A photograph of the courtyard of Lycée Janson de Sailly. In the foreground, there is a gravel path leading to a rectangular fountain with a central water jet. The courtyard is surrounded by green lawns and several small, conical evergreen trees. In the background, a large, multi-story building with a central tower and many windows is visible under a clear blue sky.

Livret de Rappels

BCPST1

Programme de SVT

Lycée Janson de Sailly

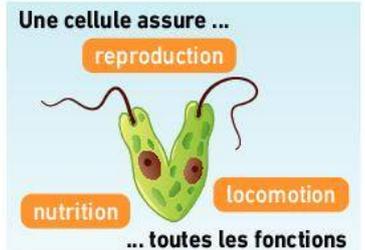
Rappels du programme de 2nde
Tiré du livre de 2nde Edition Bordas

1 Êtres vivants unicellulaires et pluricellulaires

- Pour vivre, les êtres vivants accomplissent différentes **fonctions** : ils se nourrissent, se reproduisent, établissent des relations avec leur environnement et peuvent éventuellement se déplacer.
- Certains êtres vivants sont constitués d'une seule cellule : ce sont les **unicellulaires**. Ils appartiennent à des groupes différents et leur cellule présente des aspects variables : leur point commun est que toutes leurs fonctions sont assurées par une unique cellule.
- Chez les organismes **pluricellulaires**, les fonctions sont assurées par des structures complexes spécialisées dans l'accomplissement d'une fonction particulière : ce sont les **organes**. Dans le corps humain, on peut citer le cerveau, le cœur, les poumons, l'estomac, l'intestin, les muscles, les gonades, etc. Ces organes sont souvent regroupés en appareils (ou systèmes) fonctionnels : système nerveux, appareils digestif, circulatoire, reproducteur, etc. Chez les plantes, les racines, tiges et feuilles assurent les fonctions de nutrition, tandis que fleurs, fruits et graines sont spécialisés dans la reproduction.

Remarque : le cas des bactéries sera étudié dans le chapitre 3 de la partie 4.

À retenir Chez les organismes unicellulaires, toutes les fonctions sont assurées par une seule cellule. Chez les organismes pluricellulaires, les fonctions sont assurées par différents organes, chacun étant spécialisé dans l'accomplissement d'une fonction particulière.



■ Organisme unicellulaire.



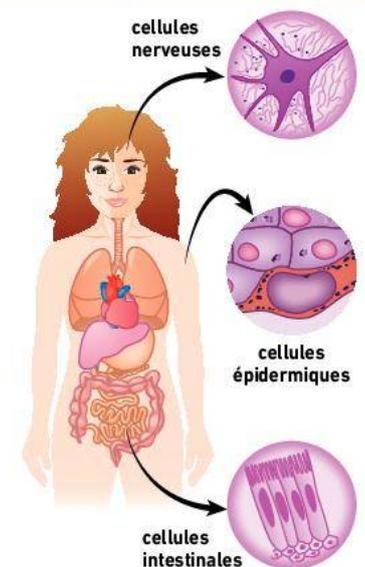
■ Organisme pluricellulaire.

2 L'organisme pluricellulaire : un ensemble de cellules spécialisées

- Qu'ils soient unicellulaires ou pluricellulaires, les êtres vivants sont tous constitués à partir d'une unité structurale de base qui est la **cellule**. Ceci témoigne de l'unité du monde vivant.
- Typiquement, une cellule est un espace limité par une membrane. Elle peut être facilement observée au microscope optique : une cellule animale mesure en général quelques micromètres ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$) à quelques dizaines de micromètres. Une cellule végétale est souvent de plus grande dimension (jusqu'à $200 \mu\text{m}$).
- Le contenu cellulaire, ou cytoplasme, renferme différents éléments appelés **organites** (dont la taille est de l'ordre du μm ou de quelques μm). Certains sont visibles au microscope optique, comme le noyau cellulaire ou les chloroplastes des cellules chlorophylliennes. L'utilisation du microscope électronique révèle la richesse du cytoplasme en divers organites, comme les mitochondries et de nombreux autres organites.
- Chez les êtres vivants pluricellulaires, toutes les cellules ne sont pas identiques : elles diffèrent par leur forme, les organites qu'elles renferment, les molécules qu'elles possèdent ou qu'elles produisent. On dit que les cellules sont **spécialisées**. Cette spécialisation est à mettre en relation avec leur fonction. Un neurone, un globule rouge ou une cellule chlorophyllienne sont des exemples de cellules spécialisées.

Ainsi, on estime qu'un être humain par exemple est constitué d'environ 30 000 milliards ($3 \cdot 10^{13}$) de cellules appartenant à plus de 250 types cellulaires différents.

À retenir La cellule est l'unité structurale et fonctionnelle des êtres vivants. Une cellule contient de nombreux organites assurant son fonctionnement.

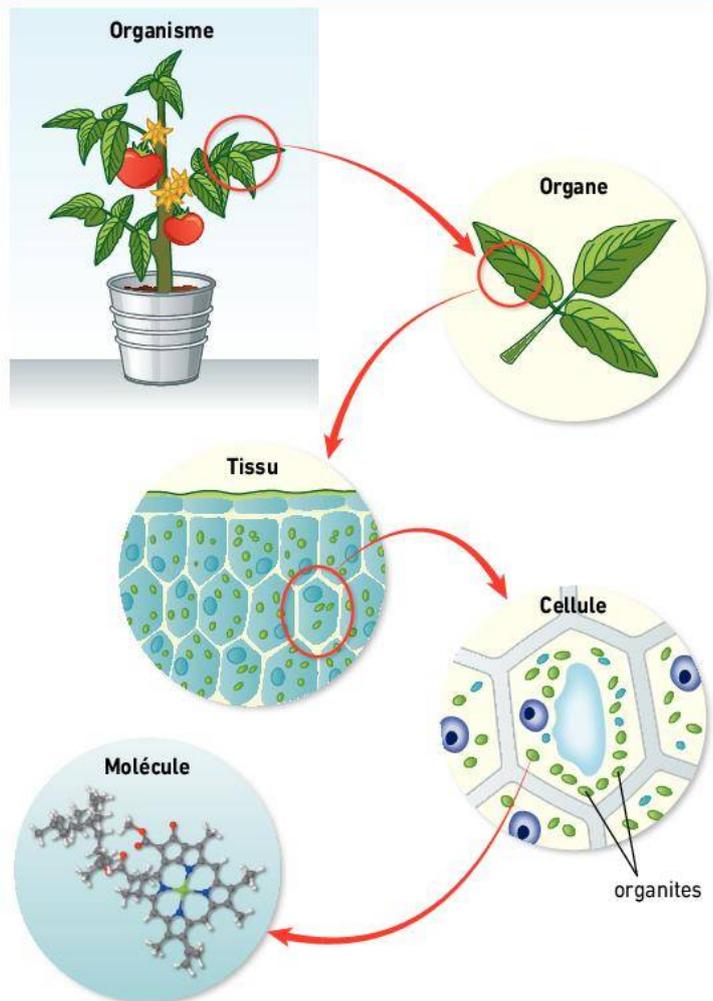


■ Un ensemble de cellules spécialisées.

3

Différents niveaux d'organisation

- Comme la matière minérale, la matière du vivant est constituée de **molécules** (assemblages d'atomes). Les cellules sont riches en macromolécules, c'est-à-dire des molécules de relativement grande dimension, formées par l'assemblage de molécules élémentaires plus simples. C'est par exemple le cas des protéines ou des glucides comme l'amidon et le glycogène. Les molécules sont cependant trop petites pour être observées, même avec un microscope électronique, leur taille étant de l'ordre du nanomètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, soit $1/1\,000$ de μm).
- Chez les organismes pluricellulaires, les **cellules** d'un même type sont en général associées pour former un ensemble fonctionnel appelé **tissu** : on parle par exemple de tissu épidermique pour qualifier l'assemblage des cellules de l'épiderme formant un ensemble protecteur. Diverses molécules, situées dans la **matrice extracellulaire**, c'est-à-dire dans l'espace séparant les cellules, assurent l'adhérence et la cohésion des cellules appartenant à un même tissu.
- Un **organe** est une structure complexe, en général constitué de plusieurs tissus qui participent à la réalisation d'une même fonction. C'est le cas par exemple d'une feuille (avec un tissu épidermique, un tissu chlorophyllien, un tissu conducteur de sève...) ou encore de la peau (associant un épiderme résistant, le tissu conjonctif du derme ainsi que des follicules pileux, des glandes sécrétrices, des récepteurs sensoriels...).
- On donne le nom d'**organisme** à un être organisé accomplissant les fonctions de la vie, que celui-ci soit unicellulaire ou pluricellulaire.



■ Organisation d'un être pluricellulaire.

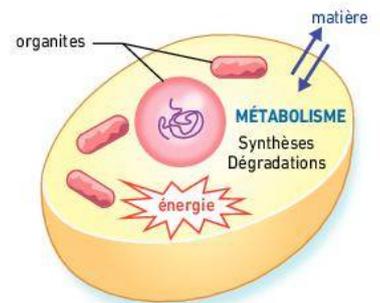
À retenir Chez un organisme pluricellulaire, les organes sont constitués de cellules spécialisées formant des tissus. Un tissu est un assemblage de cellules associées entre elles grâce aux molécules de la matrice extracellulaire. Les cellules et les organites sont eux-mêmes composés de très nombreuses molécules.

