

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 CO_2 , augmentation du taux de l' O_2 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 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (noté $\delta^{18}\text{O}$, 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 ^{16}O et ^{18}O 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 $\delta^{18}\text{O}$ 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 $\delta^{18}\text{O}$ 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 $\delta^{18}\text{O}$ 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 $\delta^{18}\text{O}$ 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 $0,7 \text{ ‰} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

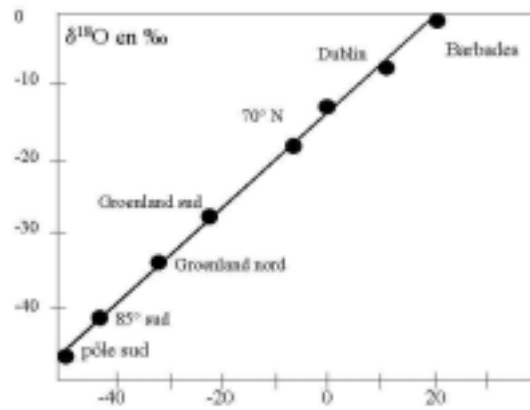
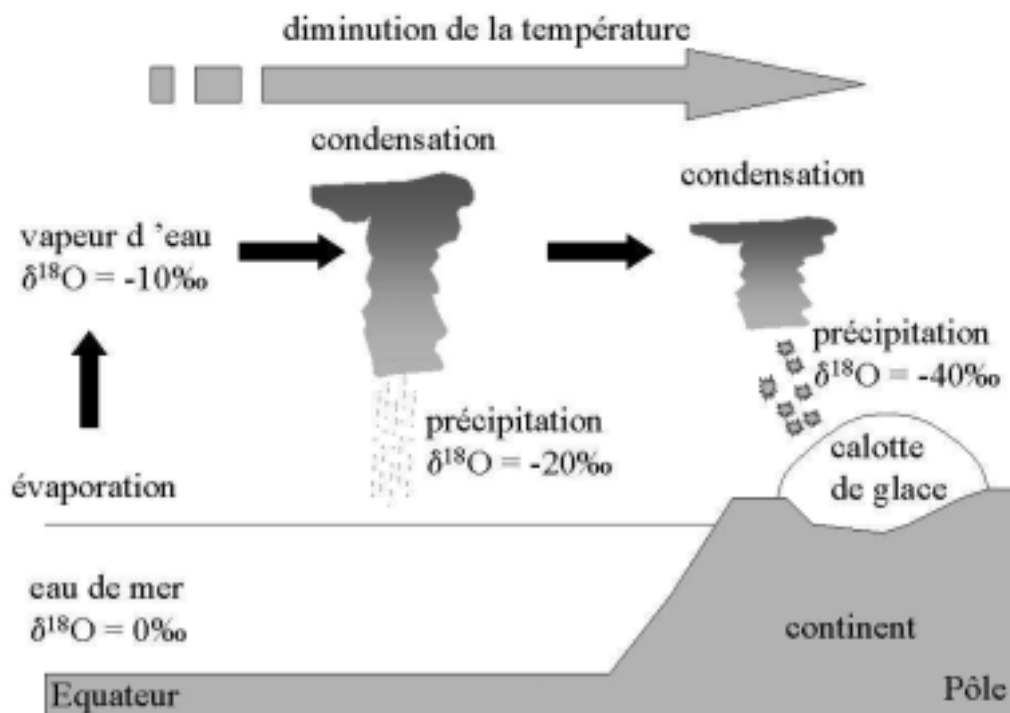


Figure 1. Moyenne des températures annuelles en °C.

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 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) dans ces différentes couches, on obtient par les variations observées de $\delta^{18}\text{O}$ les changements de la température de l'air au cours du temps au-dessus du Groenland.

