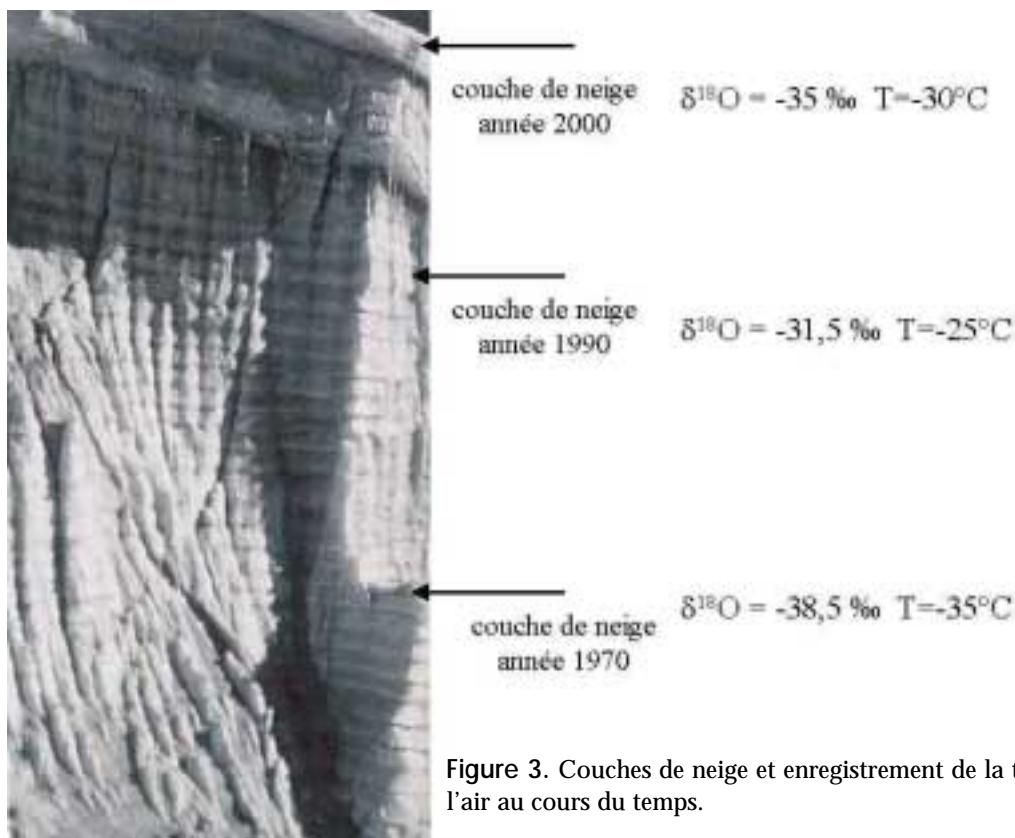


Figure 3. Couches de neige et enregistrement de la température de l'air au cours du temps.

L'analyse des carottes de plusieurs milliers de mètres des forages sur les calottes polaires permet en mesurant le rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de la glace en fonction de la profondeur de mettre en évidence les variations locales (au dessus du lieu de forage) de la température de l'air au cours des 400 000 dernières années.

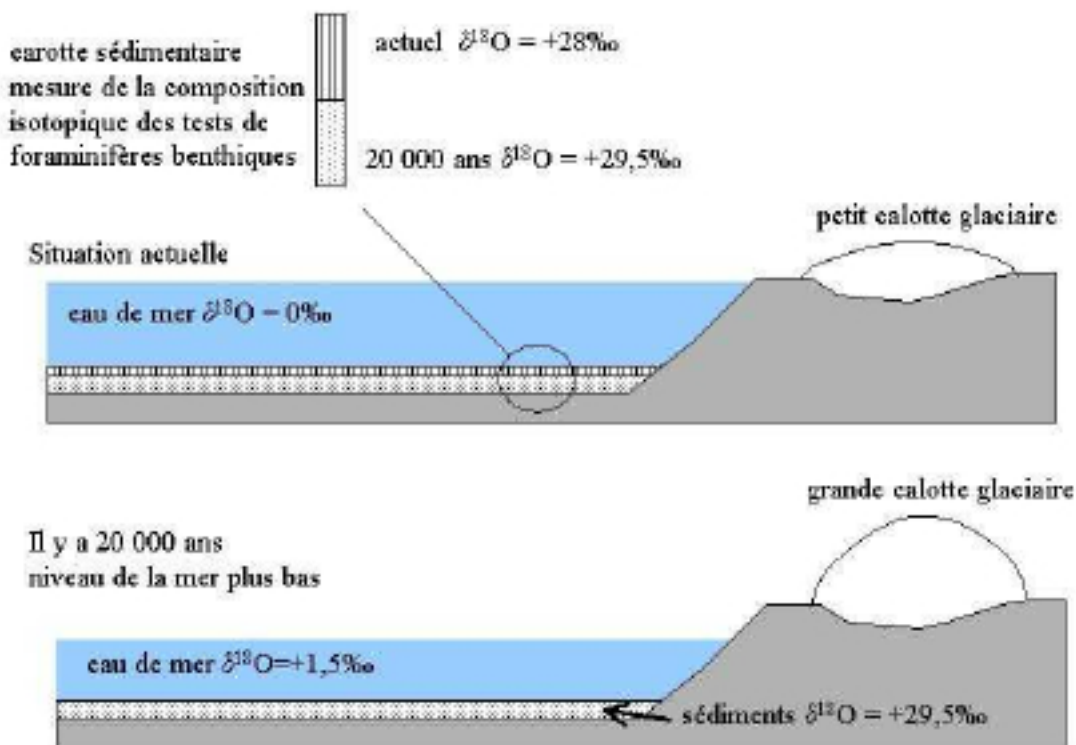
Isotopes de l'oxygène dans les tests carbonatés du plancton et variations du niveau de la mer

Le rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) dans les tests carbonatés des foraminifères dans les sédiments océaniques récents est un traceur des variations du niveau de la mer et de l'extension des calottes polaires au cours du temps. Lors du processus d'évaporation au dessus de l'océan, si la vapeur d'eau formée est appauvrie en ^{18}O , l'eau de l'océan quant à elle est enrichie relativement en ^{18}O . Cet enrichissement de l'eau de mer moyenné sur l'ensemble de l'océan reste négligeable tant que la quantité d'eau évaporée est faible et que le cycle de l'eau est à l'équilibre (*i.e.* il sort de l'océan par évaporation autant d'eau qu'il en rentre par les fleuves et les précipitations). Cela revient à dire que tant que le volume de l'océan ne change pas significativement, le $\delta^{18}\text{O}$ moyen de l'eau de mer ne varie pas.