Mots-clés

● Cellule ● Cellule spécialisée ● Matrice extracellulaire ● Organe ● Organisme ● Organite ● Tissu

1 La cellule, unité fonctionnelle des êtres vivants

- Une cellule n'est pas seulement l'unité de structure constitutive des êtres vivants. Il se déroule dans le cytoplasme et les organites d'une cellule des milliers de **transformations biochimiques**, nécessaires à son fonctionnement : c'est ce qu'on appelle le **métabolisme**.
- Ces réactions chimiques impliquent diverses molécules. Il peut s'agir de **synthèses**, c'est-à-dire des transformations dont le résultat est la fabrication, la production d'une nouvelle molécule. Il peut aussi s'agir d'une **dégradation de molécules** de façon à obtenir l'énergie nécessaire au fonctionnement cellulaire. Ces deux aspects qui caractérisent tout métabolisme sont nécessaires et complémentaires.
- Le métabolisme peut aussi se définir à l'échelle de l'organisme : celui-ci résulte alors du métabolisme de l'ensemble de ses cellules.

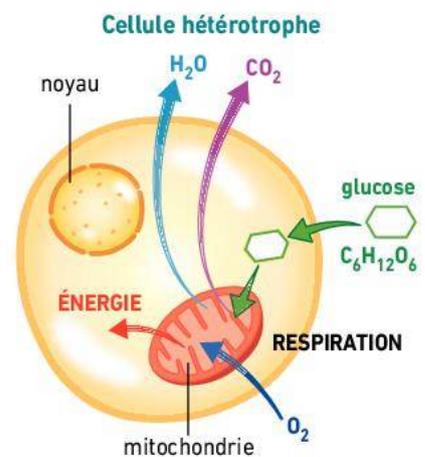


À retenir Pour assurer les besoins fonctionnels d'une cellule, de nombreuses transformations biochimiques s'y déroulent : elles constituent ce qu'on appelle le métabolisme. Ainsi, une cellule est l'unité structurale mais aussi fonctionnelle des êtres vivants.

2 Le métabolisme énergétique

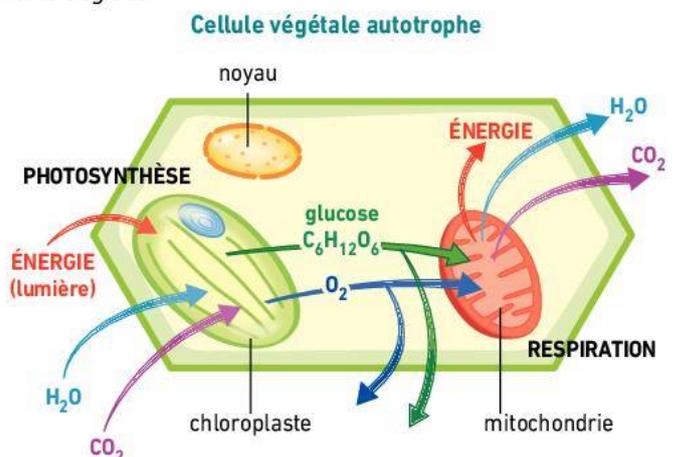
a. Obtenir de l'énergie pour couvrir les besoins cellulaires

- Pour son fonctionnement, une cellule a besoin d'énergie. Pour couvrir leurs besoins énergétiques, les cellules **dégradent des molécules organiques**, c'est-à-dire des molécules comportant du carbone et susceptibles de fournir de l'énergie, comme le glucose ($C_6H_{12}O_6$) par exemple.
- La **respiration cellulaire** est un ensemble complexe de transformations biochimiques qui dégrade **totalemment** une molécule organique. Cela nécessite une réaction chimique avec le dioxygène (O_2). Les produits finalement formés sont simplement de l'eau (H_2O) et du dioxyde de carbone (CO_2), sans aucune valeur énergétique. Ainsi, la respiration permet de tirer le maximum d'énergie à partir d'un métabolite organique. L'essentiel des réactions du métabolisme de la respiration se déroule dans des organites spécialisés, les **mitochondries**.
- Les **fermentations** sont une autre façon de transformer un métabolite organique pour obtenir de l'énergie : une fermentation se déroule dans le cytoplasme, et ne nécessite donc pas d'organite spécialisé. Certaines fermentations ne nécessitent pas de réaction avec le dioxygène. La dégradation du métabolite organique est toujours **incomplète** : il se forme un produit qui contient encore de l'énergie utilisable, comme par exemple de l'alcool.



b. Hétérotrophie et autotrophie

- Les cellules des organismes **non chlorophylliens** doivent obligatoirement trouver dans leur milieu les éléments nutritifs nécessaires à leur métabolisme, notamment des molécules organiques : on dit qu'elles sont **hétérotrophes**.
- Le métabolisme des cellules **chlorophylliennes** est différent : comme les cellules animales, elles possèdent des mitochondries et respirent. Mais, grâce aux **chloroplastes** qu'elles possèdent, elles peuvent produire elles-mêmes les molécules organiques dont elles ont besoin.



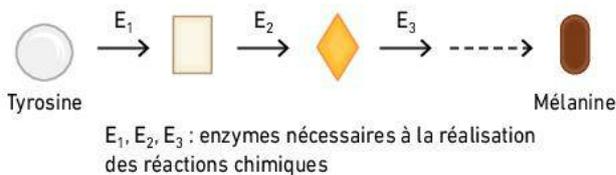
En effet, les chloroplastes sont les organites de la **photosynthèse** : grâce à l'énergie lumineuse et à partir de dioxyde de carbone (CO_2) et d'eau, les cellules chlorophylliennes font la synthèse du glucose dont elles ont besoin : on dit qu'elles sont **autotrophes**. Leurs besoins nutritifs sont donc limités à de simples molécules minérales.

À retenir La respiration et les fermentations sont deux métabolismes permettant d'obtenir de l'énergie en dégradant des molécules organiques. Les cellules et les organismes qui utilisent des molécules organiques présentes dans leur milieu sont des hétérotrophes. La photosynthèse permet de produire toutes les molécules organiques nécessaires à la vie : les cellules et les organismes qui l'effectuent sont des autotrophes.

3 Des métabolismes complémentaires et interdépendants

a. De nombreuses voies métaboliques

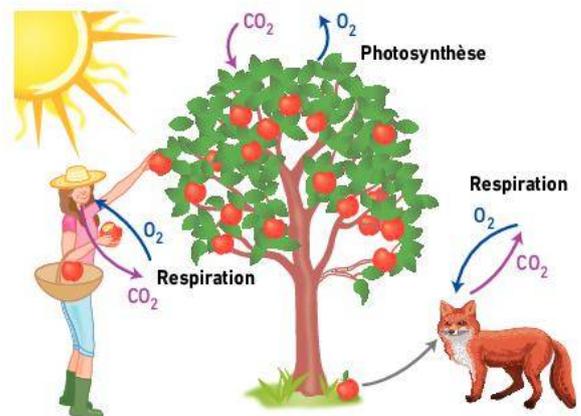
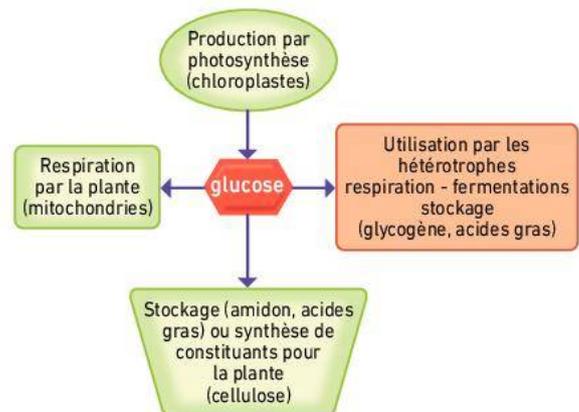
- Le métabolisme s'effectue par étapes : une **voie métabolique** est une succession de réactions biochimiques qui s'enchaînent, le produit d'une réaction étant lui-même transformé à son tour, et ainsi de suite. Chaque réaction nécessite l'intervention d'une macromolécule appelée **enzyme** qui catalyse la réaction, c'est-à-dire qui permet que la réaction chimique s'accomplisse rapidement et dans les conditions qui sont celles de la cellule. Or, les enzymes sont des produits de l'expression des gènes. Ainsi, le métabolisme dépend de l'équipement spécialisé des cellules, qui diffère selon les cellules et les organismes.



b. Des métabolismes complémentaires

- Certaines molécules sont impliquées dans plusieurs voies métaboliques. Elles constituent alors des « plaques tournantes » permettant l'**interconnexion des voies métaboliques**. C'est par exemple le cas du glucose.
- Ce produit de la photosynthèse est aussi le **métabolite dégradé** lors de la respiration cellulaire, ou lors de la fermentation alcoolique. Il intervient également comme matière première dans la **synthèse de macromolécules** comme l'amidon, le glycogène, la cellulose, ou encore d'autres molécules organiques (protéines, lipides).
- Les métabolismes sont donc **complémentaires** : la respiration des êtres vivants serait impossible sans la photosynthèse réalisée par les plantes.
- Ainsi, les cellules des êtres vivants échangent de la matière et de l'énergie entre eux et avec leur environnement.

À retenir L'ensemble des réactions du métabolisme cellulaire constituent des voies interconnectées entre elles. Par leur métabolisme, les êtres vivants échangent de la matière et de l'énergie avec leur milieu et avec d'autres organismes.