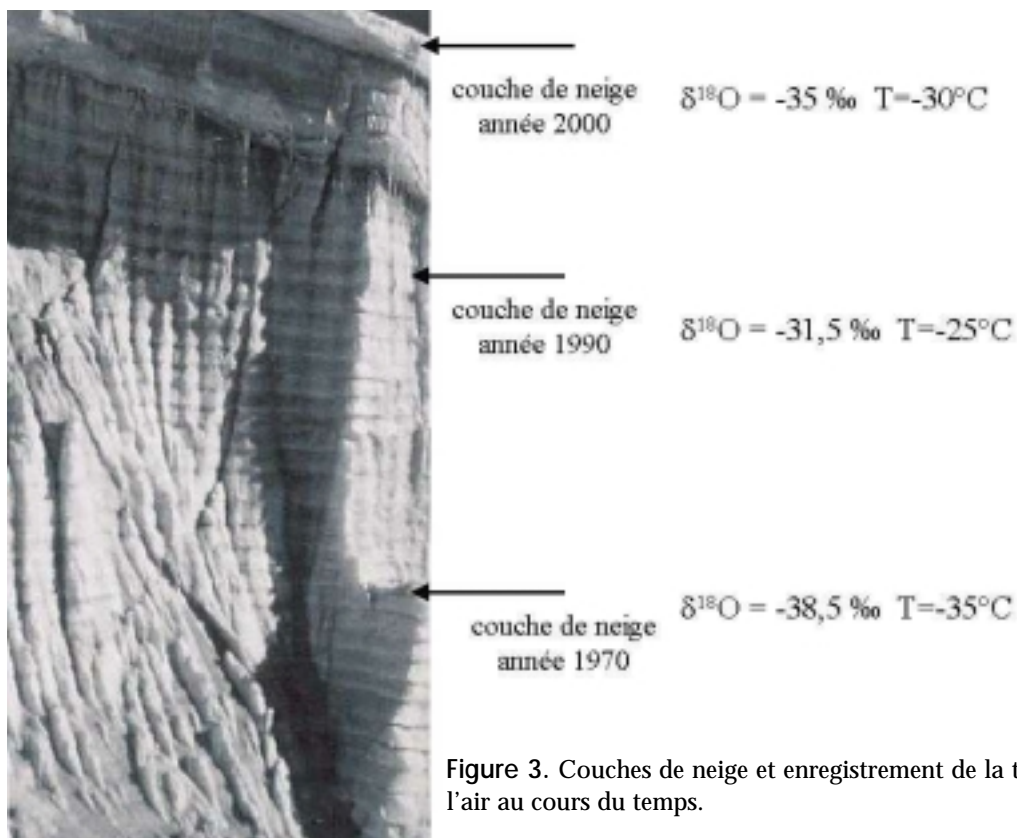


Figure 3. Couches de neige et enregistrement de la température de l'air au cours du temps.

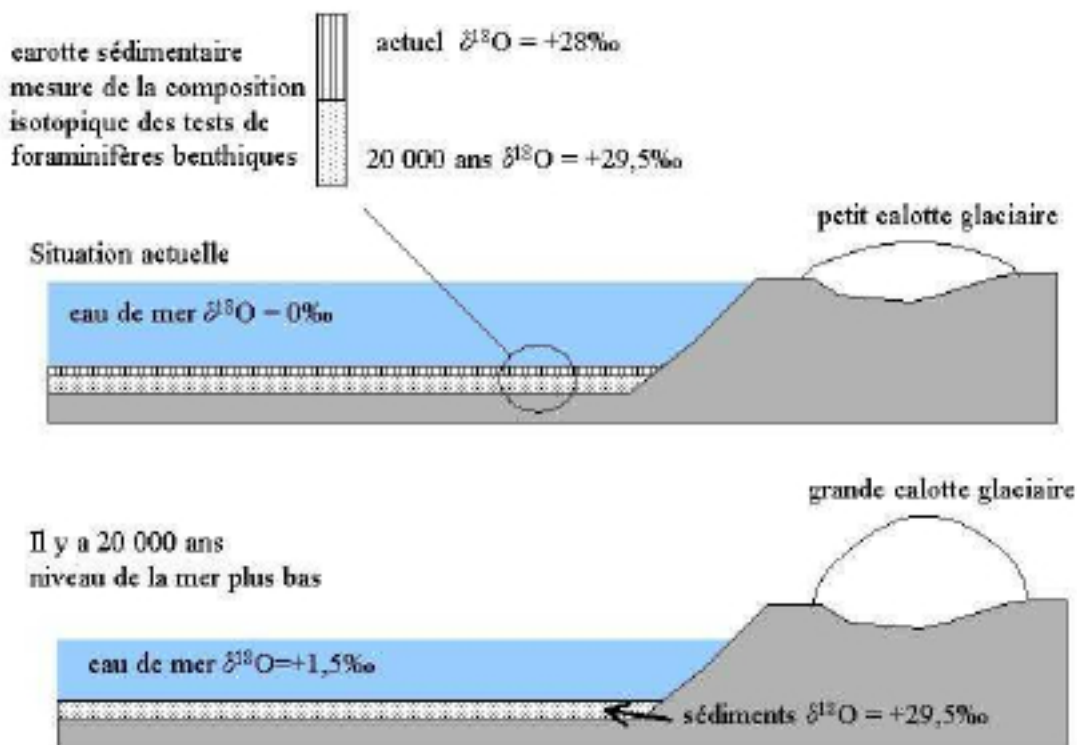
L'analyse des carottes de plusieurs milliers de mètres des forages sur les calottes polaires permet en mesurant le rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de la glace en fonction de la profondeur de mettre en évidence les variations locales (au dessus du lieu de forage) de la température de l'air au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