Lors des périodes glaciaires l'extension des calottes augmente, un volume significatif d'eau est ainsi transféré de l'océan pour être stocké sous forme de glace et le niveau de l'océan baisse. Plus l'extension des

calottes (pauvres en ^{18}O) est importante plus l'eau de mer est enrichie en ^{18}O . Dans ces cas, le $\delta^{18}\text{O}$ moyen de l'eau de mer est supérieur à celui de l'océan actuel. Le rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de l'océan dans le passé ne peut pas être déterminé directement. Il peut en revanche l'être indirectement par l'étude des coquilles (tests) calcaires des foraminifères fossilisés et accumulés au cours du temps dans les sédiments. Ces organismes élaborent leurs tests carbonatés (CaCO_3) à partir d'éléments chimiques en solution dans l'eau de mer et en particulier à partir de l'oxygène. Cependant quelques précautions sont à prendre. En effet, la quantité de ^{18}O incorporée dans la coquille au moment de sa fabrication dépend non seulement du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de l'eau mais aussi de sa température. On peut contourner cette double dépendance en étudiant les espèces de foraminifères qui vivent à grande profondeur, sous la thermocline. Les eaux profondes sont en effet à une température très basse, peu variable et proche de la température de congélation de l'eau. Lors des glaciations il est peu probable que les eaux profondes soient à une température différente de celle observée actuellement. Les tests des foraminifères de grande profondeur (foraminifères benthiques) des sédiments océaniques peuvent donc être utilisés pour étudier les variations de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer au cours du temps. Ils donnent accès à la variation du niveau des océans et du volume des glaces et donc aux changements climatiques globaux qui affectent la Terre dans le passé.

Figure 4. Variation du niveau de la mer et variation de la composition isotopique de l'eau de mer et des tests de foraminifères benthiques.



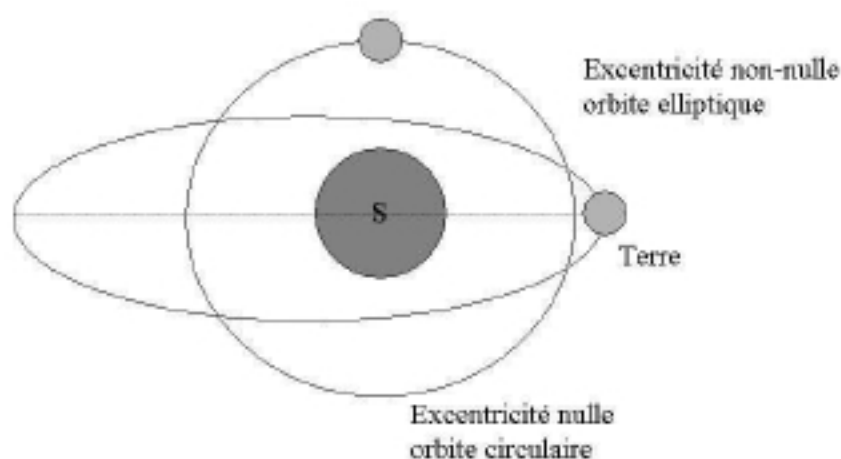
Les variations du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) observées pour les 400 000 dernières années dans les glaces sont parfaitement corrélées à celles mesurées pour la même période de temps dans les sédiments océaniques. La mise en évidence de cette corrélation entre enregistrements par les glaces et par les sédiments permet, par la caractérisation de sédiments vieux de plus de 400 000 ans, d'étendre à plus de 700 000 ans l'étude des changements climatiques majeurs de la planète.

La globalité du changement climatique et la corrélation avec la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère

Le synchronisme des différents indicateurs de changements climatiques montre que ces derniers affectent l'ensemble de la planète. Les témoins morphologiques et sédimentaires sur les continents à des latitudes tempérées (moraines, terrasses, vallées en U... dont les mécanismes de genèse et la description détaillée ne sont pas au programme), attestant de l'extension des glaciers, sont synchrones des variations de température mesurées dans les sédiments récents et les carottes de glaces.

Les variations de température sont corrélées à des variations de concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. En effet les carottes de glace fossile nous renseignent également sur les changements passés de la composition de l'atmosphère : au fur et à mesure que la neige s'accumule et se transforme en glace au niveau des calottes polaires, des bulles d'air se retrouvent piégées en son sein. L'analyse de la composition chimique de ces bulles, et non de la glace hôte, permet de déterminer la teneur en gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4) au cours du temps et de la corréler aux variations de température déduites du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) obtenu sur la glace qui entoure les bulles.

Figure 5. Changement d'excentricité de l'orbite de la Terre.



Les changements climatiques – reflet d'un système complexe

Le mouvement de la Terre autour du Soleil et la rythmicité des changements climatiques

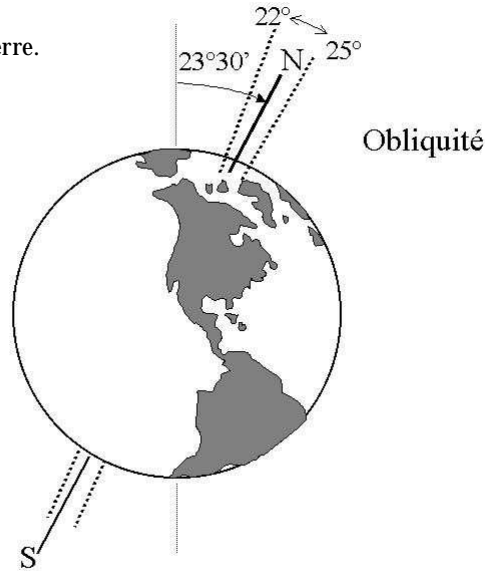
Les évolutions du climat mises en évidence par l'étude des archives géologiques sont interprétables par des modèles. Les périodicités observées dans les changements de température de l'atmosphère et l'extension des calottes de glace peuvent être mises en relation avec les variations régulières des paramètres orbitaux de la Terre : obliquité de l'axe de rotation de la Terre, excentricité de l'orbite de la Terre, précession des équinoxes. Ces paramètres déterminent la répartition et les variations au cours du temps de l'énergie solaire reçue aux différentes latitudes (voir programme de la classe de seconde). Il s'agit de définir brièvement ces trois paramètres orbitaux et de montrer comment ils modifient la quantité d'énergie solaire reçue par la Terre et en particulier l'intensité du cycle des saisons. Il ne s'agit pas de justifier les causes qui en sont à l'origine.

– La Terre décrit autour du soleil une trajectoire elliptique (figure 5). L'excentricité de cette trajectoire (qui mesure l'aplatissement de l'ellipse) varie de 0 % (orbite circulaire) à un maximum de 6 % (ellipse légèrement aplatie) avec des périodes proches de 400 000 et 100 000 ans. Lorsque l'orbite est circulaire, la distance entre la Terre et le Soleil ne change pas au cours de l'année, lorsqu'elle est elliptique le contraste entre été et hiver est plus variable car la quantité de rayonnement solaire interceptée par la Terre diminue lorsque la distance Terre-Soleil augmente.

– L’obliquité (figure 6), angle qui caractérise l’inclinaison de l’axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l’orbite terrestre (plan de l’écliptique) oscille autour des valeurs 22° et 25° avec une période de 41 000 ans. Sa valeur actuelle est de $23^\circ 30'$. Ce mouvement d’oscillation de l’axe de

rotation de la Terre entraîne une variation de la quantité de rayonnement solaire reçue à chaque latitude. Lorsque l’angle est faible, le contraste entre hautes et basses latitudes est faible ; lorsque l’angle est fort le contraste est élevé.