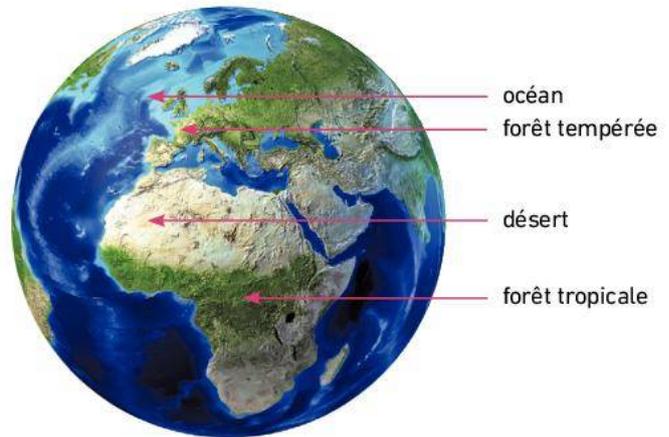


Mots-clés

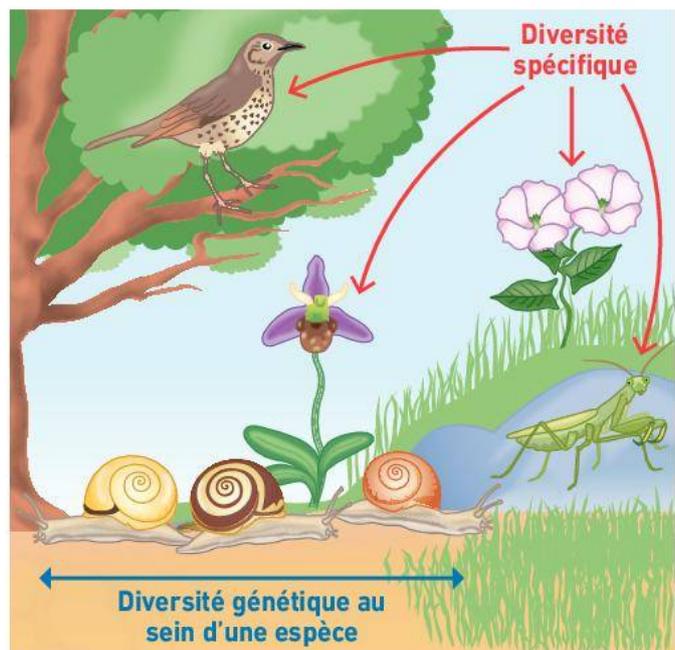
Autotrophe • Enzyme • Fermentation • Hétérotrophe • Métabolisme • Photosynthèse • Respiration • Voie métabolique

1 Trois échelles de description de la diversité du vivant

- La **biodiversité**, ou diversité du vivant, peut être décrite à trois échelles, emboîtées les unes dans les autres : l'échelle des écosystèmes, celle des espèces et celle des individus.
- Un **écosystème** est l'ensemble formé par une communauté d'êtres vivants et par leur environnement physique et chimique. On peut définir des écosystèmes à des **échelles** de taille très diverses. On définit ainsi quelques grands types d'écosystèmes continentaux. Ils se répartissent en fonction des conditions physiques du milieu, comme la pluviométrie ou la température. Les écosystèmes aquatiques sont également diversifiés du fait par exemple des différences de salinité, de profondeur, ou de température.
Au sein des grands écosystèmes planétaires, on peut mettre en évidence des écosystèmes à des échelles différentes, kilométrique, métrique voire centimétrique. Ils correspondent à des variations locales des conditions environnementales.
- Au sein d'un écosystème, la **diversité spécifique** désigne l'ensemble des espèces présentes. Les études de terrain permettent de repérer cette diversité spécifique et d'évaluer l'importance quantitative de chaque espèce. Ainsi a-t-on pu inventorier près de 2 millions d'espèces vivant actuellement sur Terre. Cependant, la diversité spécifique est loin d'être complètement connue : il pourrait en exister plus de 10 millions.
- La comparaison d'individus appartenant à la même espèce permet de constater leur diversité pour de nombreux caractères (aussi appelée diversité phénotypique). Si certaines différences sont dues à l'environnement et ne se transmettent pas, d'autres sont au contraire héréditaires : elles reposent sur une **diversité génétique**.



■ Biodiversité des écosystèmes.



■ Biodiversité des espèces et diversité génétique.

À retenir Le terme biodiversité est utilisé pour désigner la diversité du vivant. Elle peut être décrite à trois échelles : les variations entre membres d'une même espèce (diversité génétique), la diversité des espèces (diversité spécifique) et celle des écosystèmes.

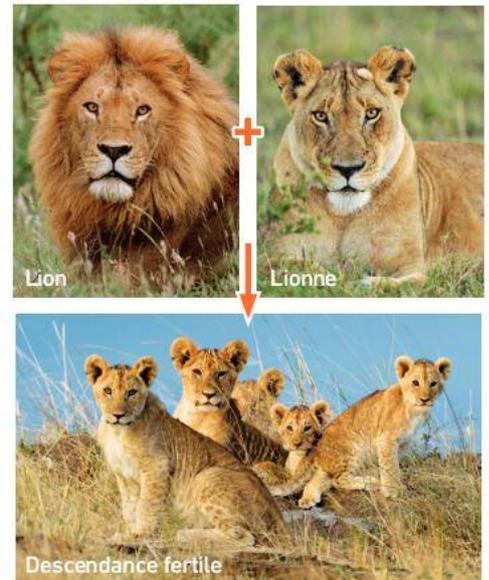
2 La notion d'espèce

- La notion d'**espèce** est très utilisée dans la description de la biodiversité. Ainsi, chaque être vivant étudié par les biologistes est nommé selon son nom d'espèce. Le nom de chaque espèce est une construction qui suit la nomenclature binominale définie par Linné au XVIII^e siècle. Il est toujours composé de deux mots (par exemple : *Hirundo rustica* est le nom scientifique de l'hirondelle rustique).
- Le concept d'espèce a changé au cours du temps. Ainsi, les philosophes antiques et les naturalistes du siècle des Lumières (XVIII^e siècle) s'appuyaient sur des **critères de ressemblance** et de reproduction à l'identique pour différencier les espèces.

Afin de tenir compte de la diversité des individus au sein des espèces, Ernst Mayr propose au milieu du XX^e siècle de reconstruire le concept d'espèce. Il formule alors la définition suivante : « *une espèce est une population ou un ensemble de populations dont les individus peuvent effectivement ou potentiellement se reproduire entre eux et engendrer une descendance viable et féconde, dans des conditions naturelles.* »

Si la définition d'Ernst Mayr est aujourd'hui la plus utilisée, on doit constater qu'elle ne fonctionne ni pour les organismes à reproduction asexuée, ni pour ceux que l'on ne connaît que par leurs restes fossiles.

Ainsi, il apparaît que l'espèce n'est pas une catégorie naturelle, mais un concept construit pour décrire de façon structurée le monde vivant qui nous entoure.



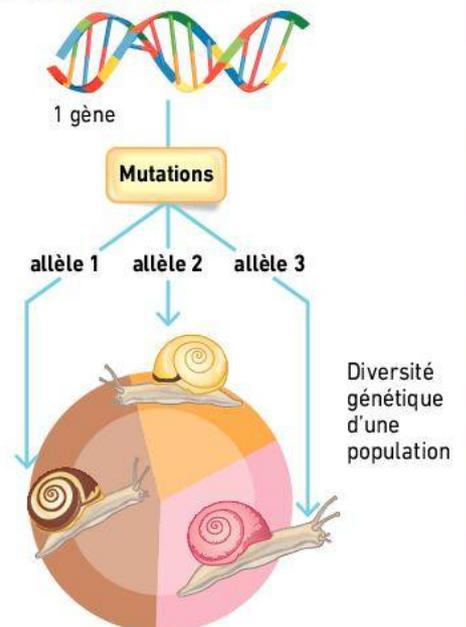
■ La notion d'espèce (ici : *Panthera leo*).

À retenir La notion d'espèce, qui joue un grand rôle dans la description de la biodiversité observée, est un concept créé par l'être humain. La définition utilisée aujourd'hui utilise le critère biologique d'interfécondité. Cette définition a cependant des limites et ne peut donc pas toujours être utilisée.

3 L'origine de la diversité des individus et des populations

- La diversité des individus d'une même espèce est en partie due à la variabilité des molécules d'ADN. En effet, la séquence des nucléotides de l'ADN peut subir des modifications imprévisibles, que l'on appelle des **mutations**. Lorsqu'un gène subit une mutation, une nouvelle version de ce gène est créée. Cette variante est appelée un **allèle** du gène. Si cet allèle se transmet aux générations suivantes, il contribuera à la diversité génétique et phénotypique de l'espèce. Ainsi, des mutations ayant eu lieu dans un passé plus ou moins lointain sont la cause de la diversité génétique des individus au sein de chaque espèce.
- Une population rassemble les individus d'une espèce occupant un même territoire (et se reproduisant donc principalement entre eux). Un allèle peut être absent d'une population, rare dans une autre, très abondant dans une troisième. À l'échelle des différentes populations d'une espèce, la diversité génétique se caractérise donc par la présence de certains allèles, mais aussi par l'abondance relative de ces allèles (**fréquences alléliques**).