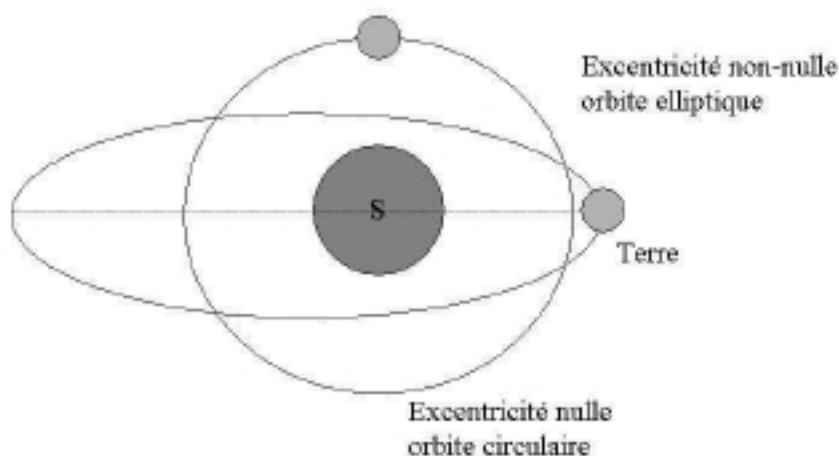
Les variations du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) observées pour les 400 000 dernières années dans les glaces sont parfaitement corrélées à celles mesurées pour la même période de temps dans les sédiments océaniques. La mise en évidence de cette corrélation entre enregistrements par les glaces 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

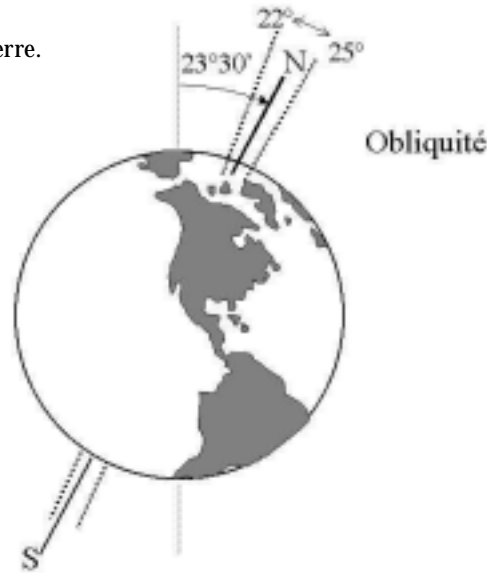
Les évolutions du climat mises en évidence par l'étude des archives géologiques sont interprétables par des modèles. Les périodicités observées dans les changements de température de l'atmosphère et l'extension des calottes de glace peuvent être mises en relation avec les variations régulières des paramètres 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.