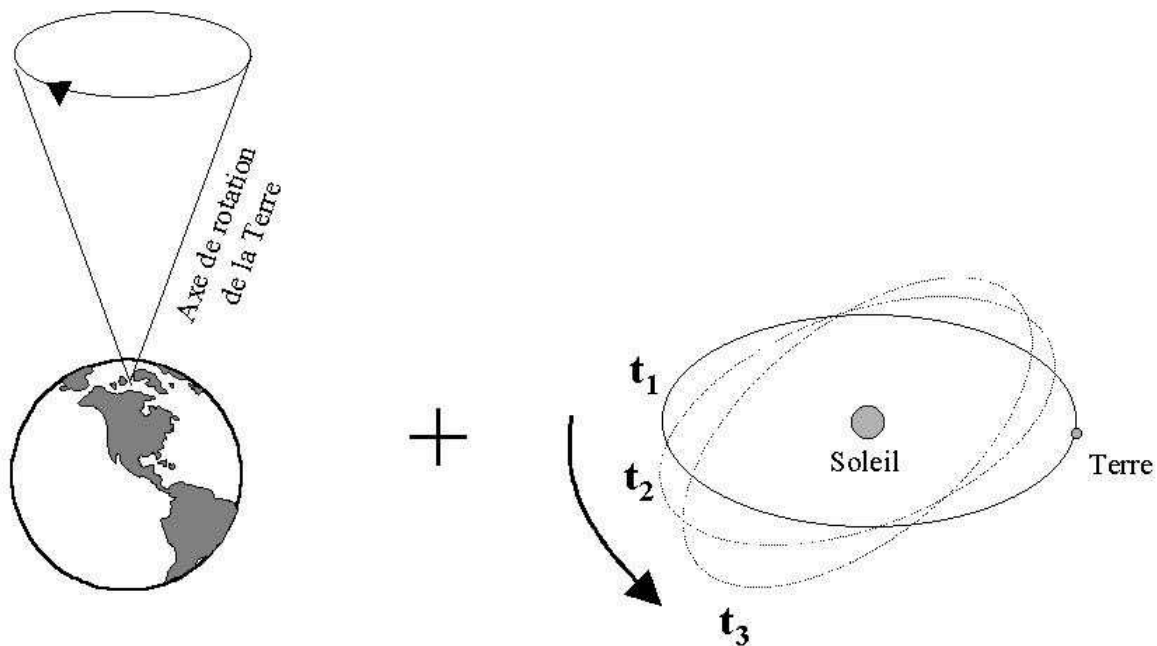
Figure 6. Variation de l’obliquité de la Terre.



– La précession des équinoxes (figure 7) est un mouvement plus complexe qui résulte de la combinaison de deux mouvements de rotation. La précession des équinoxes est le mouvement circulaire au cours du temps de l’axe de rotation de la Terre autour d’un axe perpendiculaire au plan de l’écliptique. La période de ce mouvement est normalement de 26 000 ans. Cependant, ce mouvement est combiné à un

mouvement de rotation de l’orbite de la Terre qui tourne également autour du Soleil. Cette combinaison ramène à 22 000 ans la périodicité de la précession des équinoxes. Ce mouvement résultant, combiné à la variation de l’excentricité de l’orbite de la Terre fait varier la distance Terre-Soleil suivant deux périodes, 19 000 ans et 23 000 ans.

Figure 7. Précession des équinoxes et rotation de l’orbite de la Terre autour du Soleil.



Pour résumer, les variations au cours du temps de ces paramètres astronomiques modifient :

- la distance Terre-Soleil et donc la quantité globale d'énergie reçue par la Terre du Soleil ;
 - l'angle d'inclinaison de la Terre par rapport au plan de l'écliptique et donc la quantité d'énergie reçue aux différentes latitudes (et donc le contraste des saisons).
- Dans la théorie astronomique des changements climatiques, due à Milutin Milankovitch, les variations périodiques dans la quantité d'énergie solaire reçue par la Terre sont suffisantes pour induire l'alternance de climats glaciaires et interglaciaires. Le rythme de 100 000 ans est observé pour les glaciations. Les périodes de changement climatique aux périodes de 43 000 ans, 24 000 ans et 19 000 ans sont aussi observées dans les archives glaciaires et sédimentaires des 700 000 dernières années.

Mécanismes amplificateurs et multiples interactions : exemple de l'albédo et du CO₂

Cependant, les seules variations de l'ensoleillement n'expliquent pas l'amplitude observée des variations de température. En effet, la diminution du flux d'énergie solaire annuel arrivant sur Terre ne varie que de 0,2 % (0,5 W/m²) quand l'orbite de la Terre passe d'un cercle à une ellipse. Sachant que pour faire varier la température moyenne de l'atmosphère de 5 °C (écart typique des changements de température observés entre un climat glaciaire et un climat interglaciaire) il faut mettre en jeu un flux d'énergie de l'ordre de 5 W/m². Des phénomènes additionnels sont donc à mettre en avant. Parmi ces phénomènes ont été étudiés à titre d'exemple deux d'entre eux :

Les variations de l'albédo de la planète

L'albédo est l'un des facteurs qui contrôle la température de surface de la Terre. L'albédo est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par la surface de la Terre sur l'énergie solaire incidente. Actuellement 30 % de l'énergie solaire arrivant sur toute la surface de la Terre est réfléchie vers l'espace (cf. programme de seconde). On a donc un albédo de 0,3. Il reflète la proportion actuelle de nuage, de terrain de nature différente à la surface de la Terre (végétation, glace, océan). Lors d'un refroidissement du climat induit par une diminution de l'ensoleillement, la neige et la glace couvrent une plus grande partie de la surface de la Terre. La neige et la glace ayant un albédo bien supérieur à celui de la végétation ou de l'eau, l'albédo moyen de la Terre augmente. La quantité d'énergie solaire absorbée par la Terre va donc diminuer renforçant ainsi le refroidissement initial. On est en présence d'un mécanisme amplificateur ou encore d'une rétroaction positive.

Les variations de la teneur en CO₂ atmosphérique

Le CO₂ présent dans l'atmosphère participe à l'effet de serre de la planète (cf. programme de seconde). L'eau de mer est capable de dissoudre du gaz carbonique de l'atmosphère. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère est en équilibre avec celle de l'océan.

L'absorption de CO₂ de l'atmosphère par l'eau de mer dépend de la température de cette dernière. Lorsque la température de l'eau de mer augmente, la solubilité de CO₂ dans l'océan diminue. Si l'on passe d'un climat glaciaire à un climat interglaciaire, la température moyenne de l'eau de mer augmente et du CO₂ dissous dans l'eau de mer va passer dans l'atmosphère, ce qui induit une augmentation de l'effet de serre.

D'autres mécanismes de régulation ou d'amplification de l'effet astronomique existent (variation de la nébulosité, changement dans le cycle de l'eau, effet de la biosphère...) et rendent difficiles la compréhension complète des enchaînements qui pilotent les changements climatiques. Néanmoins, l'élève doit entrevoir cette complexité au travers des deux exemples précédents.

Les changements climatiques aux plus grandes échelles de temps

L'analyse de la nature des roches sédimentaires accumulées sur des périodes de plusieurs dizaines de millions d'années et de leurs contenus en fossiles montrent des variations du climat aux plus grandes échelles de temps. Cependant deux effets doivent être pris en compte pour interpréter l'origine de ces variations : le climat mondial et la position des continents qui change au cours du temps. Pour un continent donné, le déplacement des plaques lithosphériques provoque des modifications des milieux et des climats car les continents ont occupé au cours du temps des positions différentes par rapport aux pôles et donc par rapport aux grandes zones climatiques.