À retenir Au sein de chaque espèce, la diversité des individus repose sur la variabilité de l'ADN : les mutations. Ces dernières produisent de nouveaux allèles qui peuvent coexister dans une même population. La diversité des allèles peut être différente d'une population à l'autre.



■ La diversité génétique.

Mots-clés

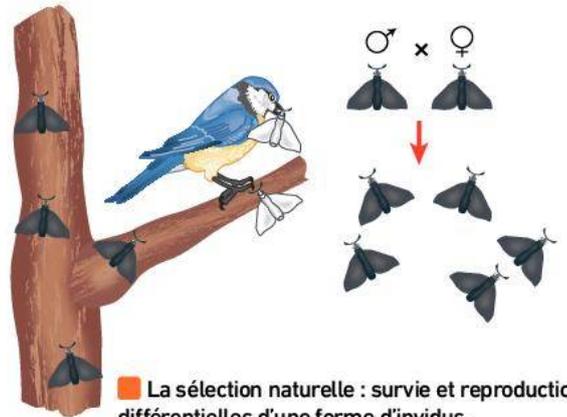
Allèle ● Biodiversité ● Diversité génétique ● Diversité spécifique ● Écosystème ● Espèce ● Fréquence allélique ● Mutation ● Population

1 Les mécanismes évolutifs s'exerçant au niveau des populations

La **biodiversité** telle qu'on l'observe aujourd'hui est à la fois le **résultat** et une **étape** de l'évolution. Il existe en effet des mécanismes qui font évoluer la **diversité génétique** des populations au cours du temps. Ce sont principalement la **sélection naturelle** et la **dérive génétique**.

La sélection naturelle

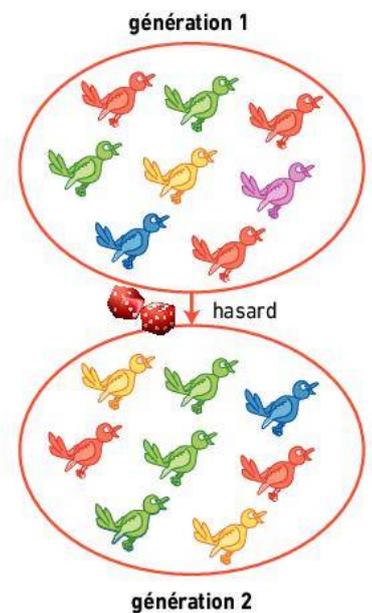
- Dans une population, certains individus présentent des caractères héréditaires qui leur procurent des **avantages sélectifs** : leurs chances de reproduction sont supérieures. Génération après génération, les **allèles** qui permettent la réalisation de ces caractères avantageux sont sélectionnés, et leur fréquence augmente dans la population. Inversement, les individus qui possèdent des caractères désavantageux laissent moins de descendants, et les allèles correspondants voient leur fréquence diminuer. De tels allèles défavorables peuvent même disparaître.
- Les différences de succès reproducteur au sein de la population sont provoquées par l'environnement dans lequel vivent les individus. On dit qu'il exerce une « **pression** » de sélection. La pression peut être physique (par exemple, certains individus vont mieux supporter que d'autres les conditions climatiques) ou biologique (par exemple, certains individus vont plus facilement échapper aux prédateurs).
- L'intensité et le sens de la pression de sélection peuvent changer. Par ailleurs, il arrive que de nouveaux allèles apparaissent par **mutation**, engendrant une **variabilité**. Ainsi, un allèle défavorable dans un contexte donné peut être favorable ailleurs, ou devenir favorable si l'environnement change.



La sélection naturelle : survie et reproduction différentielles d'une forme d'individus.

La dérive génétique

- Un autre mécanisme évolutif, uniquement dû au hasard, s'exerce à l'échelle d'une population : en effet, dans une population de taille plus ou moins importante, tous les individus ne laissent pas le même nombre de descendants. De ce fait, la fréquence des allèles peut changer de façon aléatoire. Ce phénomène, appelé **dérive génétique**, est d'autant plus fort (grandes variations de la fréquence des allèles d'une génération à la suivante) que les populations sont petites. Il s'exerce par exemple lorsqu'une partie d'une population voit ses effectifs diminuer ou lorsqu'un groupe d'individus s'isole du reste de la population.
- Au sein d'une population, la dérive génétique peut provoquer la disparition d'un allèle (fréquence égale à zéro) ou sa fixation (fréquence égale à 1).



La dérive génétique : le jeu du hasard.

À retenir La sélection naturelle est l'augmentation de la fréquence d'un caractère qui confère un avantage reproducteur, sous l'effet de la pression de facteurs du milieu de vie.

La dérive génétique est une modification aléatoire de la fréquence des allèles au sein d'une population, d'autant plus importante que l'effectif de la population est faible.

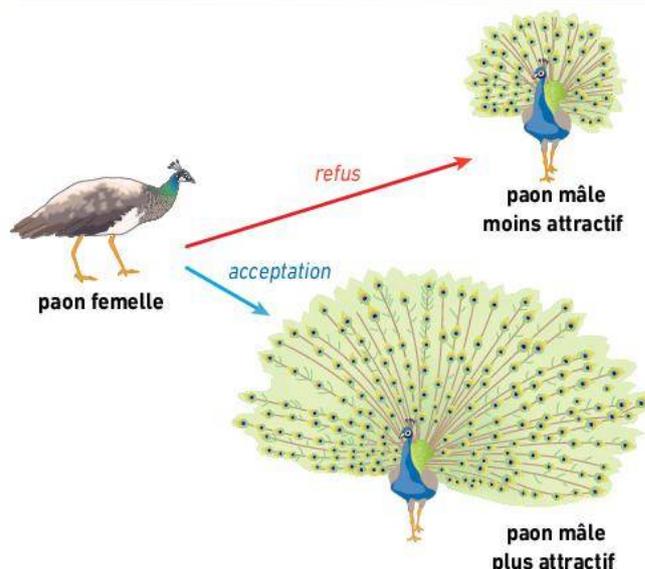
2 La communication intraspécifique et la sélection sexuelle

- La **communication entre individus d'une même espèce** consiste en la transmission d'un message depuis un émetteur vers un récepteur. Celui-ci peut alors modifier son comportement en fonction du message reçu. Il existe une grande diversité de modalités de communication : les messages transmis peuvent être de nature **chimique** (hormones, phéromones), **sonore** (cris, chants) ou **visuelle** (couleurs, formes, mouvements).

- La **communication intraspécifique** joue un rôle important dans des fonctions essentielles comme la nutrition, la défense ou la reproduction. Elle intervient dans un cas particulier de sélection naturelle qu'on appelle sélection sexuelle.

- La **sélection sexuelle** s'exerce sur les caractères qui conditionnent l'accès des individus à des partenaires sexuels (formation des couples). Elle implique souvent des mécanismes de communication entre individus du même sexe (compétition entre individus) ou entre individus de sexe opposé (caractères attractifs).

La sélection sexuelle permet ainsi d'expliquer les **dimorphismes sexuels** et l'existence de caractères extravagants (différence de masse et de taille entre mâles et femelles, appendices fortement colorés ou développés...). Ces caractères sont favorisés tant que l'avantage qu'ils procurent dans l'accès aux partenaires sexuels est supérieur aux inconvénients qu'ils entraînent pour la survie.



■ Sélection sexuelle et communication intraspécifique.

À retenir La sélection sexuelle est le processus par lequel certains caractères sont sélectionnés en vertu de l'avantage qu'ils confèrent dans l'accès aux partenaires sexuels, et donc dans la reproduction ; c'est un cas particulier de sélection naturelle.

3 La spéciation

- La **spéciation** est la formation d'une ou plusieurs nouvelles espèces à partir d'une espèce préexistante. Une spéciation peut se produire lorsqu'une population est séparée géographiquement en deux sous-populations. Celles-ci vont alors **évoluer indépendamment** sous l'effet de la **dérive génétique** et de la **sélection naturelle** propres à chaque milieu.

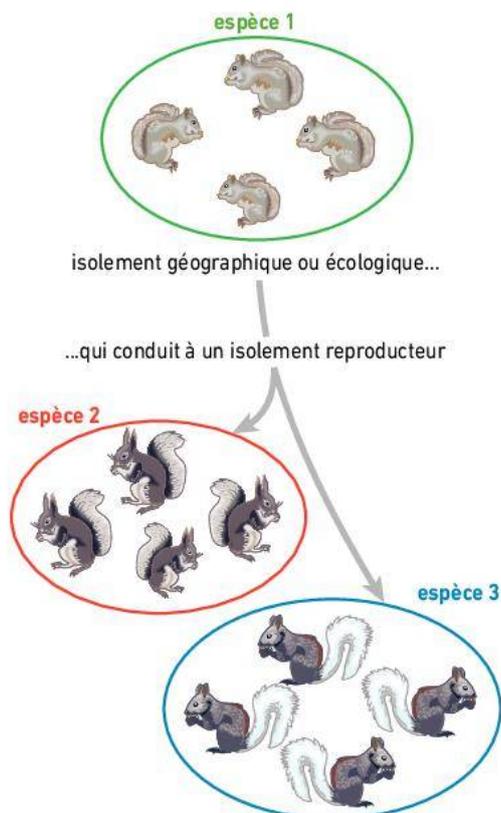
Parfois, il est possible que les différences deviennent telles que, même réunis à nouveau, les individus des deux populations ne sont plus **interféconds** : les deux populations ainsi isolées sur le plan reproducteur n'échangent plus de gènes et forment alors deux espèces distinctes.