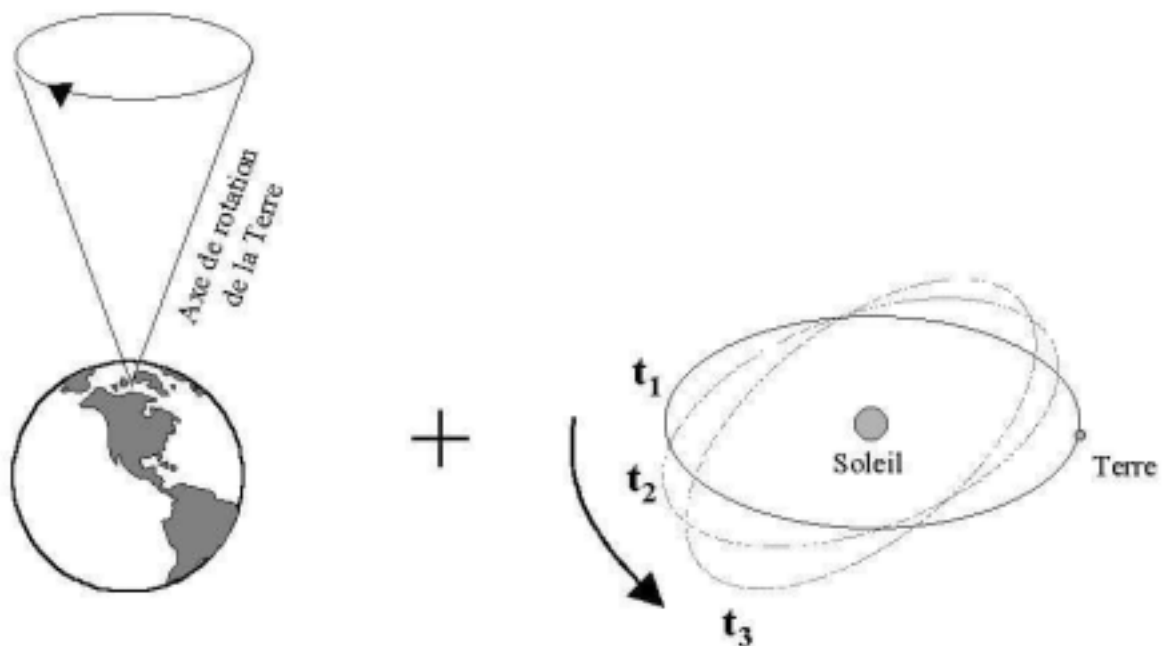
Figure 6. Variation de l’obliquité de la Terre.



– 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 réfléchi 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 réfléchi 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.

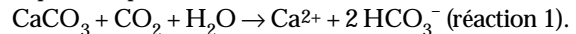
Ce climat très chaud traduit un effet de serre important lié à une augmentation de CO_2 dans l'atmosphère. L'enrichissement en CO_2 de l'atmosphère est à mettre en parallèle avec une activité volcanique accrue à cette même époque comme l'attestent le fort taux d'expansion des dorsales océaniques et les 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

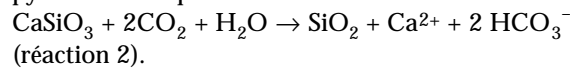
Les mécanismes des variations climatiques aux grandes échelles de temps impliquent des variations importantes dans la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère. Les deux exemples précédents illustrent deux mécanismes qui expliquent des variations importantes de la quantité de CO_2 dans l'atmosphère : 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 .

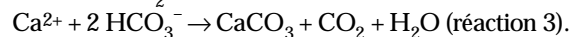
À la surface des continents l'altération des carbonates et des silicates consomme du CO_2 . L'exemple le plus simple est la dissolution des carbonates :



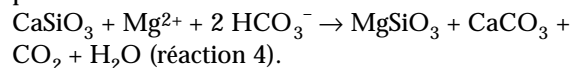
Les traces de ce phénomène sont observables dans les affleurements de calcaire par des figures caractéristiques. Cette réaction transfère du CO_2 de l'atmosphère vers les océans. L'altération des silicates des roches magmatiques ou métamorphiques consomme du CO_2 gazeux de l'atmosphère. Pour un pyroxène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



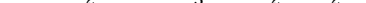
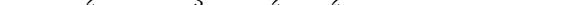
Au niveau des océans, il existe des réactions qui libèrent du CO_2 . Ainsi, la précipitation des carbonates libère du CO_2 suivant la réaction :



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 (CO₂, 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 CO₂ 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 (RH₂). 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 CO₂ 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 CO₂ 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.