Deux exemples

La glaciation et la forêt permo-carbonifère

Au Carbonifère et au Permien, les continents sont regroupés et plutôt situés vers des latitudes sud. À ces époques, la France se trouve à des latitudes proches de l'équateur. Les terrains carbonifères que l'on trouve en France en particulier contiennent des traces (bois fossilisés, charbon, coraux) qui attestent de la présence de forêts très importantes, caractéristiques d'un climat tropical. Cette végétation est en accord avec la position de la France près de l'équateur à cette époque. De nombreux indices (moraines,

stries glaciaires...) montrent qu'au même moment une imposante calotte polaire recouvrait l'Amérique du Sud, l'Afrique du Sud, l'Australie, l'Inde et l'Antarctique.

On peut mettre en relation l'abondance de la végétation au carbonifère et la présence d'une calotte glaciaire très étendue, signe d'une glaciation de grande ampleur. La croissance importante de la végétation pompe du CO_2 de l'atmosphère et la formation massive de dépôts de charbon piège ce CO_2 qui ne retourne pas à l'atmosphère. A cela s'ajoute l'importante altération de la chaîne de montagne hercynienne qui a pour effet de retirer du CO_2 de l'atmosphère (voir *infra*). L'effet de serre à cette époque diminue et induit un climat plus froid avec des précipitations neigeuses aux hautes latitudes qui ne fondent pas et permettent l'installation d'une calotte glaciaire.

La période chaude du Crétacé

Après la glaciation du permo-carbonifère, la Terre connaît une période chaude qui dure jusqu'à - 40 Ma. Le crétacé supérieur est l'une des époques où la Terre est entièrement dépourvue de glace. À cette époque les coraux se développent jusqu'à des latitudes de 40° nord et sud. L'Alaska et le Groenland déjà situés à des latitudes de plus de 50° N sont peuplés d'arbres caractéristiques de climats chauds (palmiers, arbres à pain). Cette période est aussi caractérisée par une imposante transgression marine.

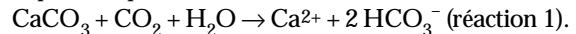
Ce climat très chaud traduit un effet de serre important lié à une augmentation de CO_2 dans l'atmosphère. L'enrichissement en CO_2 de l'atmosphère est à mettre en parallèle avec une activité volcanique accrue à cette même époque comme l'attestent le fort taux d'expansion des dorsales océaniques et les grands épanchements basaltiques sous-marins. Ce volcanisme transfère du CO_2 du manteau vers l'atmosphère. La température moyenne à la surface du globe est supérieure d'environ 10°C à l'actuelle.

Les mécanismes qui contrôlent les variations climatiques

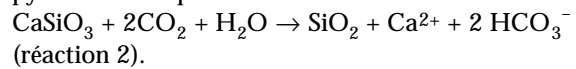
Les mécanismes des variations climatiques aux grandes échelles de temps impliquent des variations importantes dans la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère. Les deux exemples précédents illustrent deux mécanismes qui expliquent des variations importantes de la quantité de CO_2 dans l'atmosphère : le piégeage de la matière organique et l'émission de CO_2 par le volcanisme. D'autres processus chimiques impliquant la formation ou l'altération des roches, qui libèrent ou consomment du

CO_2 , jouent aussi un rôle important dans la régulation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère aux grandes échelles de temps. Quelques réactions élémentaires et caractéristiques de processus d'altération ou de formation de roches permettent de comprendre ces mécanismes de libération ou de consommation de CO_2 .

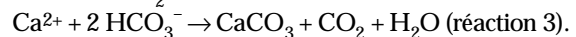
À la surface des continents l'altération des carbonates et des silicates consomme du CO_2 . L'exemple le plus simple est la dissolution des carbonates :



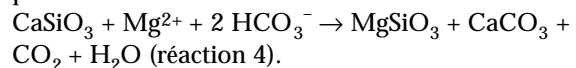
Les traces de ce phénomène sont observables dans les affleurements de calcaire par des figures caractéristiques. Cette réaction transfère du CO_2 de l'atmosphère vers les océans. L'altération des silicates des roches magmatiques ou métamorphiques consomme du CO_2 gazeux de l'atmosphère. Pour un pyroxène calcique cette réaction s'écrit :



Au niveau des océans, il existe des réactions qui libèrent du CO_2 . Ainsi, la précipitation des carbonates libère du CO_2 suivant la réaction :



Il en est de même pour les réactions d'altération de la croûte océanique. Une réaction-type est donnée par :



Les réactions de dissolution-précipitation des carbonates (réaction 1 et 3) se compensent s'il n'y a pas d'apport ou de départ d'ions Ca^{2+} et ne changent pas de manière majeure la teneur en CO_2 de l'atmosphère sur des échelles de temps de plusieurs millions d'années. En revanche l'altération des silicates qui libèrent du Ca^{2+} consomme irréversiblement du CO_2 . En effet, les réactions 2 et 3 peuvent s'écrire :



Le bilan montre que deux molécules de CO_2 sont utilisées et qu'une seule est libérée.

Quelques ordres de grandeur :

- la masse actuelle de CO_2 dans l'atmosphère est de $2,82 \cdot 10^{15}$ kg ;
- 1 kg de CaCO_3 contient 440 g de CO_2 ;
- les calcaires déposés à l'Urgonien dans les Alpes forment une couche d'épaisseur 200 m occupant une surface de $300 \text{ km} \times 50 \text{ km}$. La masse de CO_2 contenue dans ces calcaires est de $3,3 \cdot 10^{15}$ kg ;
- l'ensemble des calcaires sur Terre représente une quantité équivalente de CO_2 de $4 \cdot 10^{20}$ kg. La formation des carbonates et des roches carbonées depuis le début de l'histoire de la Terre a fait chuter la quantité de CO_2 de l'atmosphère de plusieurs ordres de grandeur et donc diminuer de façon importante l'effet de serre.

Envisager les climats du futur

La prévision des climats du futur est un enjeu à la fois scientifique et sociétal et fait l'objet de conventions, d'accords et de protocoles internationaux. L'identification des paramètres qui contrôlent le climat de la Terre tout au long de son histoire est essentiel pour construire des modèles de l'évolution du climat dans le passé mais aussi dans le futur. La relation entre température moyenne de la surface de la Terre et concentration en gaz à effet de serre est observée tout au long de l'histoire de la Terre. Les scénarios d'évolution de la température moyenne de la Terre qui, outre la variabilité naturelle du climat, prennent en compte l'impact de l'activité humaine, suggèrent un réchauffement au cours du XXI^e siècle de l'ordre de 2 à 5 °C. Ce réchauffement à l'échelle du siècle se superpose à un refroidissement constant de plus grande ampleur commencé il y a vingt millions d'années.