- Des événements de spéciation peuvent également se produire sans séparation géographique des deux sous-populations. C'est le cas par exemple si deux sous-populations acquièrent chacune une particularité écologique qui l'isole de l'autre du point de vue de la reproduction.

Des perturbations de la communication entre individus d'une même population, par exemple une modification du signal ou des difficultés dans sa réception, peuvent conduire à l'isolement reproducteur d'une sous-population, et être ainsi à l'origine d'un événement de spéciation.

À retenir Il arrive qu'une population se fragmente en sous-populations isolées les unes des autres sur le plan géographique ou écologique.

La **dérive génétique** et la **sélection naturelle** peuvent alors conduire à l'isolement reproducteur de ces sous-populations et à la formation de nouvelles espèces.



■ Cas de spéciation chez les écureuils.

Mots-clés

Communication ● Dérive génétique ● Fréquence allélique ● Isolement reproducteur ● Population ● Sélection naturelle ● Sélection sexuelle ● Spéciation.

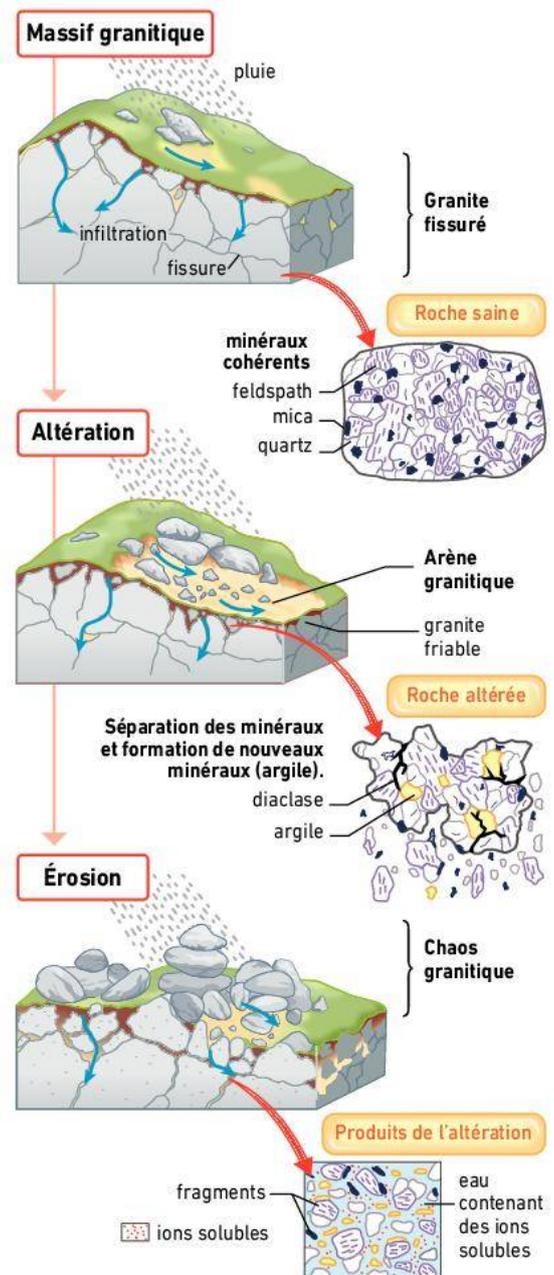
1 De l'observation des paysages aux produits de l'altération des roches

a. L'évolution des paysages

- Bien qu'ils nous paraissent immuables, les paysages qui nous entourent évoluent. Ces changements affectent particulièrement les zones montagneuses. Les reliefs changent, s'aplanissent, le plus souvent de façon imperceptible à l'échelle d'une vie humaine.
- Selon la nature des roches, l'évolution des paysages n'est pas la même. Les roches calcaires produisent des paysages de plateaux secs entrecoupés de gorges où coulent des rivières, et percés de gouffres et de galeries creusées par l'écoulement souterrain de l'eau. Le démantèlement des roches granitiques produit des paysages plus arrondis et des vallées plus larges.

b. L'altération des roches

- **L'altération** est un ensemble de processus mécaniques et chimiques qui transforment les roches dès lors qu'elles sont exposées à l'environnement de surface. Elle agit surtout au niveau de zones de discontinuité (failles, diaclases).
 - **L'altération mécanique** affecte la structure physique de la roche.
 - Les variations brutales de température provoquent la séparation des minéraux, augmentent la fissuration de la roche.
 - Dans des régions où l'eau subit une alternance de gel et de dégel, la roche finit par se fendre et éclater.
 - Les racines des végétaux qui se développent agrandissent les fissures.
 L'altération mécanique conduit à la désagrégation de la roche qui perd sa solidité, sa cohérence, et se fragmente. Cette **fragmentation** augmente encore l'exposition de la roche aux divers facteurs de l'altération.
 - **L'altération chimique** affecte la composition de la roche et de ses minéraux. L'eau en est la principale cause. Elle provoque la dissolution de certains minéraux (c'est le cas du carbonate de calcium, principal minéral du calcaire). Elle modifie la structure d'autres minéraux, qui finissent par disparaître (les feldspaths et les micas du granite) tandis que d'autres se forment (les argiles). Enfin, certains minéraux comme le quartz sont pratiquement inaltérables.
- L'altération varie selon le climat : l'altération chimique est plus active sous un climat chaud et humide, tandis que les climats plus secs sont propices à l'altération mécanique (variations brutales des températures en milieu désertique). L'altération génère des **ions solubles**, ainsi que des **débris solides** de tailles variables.



■ Paysage et altération des roches.

À retenir Tous les paysages se transforment du fait de l'altération physique et chimique des roches, de façons différentes selon la nature des roches, le climat et la végétation. L'eau est le principal facteur de l'altération des roches. L'altération produit des ions solubles et des débris rocheux de toutes tailles.

a. Transport et dépôt des produits de l'altération

- Les produits issus de l'altération de la roche restent rarement sur place. Ils sont évacués et transportés, parfois très loin du site d'origine : c'est l'**érosion**.
- L'eau est le principal agent d'érosion. Elle transporte les ions sous forme dissoute, mais aussi les débris solides, des éboulis vers les torrents, les rivières, les fleuves, parfois jusque dans les mers. Lorsque la pente et la vitesse du courant diminuent, les particules se déposent, par ordre décroissant de leur taille. Elles forment alors des **sédiments** qui s'accumulent dans le lit des rivières ou au fond de la mer.
- La charge sédimentaire (quantité de sédiments produits par un bassin versant chaque année) permet d'estimer l'intensité de l'érosion régionale. Il existe une grande variabilité de la charge sédimentaire, selon le climat et les reliefs.

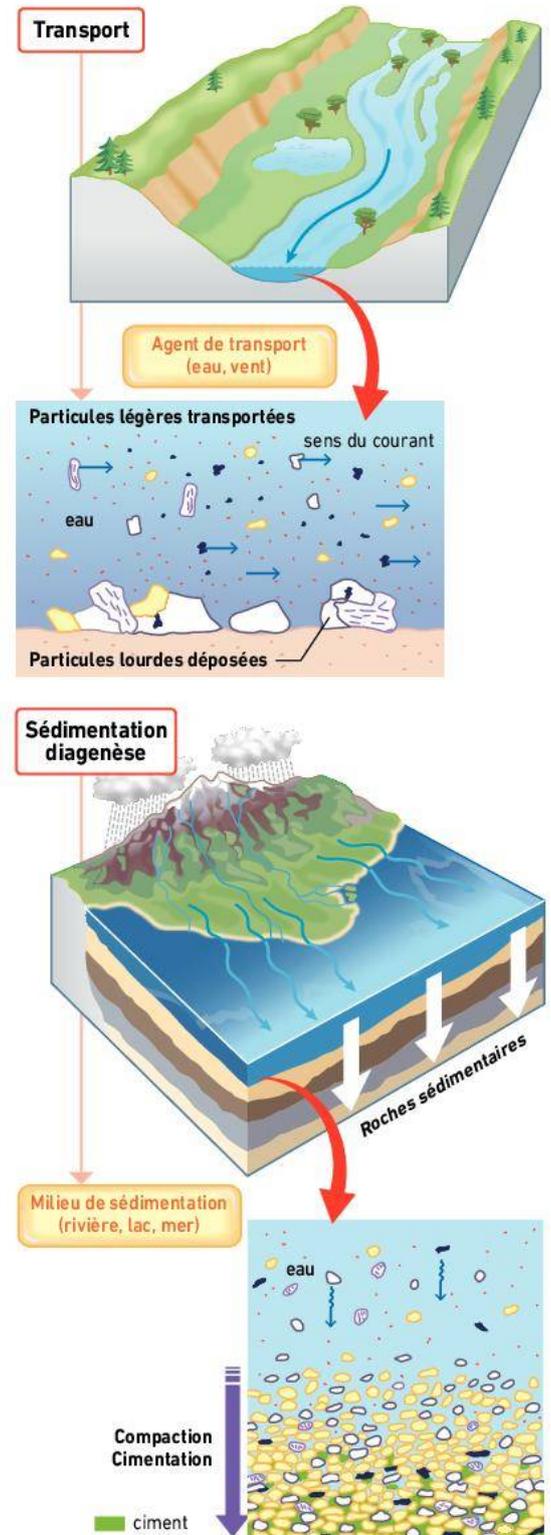
b. Transformation des sédiments en roches sédimentaires

- Les **roches détritiques** proviennent de particules érodées puis consolidées. La classification de ces roches est basée sur la taille et la forme des fragments qu'elles renferment. On distingue les conglomérats constitués d'éléments grossiers, les grès et les pélites formés d'éléments plus petits.
- La formation des roches détritiques se déroule dans l'environnement de leur dépôt. Les sédiments s'accumulent et la pression ainsi que la température augmentent. Lors de leur enfouissement, ils subissent une **compaction** et une **cimentation**. L'ensemble de ces processus porte le nom de **diagenèse**.

c. Reconstitution des paléo-environnements

- Selon le principe d'actualisme, les mêmes causes produisent toujours les mêmes effets. Il est donc possible de transférer des observations géologiques actuelles aux roches anciennes. L'application de ce principe permet de reconstituer l'environnement dans lequel des roches détritiques se sont formées. La forme des particules (arrondi, sphéricité), leur classement et leur taille révèlent les modalités de leur transport. Parfois, les **figures sédimentaires** témoignent du **milieu de sédimentation** (effets des marées, par exemple).