Les mécanismes de variation du niveau de la mer

Les variations relatives du niveau de la mer à l'échelle mondiale sont contrôlées par le volume d'eau dans les bassins océaniques. On considère que pendant les deux cents derniers millions d'années le volume d'eau sous forme de glace, liquide et vapeur est constant à la surface de la Terre. Les principales causes des variations du niveau de la mer sont :

La dilatation thermique de l'eau

Les mesures historiques du niveau moyen des mers montrent une élévation continue de l'ordre de 10 à 20 centimètres par siècle. Cette élévation se mesure actuellement à l'aide de satellites. La cause première de cette élévation est l'augmentation de la température de l'océan qui produit une dilatation thermique de l'eau. Un calcul simple permet de fixer l'ordre de grandeur de ce phénomène. Connaissant le coefficient de dilatation thermique volumique de l'eau ($\alpha_e = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) on peut calculer la variation de volume de l'océan ou d'une partie de celui-ci induite par un changement de température. Pour cela on utilise la relation suivante :

$$V(T) = V(T_0)[1 + \alpha_e(T - T_0)].$$

$V(T_0)$ est le volume de l'eau à une température T_0 et $V(T)$ le volume de l'eau à une température T .

Si T_0 est la température moyenne actuelle de l'ensemble des eaux océaniques et $V(T_0) = 1,4 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$

le volume actuel de ces eaux, une augmentation de la température moyenne de 5 °C portera ce volume à : $V(T) = 1,4 \cdot 10^{18}(1 + 2,6 \cdot 10^{-4}(5)) = 1,40182 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$, soit une variation ($V(T) - V(T_0)$) de $1,82 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$. Connaissant la surface des océans ($S_{\text{océan}} = 3,5 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$), on en déduit la variation du niveau de la mer δ par :

$$\delta = \left(\frac{V(T) - V(T_0)}{S_{\text{océan}}} \right) = 5 \text{ m}$$

Ce calcul ne tient pas compte de la topographie des bordures océan-continent.

Le réchauffement actuel de l'océan n'affecte que les eaux de surface (500 à 1000 premiers mètres de la colonne d'eau) et le changement de température depuis un siècle n'est que de quelques dixièmes de °C.

La formation et la destruction des calottes polaires

Lors des maximum glaciaires, on observe des baisses du niveau moyen des mers de l'ordre de la centaine de mètres et réciproquement lors de minimum. Ces variations sont liées au transfert d'eau de l'océan mondial vers les calottes polaires. L'échelle de temps de ces variations est de 10 000 à 100 000 ans. Un calcul simple permet d'estimer l'ordre de grandeur du changement du niveau de la mer lors d'un cycle glaciaire-interglaciaire. Le volume actuel de la calotte antarctique est de $2,4 \cdot 10^{16} \text{ m}^3$. Si elle fondait complètement et si l'eau se retrouvait dans l'océan la variation δ du niveau de la mer serait de :

$$\delta = \left(\frac{2,4 \cdot 10^{16}}{S_{\text{océan}}} \right) = 69 \text{ m}$$

Ce calcul ne tient pas compte de la topographie des bordures océan-continent et du changement de volume négatif lors de la fusion de la glace.

Le volume des bassins océaniques

Le volume des bassins océaniques est principalement contrôlé par la profondeur du fond des océans. Celle-ci dépend de l'activité et du nombre des dorsales mais aussi de l'âge de la lithosphère océanique. Une augmentation du nombre de dorsales ayant des vitesses d'expansion élevées diminue la profondeur moyenne des océans et conduit à des élévations du niveau de la mer qui peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres. La grande transgression du Crétacé s'explique par un tel phénomène. L'échelle de temps de ces variations est la dizaine de millions d'années.



es débuts de la génétique aux enjeux actuels des biotechnologies

■ 10 semaines. *Sciences de la vie.*

Ce thème suppose la maîtrise des notions inscrites dans la partie « Stabilité et variabilité des génomes et évolution » de l'enseignement commun de terminale S. Il a pour objectif principal de situer les développements de la génétique dans une perspective historique, avec un état d'esprit permettant de comprendre l'évolution d'un savoir scientifique.

Au cours des études antérieures, l'élève de terminale S a déjà rencontré l'essentiel des notions de génétique traitées dans ce thème. La perspective historique ne consiste pas à faire « comme si on ne savait pas », mais vise à préciser l'origine et l'évolution des connaissances et représentations actuelles (« ce que l'on sait »). C'est un moment privilégié pour aborder la nature des théories scientifiques : ce ne sont pas des réalités découvertes, mais des constructions intellectuelles qui reflètent l'idée que l'on se fait de la réalité à un moment donné de l'histoire des sciences. Les concepts scientifiques sont réfutables ; ils sont confrontés en permanence aux faits d'observation et aux résultats expérimentaux. La science construit son objet d'étude et ne se contente pas d'accumuler des observations.

L'élève situe la génétique dans le temps et le mouvement des idées par la mise en rapport des savoirs de différentes disciplines et par la perception des implications philosophiques, éthiques, économiques et sociales. Les interactions avec les enseignements de philosophie et d'éducation civique juridique et sociale sont privilégiées.

Les débuts de la génétique – les travaux de Mendel (1870)

Concernant la reproduction sexuée des végétaux angiospermes, seules les notions fondamentales permettant de comprendre les travaux de Mendel sont à connaître : étamine et pistil d'une fleur, pollinisa-

tion croisée, autofécondation, graine contenant un nouvel individu, résultat du développement de l'œuf à $2n$ chromosomes.

L'élève doit comprendre que les travaux de Mendel entraînent une rupture conceptuelle : passage de l'idée d'« hérédité par mélange » à l'idée d'« hérédité particulaire ». Ces travaux réfutent la théorie de l'hérédité par mélange, théorie alors largement acceptée et qui propose que les déterminants d'un caractère donné fusionnent après la fécondation. L'étude du monohybridisme menée par Mendel est suffisante pour comprendre la rupture conceptuelle introduite par l'« hérédité particulaire ». Pour le dihybridisme, seules les conclusions des travaux de Mendel sont fournies.

Mendel n'observe pas de transition graduelle entre les caractères parentaux, et l'intégrité de chaque caractère est préservée lorsqu'ils réapparaissent en F2. Chez les hybrides F1, les éléments correspondant aux versions alternatives d'un caractère donné restent donc distincts et se séparent à nouveau lors de la formation des cellules germinales (Mendel emploie les termes de « cellule pollinique » et de « cellule ovulaire »).

Le caractère novateur des travaux de Mendel est mis en évidence : il limite son étude à l'hérédité de variations de caractères morphologiques bien marqués (couleur des fleurs et des graines, forme des graines, longueur des tiges). Il applique à l'approche de l'hérédité le principe d'une démarche expérimentale et procède à une analyse statistique rudimentaire de ses résultats.

Il est nécessaire de situer les travaux de Mendel dans l'histoire des connaissances : les chromosomes, la mitose, la méiose et les gènes n'étaient pas encore connus (ils ne seront mis en évidence qu'entre 1870 et 1910). À l'époque de Mendel, on ne peut donc parler que de la transmission de facteurs héréditaires et non de gènes ; Mendel ne dispose pas des outils conceptuels qui lui permettraient d'aboutir à la distinction que nous faisons actuellement entre génotype et phénotype. Du fait de l'insuffisance des connaissances cytologiques de l'époque, l'importance des travaux de Mendel n'a pas été reconnue.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *La genèse de l'architecture florale (déterminisme génétique).*
- *La construction de diagrammes floraux.*
- *Les notions de gamétophyte mâle et femelle et de double fécondation.*
- *L'étude expérimentale des travaux de Mendel sur le dihybridisme.*

La théorie chromosomique de l'hérédité

Au début du xx^e siècle, d'une part les données sur les mécanismes fondamentaux de la reproduction sexuée sont établies, d'autre part des travaux menés sur l'hérédité par De Vries (Amsterdam), Correns (Berlin), et Tschermak (Vienne) aboutissent à retrouver les conclusions de Mendel.