À retenir Les produits de l'altération subissent l'érosion et sont transportés sous forme soluble ou solide. Les sédiments se déposent et se transforment lentement en roche sédimentaire détritique, par compaction et cimentation. Les caractéristiques des particules contenues dans ces roches témoignent des conditions de leur transport et du milieu de sédimentation.

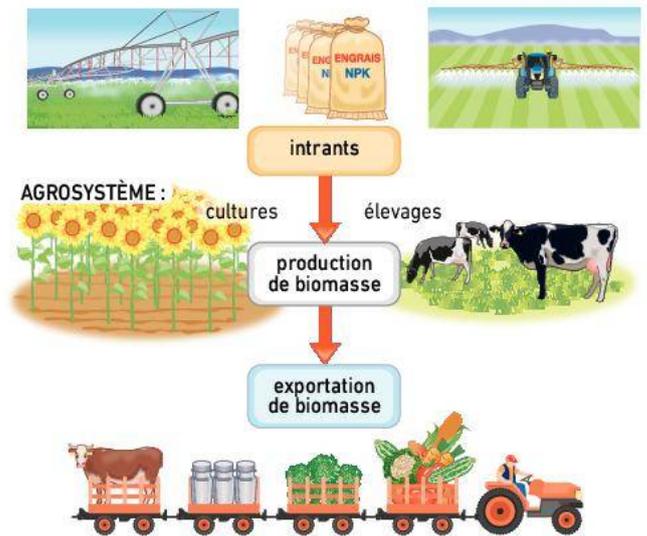


Mots-clés

Altération ● Diagenèse ● Érosion ● Milieu de sédimentation ● Roche détritique ● Sédiments

1 L'agrosystème, producteur de biomasse

- Dans un **agrosystème**, l'agriculteur modifie certains paramètres de l'environnement de la plante cultivée ou de l'animal élevé afin d'en augmenter la **productivité**. Pour cela, il utilise des **intrants** :
 - des **produits phytosanitaires** (insecticides, herbicides, fongicides) ou des **médicaments** (antibiotiques), permettant le maintien d'un bon état de santé des cultures ou des animaux élevés ;
 - de l'**eau** (irrigation des cultures, alimentation des animaux) ;
 - des **engrais**, permettant de maintenir la **fertilité** des sols après l'**exportation** de matière lors des récoltes ou du pâturage ;
 - des **variétés végétales** ou **races animales sélectionnées**.
- L'utilisation de ces intrants par les agriculteurs permet de produire de grandes quantités de biomasse, visant à assurer les besoins d'une population toujours croissante.

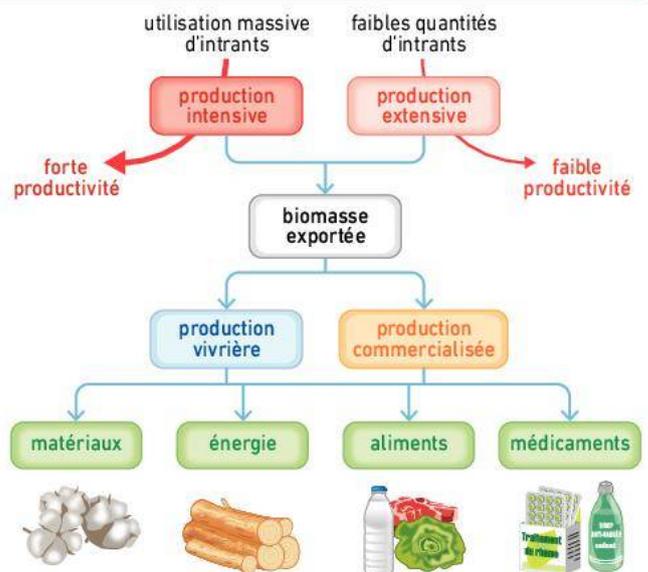


■ Les agrosystèmes produisent de la biomasse.

À retenir Dans un agrosystème, l'agriculteur cherche à optimiser les conditions d'environnement de façon à produire de grandes quantités de biomasse végétale ou animale. Il augmente la productivité par l'utilisation d'intrants.

2 La diversité des agrosystèmes

- Les agrosystèmes permettent une production de **biomasse** afin d'assurer les besoins alimentaires de l'humanité, mais ils interviennent aussi dans d'autres secteurs comme la fabrication de matériaux (textile, construction), d'énergie (bois combustible, agrocarburants), ou encore de produits pharmaceutiques.
- Les agrosystèmes peuvent être **terrestres** ou **aquatiques**. Les produits peuvent être destinés à la consommation familiale et locale (**production vivrière**) ou à l'industrie. Les quantités d'intrants utilisées peuvent être faibles, ce qui limite la productivité (**système extensif**) ; au contraire, on peut rechercher une productivité maximale à l'aide d'apports massifs d'intrants ou encore de races animales sélectionnées pour leur **rendement écologique** élevé (**système intensif**).
- Les savoir-faire et les choix des agriculteurs, soumis aux contraintes géologiques et climatiques locales, permettent la formation de **terroirs**, caractérisés par des produits aux qualités reconnaissables.



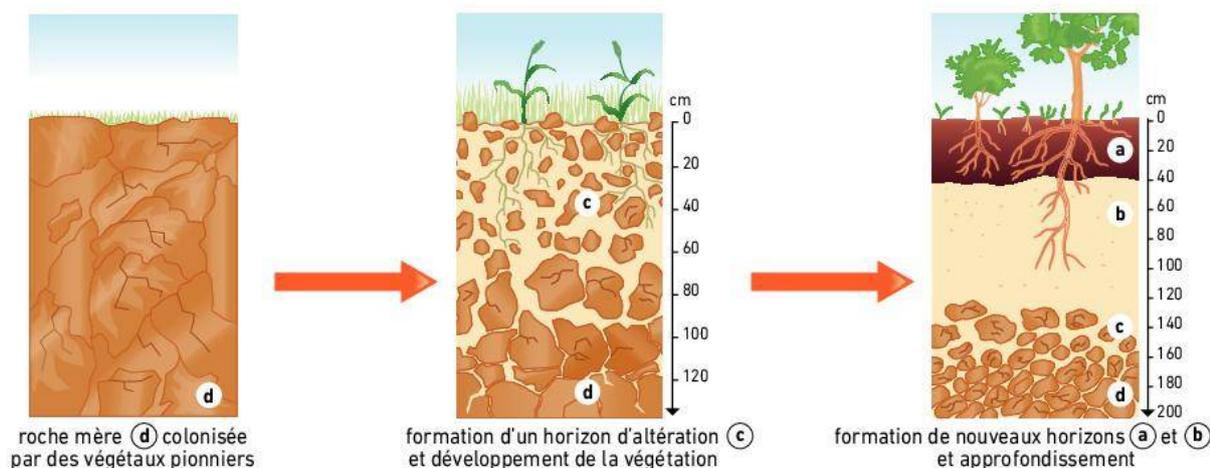
■ Des objectifs et des modes de production très divers.

À retenir Les caractéristiques d'un agrosystème peuvent varier en fonction des objectifs de production et de la recherche d'une productivité plus ou moins élevée.

3 La formation d'un sol

- Les sols forment une « pellicule » très fine, de quelques décimètres à quelques mètres d'épaisseur tout au plus, à la surface des continents. Ils résultent des interactions entre les êtres vivants, l'atmosphère, la roche mère et l'eau.
- La pluie, les variations de température et les êtres vivants pionniers provoquent la fragmentation de la **roche mère** et son **altération** chimique, ce qui est à l'origine de la formation d'argiles : un **horizon d'altération** se forme alors.
- En surface, la végétation se développe peu à peu et fournit de la matière organique consommée par la faune du sol, les champignons et les bactéries. La vie du sol, organisée en **réseau trophique**, permet ainsi la formation de l'humus et son mélange avec les argiles pour donner naissance au **complexe argilo-humique** : un **horizon humifère** apparaît.

À retenir Des sols résultent de l'interaction entre les roches, l'air, l'eau et les êtres vivants. Les plantes prélèvent des éléments minéraux dans les sols, participant ainsi à la production de biomasse.