Les cytologistes Sutton (1903) et Boveri (1904) rassemblant ces deux ordres de données proposent la théorie chromosomique de l'hérédité. Ces éléments de l'histoire des sciences permettent de réfléchir à ce qu'est une théorie scientifique. Morgan (1866-1945) avait été très intéressé par les travaux de De Vries sur les mutations. La première mutation qu'il observe est une mouche mâle présentant des yeux blancs, au lieu d'yeux rouges chez la souche sauvage. En travaillant sur la transmission de ce caractère muté, il est amené à proposer que le facteur déterminant ce caractère est porté par le chromosome sexuel X (mise en relation avec les données contemporaines de cytologie). Ainsi, un facteur mendélien est pour la première fois expérimentalement assigné à un chromosome identifié. Ces travaux sur la drosophile corroborent la théorie chromosomique à partir de données expérimentales. Il est envisageable de placer les élèves dans la situation de Morgan à partir d'une expérimentation concrète relative à un caractère lié au sexe (yeux blancs). Les données relatives à d'autres caractères liés au sexe confortent l'idée qu'un même chromosome peut porter plusieurs gènes, et en même temps représente une rupture par rapport à la notion de disjonction indépendante des couples d'allèles résultant des travaux de Mendel. On montre que les travaux de l'équipe de Morgan (mise en relation de données cytologiques sur les chiasmas avec les résultats expérimentaux des croisements) ont permis de déboucher sur les principes de construction des cartes génétiques. Cependant, aucun établissement de carte génétique à partir de données expérimentales ne peut faire l'objet d'une question au baccalauréat.

On appelle alors gène (Johannsen, 1909) toute particule à laquelle peuvent être attribuées les propriétés d'un facteur mendélien. À la suite des travaux de

Morgan, la notion de gène situé à un locus précis sur un chromosome est confortée comme étant une unité de fonction, de recombinaison et de mutation. Le gène apparaît alors comme étant une particule dont on ignore totalement la nature et le mode d'intervention dans la détermination d'un caractère.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *L'établissement de cartes cytologiques et génétiques.*

L'avènement de la biologie moléculaire – une nouvelle rupture

Cette partie doit permettre d'associer au rappel explicite des notions construites, la période au cours de laquelle ces concepts ont été élaborés (1940-1965). Il s'agit de recenser les connaissances acquises en classes de seconde et de première qui n'étaient pas prises en compte dans la théorie chromosomique :

- relation gène-protéine (1941);
- nature chimique du matériel génétique (1944);
- structure de l'ADN (1953);
- répllication semi-conservative de l'ADN (1958);
- mécanisme de la synthèse des protéines, notion d'ARN messenger (1965);
- code génétique (1961-1965).

Ce rappel est indispensable pour situer la place de la biologie moléculaire par rapport à la génétique formelle et pour faire saisir qu'elle résulte de la rencontre de la biochimie et de la génétique, sur laquelle s'est développée ensuite la révolution biotechnologique.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *L'exploitation de documents relatant une expérience concernant l'une ou l'autre de ces notions.*
- *Ces notions en tant que telles.*

La révolution technologique du début des années 1970

La découverte des enzymes de restriction a constitué une avancée technologique majeure dans la mesure où elle a rendu possible la manipulation du génome. La compréhension du principe de leur utilisation est nécessaire.

Les différents fragments de la molécule d'ADN séparés peuvent être révélés par électrophorèse, ce qui a permis l'isolement, le séquençage et l'introduction des gènes dans différents génomes grâce à des vecteurs pour les faire s'exprimer.

Les étapes initiales de cette démarche peuvent constituer un support pour une activité expérimentale (digestion de l'ADN par des enzymes de restriction et électrophorèse).

On signale qu'outre leurs répercussions sur le plan biotechnologique, les techniques du génie génétique ont permis de mettre en évidence le polymorphisme des gènes et de faire évoluer la notion de gène, mais ces notions ne peuvent faire l'objet d'une question au baccalauréat dans un sujet de spécialité.

Limites (ne sont pas exigibles)

- Les techniques de séquençage et de clonage des gènes.
- Les différents vecteurs utilisés pour introduire des gènes dans différents génomes.

Les enjeux actuels des biotechnologies

La révolution technologique des années 1970 a ouvert la voie :

- aux manipulations du génome et à la création des organismes génétiquement modifiés (OGM) ;
- au séquençage du génome et donc à la possibilité de caractériser génétiquement les individus.

Cette approche des applications de la biologie moléculaire ne doit pas être conçue uniquement sous l'angle scientifique mais doit permettre de prendre en compte les problèmes de société et les enjeux éthiques qui y sont associés.

Les aspects en rapport avec la transgénèse sont abordés à partir d'un exemple emprunté à la biologie végétale.

L'étude d'un exemple de thérapie génique chez l'homme permet d'expliquer la différence entre *transgénèse somatique* (non transmissible à la descendance) et *transgénèse germinale*, cette dernière étant refusée pour des raisons éthiques renforcées par un interdit formulé dans la loi de bioéthique de 1994.

La transgénèse et la construction d'organismes génétiquement modifiés (OGM)

L'élève reconnaît dans un document le principe, les étapes, les résultats et l'intérêt escompté de la pratique d'une transgénèse. De même, dans un texte ou une étude expérimentale, il repère et explique en utilisant ses connaissances, les problèmes soulevés

par l'utilisation des OGM. L'élève doit saisir le lien entre la transgénèse qui s'effectue au niveau cellulaire et sa traduction à l'échelle de l'organisme entier. Les connaissances acquises sur la biologie florale lui permettent de comprendre la transmission des modifications génétiques dans les générations successives et les risques associés à la dissémination du pollen.

Limites (ne sont pas exigibles)

- La connaissance des différents vecteurs de transgénèse autres que le virus.
- La connaissance des différentes techniques de transfert de gène.

Les biotechnologies et la génétique humaine

À l'examen d'un arbre généalogique, l'élève évalue le risque d'existence d'une pathologie d'origine génique chez un fœtus ou un individu. Pour cette étude, la localisation du gène sur les chromosomes et le mode de transmission (dominance ou récessivité) sont donnés.

L'élève comprend comment une mutation peut faire disparaître ou apparaître un site de restriction d'une enzyme définie, et ainsi modifier la longueur des fragments de restriction ; il doit donc être capable d'interpréter des clichés montrant les fragments de restriction relatifs aux divers individus d'un arbre généalogique. Une anomalie génique peut ainsi être dépistée.

L'étude d'anomalies chromosomiques et de leur dépistage se limite au cas de la trisomie 21.

« Dépistage et signes diagnostics de la trisomie 21 » étant envisagés dans la partie « Procréation/suivi de la grossesse » de l'enseignement obligatoire, cet exemple peut être rappelé mais ne fera pas l'objet de questions spécifiques à l'enseignement de spécialité au baccalauréat.