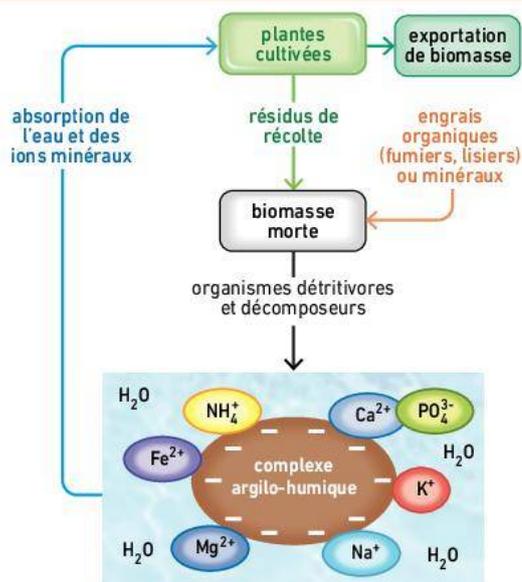


Les sols se forment et évoluent très lentement.

4 La fertilité d'un sol

- La **fertilité** d'un sol désigne sa capacité à permettre la production de biomasse végétale, c'est-à-dire à fournir l'eau et les ions minéraux (nitrates, phosphates, calcium, fer, magnésium, potassium...) dont les plantes ont besoin.
- Or, ces ions minéraux proviennent de la lente décomposition de l'humus par les organismes **décomposeurs** (champignons et bactéries). Le **complexe argilo-humique** retient facilement l'eau et les ions minéraux. Il constitue donc une réserve importante de matières minérales disponibles pour les plantes, qui pourront ainsi assurer leur croissance. Il y a alors un **cycle de la matière** minérale entre le sol et les plantes qui s'y développent.
- La nature de la roche mère détermine en partie les propriétés du sol et sa fertilité. Les sables donnent des sols plutôt pauvres, tandis que les sols des régions volcaniques sont parmi les plus fertiles.

À retenir En consommant la biomasse morte, les êtres vivants du sol recyclent cette biomasse en éléments minéraux, assurant la fertilité des sols.



La fertilité d'un sol cultivé.

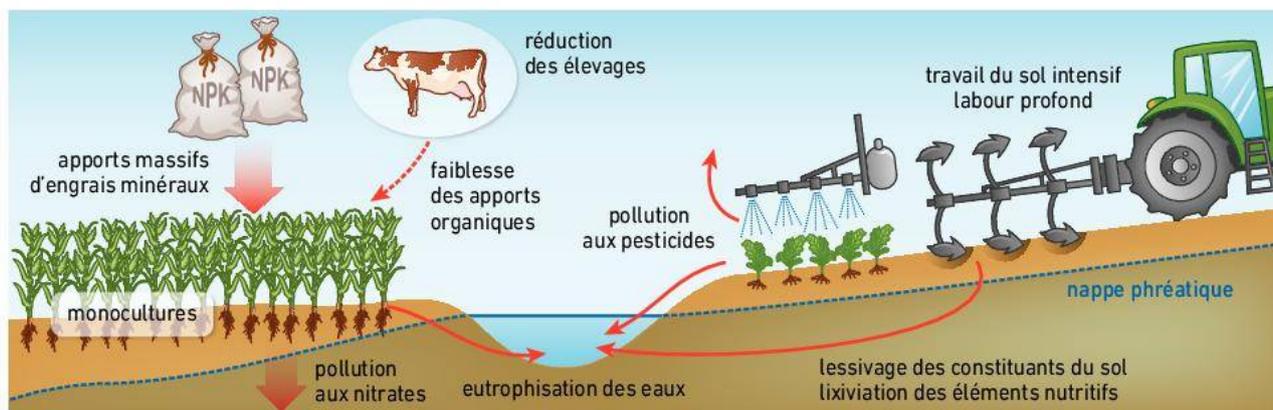
Mots-clés

Agrosystème • Biomasse • Décomposeur • Intrant • Productivité (agricole) • Rendement écologique • Réseau trophique

1 Agriculture intensive, environnement et santé

- Dans les pays développés, l'**agriculture intensive** est largement pratiquée, notamment sous la forme de **monocultures**. Le maintien d'une **productivité** élevée s'inscrit à la fois dans la recherche d'un équilibre économique des exploitations et dans la nécessité de garantir les besoins d'une population croissante, à un moindre coût.
- Cependant, le recours massif aux **intrants** n'est pas sans conséquence sur notre environnement. Il provoque notamment :
 - une baisse de la **fertilité des sols** causée par :
 - un manque d'apports organiques, dû à une baisse du nombre d'animaux élevés dans les zones de grandes cultures,
 - un **lessivage** hivernal facilité par les **labours** profonds et la destruction des haies lors du remembrement ;
 - une **eutrophisation** des cours d'eau, lacs et bords de mers ainsi qu'une **pollution des nappes phréatiques** causées par l'utilisation de plus en plus massive d'**engrais minéraux** en partie perdus par **lixiviation** ;
 - une **contamination** des eaux, de l'air, du sol et des organismes vivants par de nombreuses molécules issues des **pesticides**.
- L'ensemble de ces facteurs (pertes des habitats naturels, pollutions, travail du sol) ont conduit à un **effondrement de la biodiversité** naturelle au sein des agrosystèmes et dans leur environnement.
- L'agriculture intensive a aussi des conséquences sur la santé humaine :
 - la pollution des nappes phréatiques par les **nitrate**s peut avoir de graves conséquences sur la santé (difficultés respiratoires, cancers) notamment pour les femmes enceintes et les nourrissons ;
 - de nombreux pesticides pénètrent au sein de nos organismes par voie respiratoire, mais aussi en consommant de l'eau ou des aliments contaminés. Ces pesticides sont suspectés d'être la cause de diverses pathologies (cancers, malformations congénitales, retards de développement, baisse de la fertilité) mais les preuves scientifiques de leur responsabilité sont souvent difficilement établies.

À retenir L'utilisation massive d'intrants (engrais, produits phytosanitaires) et certaines pratiques culturales comme le labour profond ont des effets négatifs sur la qualité des sols, sur la biodiversité et sur l'état général de l'environnement. La contamination de notre environnement par les intrants utilisés dans les agrosystèmes est à l'origine de pathologies humaines, certaines avérées, d'autres suspectées.



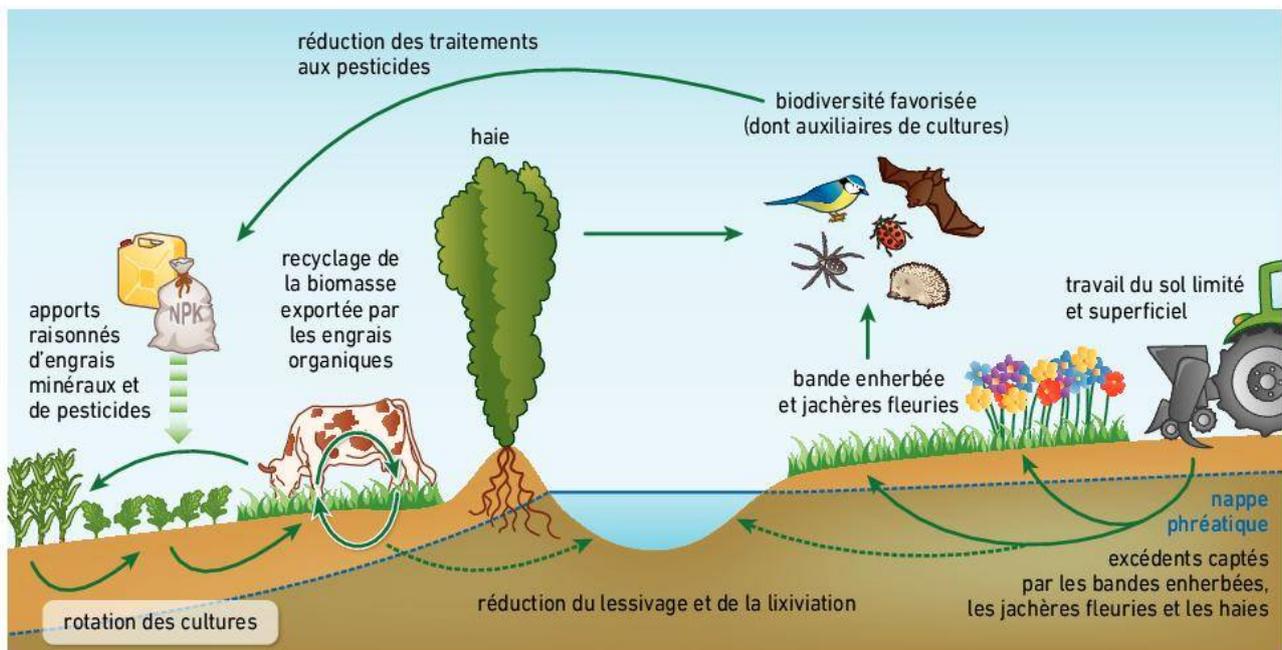
Des pratiques agricoles néfastes pour l'environnement et la santé.