En ce qui concerne la thérapie génique somatique, l'élève réinvestit des connaissances générales en étudiant des documents. On peut se limiter par exemple aux essais en cours qui visent à traiter une maladie immunitaire et on souligne qu'actuellement l'efficacité de la thérapie génique doit encore être prouvée.

Limites (ne sont pas exigibles)

- La connaissance des différents essais de méthodes de thérapie génique.



Diversité et complémentarité des métabolismes

■ 10 semaines.
Sciences de la vie.

Dans son ensemble, cette partie du programme de spécialité correspond à une étude du cycle du carbone, argumentée par des documents, des démonstrations et illustrations expérimentales. Elle s'appuie sur les différents niveaux d'organisation des êtres vivants intervenant dans les grands équilibres trophiques de la planète. Cette démarche permet de placer l'élève en position de questionnement, d'approfondir ses compétences dans le domaine de la manipulation pratique, du raisonnement expérimental et de développer ses qualités d'imagination et d'esprit critique.

Remarque introductive – Le flux d'énergie au travers du vivant, alimenté par l'énergie solaire, n'est pas l'objectif central de cette partie du programme; néanmoins, cette notion est abordée globalement lors de l'étude de l'écosystème et des métabolismes. Pour autant, des habitudes dans l'emploi de certaines expressions, bien qu'elles aient des avantages pédagogiques, ne sont pas totalement adaptées à la réalité scientifique.

Il s'agit essentiellement de l'usage d'expressions sur l'ATP telles que « molécule riche en énergie », « intermédiaire énergétique universel au sein des cellules... » ou encore « petite monnaie des échanges d'énergie »; mais aussi de l'interprétation des « réactions couplées ». Cet usage est issu de l'intention pédagogique de simplifier une description pour faire ressortir une notion plus générale. Cette intention est louable mais elle fait souvent appel à des éléments de connaissances que les élèves n'ont pas obligatoirement reçus et/ou assimilés, si bien que, sans être faux scientifiquement, l'usage de ces expressions peut aboutir à des idées fausses. De plus, un tel usage fait parfois apparaître des divergences entre l'enseignement de chimie et celui de biologie où des vocabulaires différents sont utilisés pour décrire les mêmes notions. C'est pourquoi un texte à ce sujet sera rédigé en commun par les groupes d'experts de physique et chimie et de sciences de la vie et de la Terre, afin de donner aux enseignants des deux

disciplines une base notionnelle, une expression et un vocabulaire communs.

Présentation de l'écosystème

Dans cette séance d'introduction il s'agit de resituer pour l'élève le cycle du carbone et de l'illustrer par l'examen de la structure et du fonctionnement d'un écosystème (éventuellement à l'occasion d'un travail de terrain). Cette démarche permet de remettre en place les notions de « producteurs primaires autotrophes » et de « producteurs secondaires hétérotrophes » ainsi que les phénomènes de respiration et de photosynthèse. Il convient de rappeler à cette occasion les états réduits du carbone dans la matière organique et les états oxydés du carbone dans la matière minérale.

Ces notions sont en effet indispensables pour que les données cellulaires et métaboliques prennent un sens. Il n'est pas question cependant d'approfondir l'analyse de l'écosystème. En particulier, aucune approche quantitative de détail portant sur un ou des exemples locaux n'est attendue.

Il est nécessaire de faire comprendre à l'élève qu'un écosystème dit « à l'équilibre » est à la fois producteur et « consommateur-décomposeur » de matière organique, que les activités métaboliques contribuant à la « production d'O₂/consommation de CO₂ » (autotrophie) sont en quasi-équilibre avec celles de la « production de CO₂/consommation d'O₂ » (hétérotrophie).

Dans ces conditions, seule une petite partie du carbone fixé dans la matière organique se trouve immobilisée de façon durable à des échelles de temps qui sont parfois très différentes. En effet, sauf en cas de stockage aboutissant à une formation géologique, ce carbone de la matière organique sera oxydé à moyen terme (en quelques dizaines, voire quelques centaines d'années) et remplacé par la production primaire de l'écosystème.

Une discussion sur l'impact d'une perturbation de l'écosystème et sur l'expression « forêt = poumon de la planète » est engagée à cette occasion.

Limites (ne sont pas exigibles)

- Les notions de pyramide de biomasse, de pyramide de productivité.
- L'étude quantitative des flux de matière et d'énergie.

L'autotrophie

On se limite, comme le programme l'indique, à la photoautotrophie pour le carbone.

La mise en évidence de production de matière organique, de dioxygène et les conditions générales de cette production (CO_2 , lumière, pigments) peut être menée grâce à des expérimentations classiques. La nécessité d'un approvisionnement en carbone conduit à en rechercher la source dans le CO_2 atmosphérique, et donc à l'observation des échanges et des structures mises en jeu. La feuille est présentée comme un lieu de synthèse de matière organique (dont le siège est le chloroplaste), en communication avec l'atmosphère par les stomates, approvisionnée en eau et en sels minéraux par la sève brute et qui peut éventuellement exporter ses productions par la sève élaborée. L'élève est ainsi conduit à replacer l'activité photosynthétique du chloroplaste dans le cadre d'un schéma général du fonctionnement du végétal.

Limites (ne sont pas exigibles)

- Les caractéristiques cytologiques des tissus rencontrés, à l'exception de celles du parenchyme chlorophyllien.
- La notion de facteur limitant.
- Les mécanismes de fonctionnement des stomates.
- Les mécanismes de l'absorption racinaire.
- Les mécanismes de la circulation des sèves.

Les pigments foliaires sont extraits. Leur séparation permet de mettre en évidence leur diversité. On compare le spectre d'action de la lumière sur la photosynthèse et le spectre d'absorption de la lumière par un extrait brut de pigments foliaires pour mettre en évidence le rôle de ces pigments, et amener à la notion de « pigments photosynthétiques ».

Limites (ne sont pas exigibles)

- La connaissance des différents pigments autres que la chlorophylle.
- La structure moléculaire des pigments.

L'étude des mécanismes biochimiques de la photosynthèse est volontairement restreinte. Elle se limite à faire comprendre que l'équation-bilan de la photosynthèse résulte en réalité de deux processus complémentaires et simultanés. L'existence de ces deux processus peut être montrée grâce à des expérimentations rappelant les travaux de Hill.

On se limite aux explications suivantes pour les deux phases de la photosynthèse :

La phase photochimique comprend la capture des photons, l'oxydation de l'eau et la production de dioxygène, ainsi que la synthèse de molécules intervenant ensuite dans le métabolisme : ATP et coenzymes réduites (RH_2). Cet ensemble de réactions est présenté globalement comme un « système d'oxydo-réduction » qui se déroule au niveau des thylacoïdes où sont localisés les pigments photosynthétiques et des protéines et enzymes impliquées dans les réactions d'oxydoréduction. À ce niveau, l'ensemble des photosystèmes et autres transporteurs d'électrons doit être simplifié à l'extrême sous la forme d'un « complexe protéines-pigments photosynthétiques ». L'action de la lumière sur cet ensemble, d'où découle la notion de photosystème, sera réduite à l'indication d'une absorption de lumière par les pigments. Cette absorption constitue un apport énergétique initial nécessaire à la réalisation des réactions d'oxydo-réduction ultérieures. Aucune quantification thermodynamique, aucune recherche d'équivalence énergétique, aucune notion s'appuyant sur les potentiels d'oxydo-réduction, aucun mécanisme moléculaire ou atomique associé à l'absorption des photons ne sont attendus. L'existence de deux photosystèmes et le détail des photosystèmes ne sont pas au programme.

En ce qui concerne la phase non photochimique, on se limite à dire qu'elle consiste en l'incorporation du CO_2 dans la matière organique au sein du stroma et que cette incorporation s'accompagne d'une réduction qui utilise les coenzymes réduits et l'ATP produits par la phase photochimique. On illustre la fabrication de matière organique par la production de glucides. Le cycle stromatique de réduction photosynthétique du carbone se limite à une symbolisation de l'accepteur de CO_2 sous la forme C5P2, et des réactions ultérieures sous une forme semblable (formation de C3P). Les noms des composés ne sont pas au programme à l'exception du ribulose 1-5 bisphosphate (C5P2), du phosphoglycérate (PGA) et du triose phosphate (C3P). Les composés intermédiaires nécessaires au bouclage du cycle de réduction photosynthétique du carbone ne sont pas à étudier. On se limite à indiquer qu'une partie des trioses phosphates formés sert à la régénération de l'accepteur initial C5P2 en consommant de l'ATP. L'autre partie des trioses phosphates sert à la synthèse de glucides. Aucune donnée quantitative sur le fonctionnement du cycle n'est attendue. La conversion du glucose en amidon n'est pas détaillée.

Au bilan, la photosynthèse apparaît donc comme une voie d'entrée du carbone oxydé et de l'énergie solaire dans la biosphère.

Limites (ne sont pas exigibles)

- La connaissance des deux photosystèmes, des composés intermédiaires, des enzymes, des coenzymes impliqués dans les réactions d'oxydoréduction ainsi que le schéma en Z.
- La connaissance des composés intermédiaires, des enzymes, des coenzymes impliqués dans la synthèse de glucides.
- Le fonctionnement de l'ATP-synthase.
- Les synthèses de matière organique autres que les glucides (on se contente de signaler l'existence de ces synthèses variées pour montrer que la photosynthèse est à l'origine de l'ensemble de la matière organique).
- Les mécanismes du couplage énergétique intervenant dans la synthèse ou l'utilisation de l'ATP.
- La diversité des photosynthèses (on se limite au cas des végétaux supérieurs verts, en ne considérant que le métabolisme en C₃); la chimiosynthèse.

Des métabolismes au mouvement – l'importance de l'ATP

Dans cette partie, l'intervention de l'ATP est montrée à deux niveaux sans aborder au fond les aspects thermodynamiques de son action :

- dans les synthèses associées aux divers métabolismes par une simple généralisation du rôle de l'ATP vu précédemment ;
- dans des déformations de type mécanique.

On signale que les matières produites au cours de la photosynthèse servent à la construction et au fonctionnement de l'ensemble du végétal, et donc à ceux de l'ensemble des êtres vivants de l'écosystème qui le consomment. On généralise sans démonstration la nécessité de l'intervention de l'ATP pour les synthèses des diverses molécules du vivant. Son rôle est celui d'intermédiaire du métabolisme général, intervenant dans de nombreuses réactions et dans tous les types de cellules (autotrophes ou hétérotrophes).

Un autre rôle de l'ATP est étudié : l'ATP est nécessaire à de nombreuses réactions qui se traduisent par des déformations de systèmes macro-moléculaires (ex. : complexes protéiques) pouvant engendrer des mouvements à l'échelle cellulaire. À titre d'exemple, on étudie uniquement et schématiquement la contraction du couple moléculaire actine-myosine. L'observation de cellules musculaires fournit un support concret à l'étude élémentaire du mécanisme de « raccourcissement – relaxation » du complexe actine-myosine en présence d'ATP.

Respiration et fermentation, sources d'ATP

Ces rôles de l'ATP ayant été généralisés à toutes les cellules mais la synthèse de l'ATP n'ayant été vue que dans les chloroplastes, le problème de la synthèse de l'ATP hors des chloroplastes peut alors être posé et abordé par une étude de la respiration cellulaire et de la fermentation.

Ce métabolisme est étudié en s'en tenant strictement aux bilans généraux des différentes étapes, sans entrer dans le déroulement des transformations intermédiaires. Il s'agit de rester, sur le plan des mécanismes, le plus près possible de ce qu'il est raisonnable d'aborder expérimentalement en classe terminale. Les données rajoutées sont limitées au minimum nécessaire pour relier entre elles les différentes informations apportées par l'observation et l'expérimentation, et pour rendre compréhensible la localisation cytologique des phénomènes.

La respiration au niveau cellulaire est mise en évidence par des expériences classiques, la présence des mitochondries est remarquée dans toutes les cellules, y compris les cellules photosynthétiques. Comme pour le chloroplaste, on indique l'isolement possible des organites et leur indépendance physique dans la cellule. Leur rôle dans la respiration ainsi que l'importance de la glycolyse initiale dans le catabolisme glucidique sont étudiés au moyen de documents rapportant des expériences.

L'interprétation schématique de l'activité respiratoire dans les mitochondries se fera, comme dans le cas de l'activité photosynthétique et du chloroplaste, sans aucun développement détaillé sur les mécanismes du transfert des protons vers l'espace intermembranaire et de la synthèse d'ATP, ni sur les composantes moléculaires des membranes des crêtes mitochondriales. En ce qui concerne les réactions membranaires, on se limite à indiquer que dans les réactions d'oxydo-réduction qui consomment des coenzymes réduites, l'oxygène est l'accepteur terminal des électrons et protons. Seuls des bilans qualitatifs et quantitatifs simplifiés mettant en rapport les réactions globales du catabolisme des glucides et la production d'ATP sont exigibles.

On conclut cette partie en signalant la diversité des modes de dégradation des composés organiques. Ceci est illustré uniquement par le cas de la fermentation alcoolique. Ce mécanisme permet la vie d'organismes ou simplement de cellules dans des conditions anaérobies.

Limites (ne sont pas exigibles)

- *La connaissance des composés intermédiaires autres que le pyruvate, enzymes et coenzymes intervenant dans la fermentation ou la respiration cellulaire.*
- *Les mécanismes de couplage entre les réactions cataboliques et la synthèse d'ATP.*
- *La connaissance de toute équation de transformation chimique autre que les bilans figurant explicitement au programme.*
- *L'étude expérimentale des fermentations autres que la fermentation alcoolique.*

En conclusion, on propose un bilan d'ensemble du fonctionnement de la cellule eucaryote, qui rappelle les rôles de ses différents constituants. L'expression « conversions énergétiques » mentionnée dans le programme est comprise comme « l'ensemble des mécanismes qui aboutissent à la synthèse de l'ATP au sein de la cellule et à son utilisation pour la synthèse d'autres constituants et pour la réalisation d'activités telles que le mouvement ». L'origine des organites (mitochondries et chloroplastes) peut être évoquée mais ne pourra pas faire l'objet de questions à l'examen.