2

D'une agriculture conventionnelle vers une agroécologie

- La redécouverte d'anciennes pratiques, combinée aux technologies modernes et aux connaissances actuelles de biologie et d'écologie permet le développement d'**agrosystèmes écoresponsables et rentables**. On appelle **agroécologie** une agriculture désireuse de concilier une productivité satisfaisante et le respect de l'environnement.
- La limitation des impacts environnementaux des intrants peut passer par :
 - une **polyculture** avec rotation des espèces cultivées :
 - défavorisant l'installation sur le long terme de **plantes adventices**,
 - enrichissant les sols par la culture de **légumineuses** capables de fixer l'azote de l'air,
 - limitant le **lessivage** et la **lixiviation** par l'installation de **couverts végétaux** en hiver ;
 - l'association d'**élevage aux cultures** permettant une meilleure gestion de la fertilité des sols (apports de matières organiques par les animaux) ;
 - une utilisation raisonnée des intrants avec des apports estimés au plus juste tout en privilégiant les substances autorisées en **lutte biologique** et en **lutte intégrée** ;
 - les techniques d'**agroforesterie** préconisant la réimplantation des haies et des arbres, l'installation de bandes enherbées et de jachères fleuries. Cela permet d'absorber les excédents d'engrais et d'abriter les **auxiliaires des cultures**, limitant ainsi le recours aux pesticides ;
 - les **techniques de cultures simplifiées** (semis direct, absence de labours...) limitant le travail du sol pour favoriser sa biodiversité et sa fertilité.

À retenir L'un des enjeux majeurs de l'agriculture moderne est la limitation de ses impacts environnementaux tout en couvrant les besoins de l'humanité. La recherche agronomique actuelle, qui s'appuie sur les avancées technologiques et sur l'étude des processus biologiques et écologiques, propose des solutions concrètes pour le développement d'une agriculture durable.



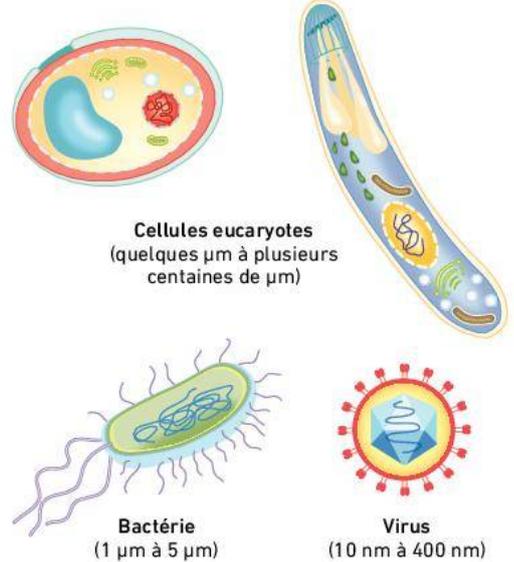
■ Des pratiques agricoles plus durables.

Mots-clés

Agroécologie ● Agroforesterie ● Auxiliaire de culture ● Lutte biologique ● Lutte intégrée ● Polyculture

1 La diversité des microorganismes

- Le monde des microbes, ou microorganismes, n'est pas homogène. Certains sont des êtres vivants **unicellulaires eucaryotes** (c'est-à-dire dont les cellules comportent des organites). C'est le cas des levures, qui sont des champignons. Il existe bien d'autres groupes d'organismes unicellulaires, très différents les uns des autres.
- Les **bactéries** sont des cellules nettement plus petites et d'organisation plus simple : la cellule bactérienne ne comporte pas d'organites. Comme les eucaryotes, les bactéries échangent matière et énergie avec leur environnement, croissent et se reproduisent par division.
- Les **virus** sont à la limite du monde vivant : ce sont des parasites obligatoires des cellules eucaryotes et des bactéries. Ils possèdent une information génétique, mais utilisent une cellule hôte pour se reproduire, et leur multiplication conduit le plus souvent à la destruction de leur cellule hôte.
- Les microorganismes peuvent se rencontrer dans des milieux variés : eau, air, sol, êtres vivants. La plupart sont inoffensifs. Le corps humain héberge lui-même une multitude de microorganismes qui constituent ce qu'on appelle son **microbiote**, et contribuent à une bonne santé.
- Il existe cependant des microorganismes qualifiés de **pathogènes**, car ce sont les agents de maladies infectieuses. Les agents pathogènes peuvent être des eucaryotes (mycoses, paludisme...), des bactéries (tétanos, tuberculose...) ou des virus (grippe, SIDA...).

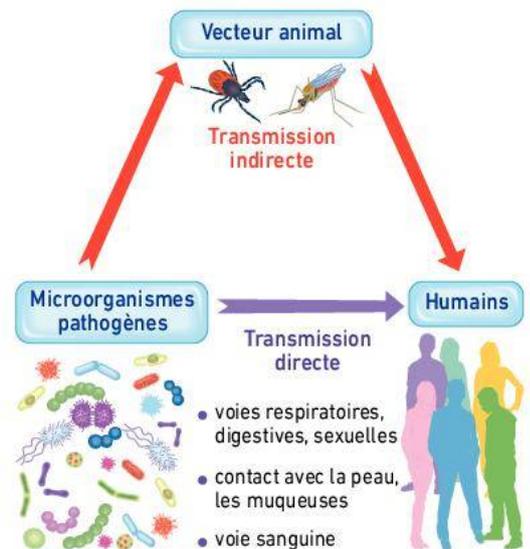


La diversité des microorganismes.

À retenir Les microorganismes forment un monde complexe et diversifié. Ils vivent dans tous les milieux et sont présents dans notre environnement (air, eau). Ceux que nous hébergeons forment notre microbiote. D'autres, pathogènes, nous parasitent et sont des agents de maladies.

2 Agents pathogènes et maladies

- Les **agents pathogènes** vivent et se multiplient aux dépens d'autres êtres vivants, leurs hôtes, qui constituent leurs milieux biologiques. Ils leur portent préjudice en déclenchant des maladies.
- Le **VIH** est le virus de l'immunodéficience humaine : il a pour **cellules cibles** des cellules jouant un rôle fondamental dans la réponse immunitaire. Il utilise ces cellules pour se reproduire, ce qui les détourne de leur fonction et finit par les détruire. Quand le nombre de lymphocytes est devenu insuffisant pour permettre à la personne infectée de se défendre contre d'autres pathogènes, le **SIDA** (Syndrome d'immunodéficience acquise) est déclaré. Sans traitement, cette maladie est mortelle. Le **Plasmodium** est un exemple de microorganisme eucaryote dont certaines espèces sont pathogènes : il infecte les cellules du foie et les globules rouges humains, ce qui provoque les symptômes du **paludisme** (fortes fièvres, anémie...).
- La propagation des pathogènes se fait soit par le milieu ambiant (air, eau), soit par **changement d'hôte**. Celle-ci se réalise **directement** par contact entre hôtes humains, comme dans le cas de l'infection par le VIH, par relations sexuelles, ou par l'intermédiaire d'un autre être vivant, comme l'anophèle femelle (une espèce de moustique), dans le cas du *Plasmodium*. Le moustique infecté par le *Plasmodium* est alors un **vecteur** qui transmet aux humains l'agent pathogène, ce qui permet à ce dernier d'accomplir une partie de son **cycle de développement** (ou cycle évolutif). On parle de **maladie vectorielle**.



La propagation des agents pathogènes.

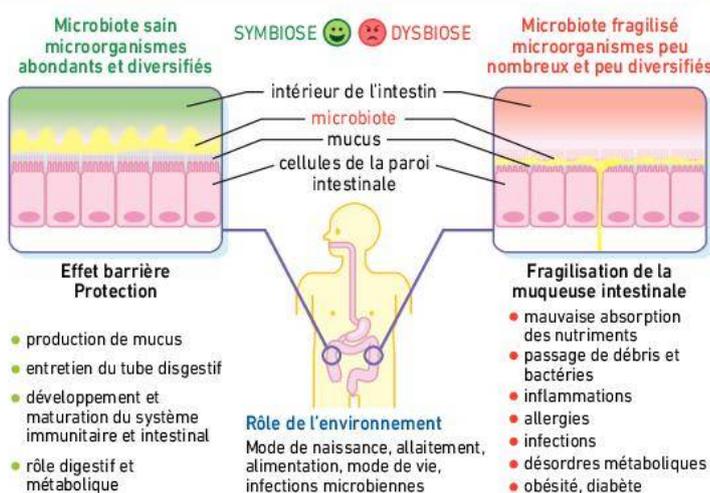
- Les hôtes des pathogènes n'ont pas toujours les symptômes de la maladie. Ce sont dans ce cas des **porteurs sains** qui peuvent transmettre l'agent pathogène sans le savoir et provoquer, comme lors de l'infection par le VIH, une **épidémie** mondiale.
- Le paludisme est une **maladie endémique** des zones géographiques où les anophèles sont présents. Ce sont principalement les pays de la zone intertropicale, au climat chaud et humide, propice à la reproduction des moustiques. Mais le réchauffement climatique pourrait étendre leurs territoires.
- Pour limiter la propagation des pathogènes, il faut empêcher leur multiplication par des **mesures collectives et individuelles** : prophylaxie (prévention, dépistage, traitement), actions sur l'habitat et les zones de reproduction du vecteur, traitements médicamenteux, vaccination si elle existe.



À retenir Les hôtes des agents pathogènes peuvent être humains ou animaux. Leur transmission peut se faire par le milieu ambiant, directement entre humains ou indirectement par un vecteur animal. La connaissance du cycle de développement des pathogènes permet de lutter contre leur propagation.

3 Microbiote humain et santé

- Le **microbiote** humain comprend l'ensemble des microorganismes qui vivent sur et dans le corps humain. Toutes les zones du corps en contact avec le milieu extérieur (peau, muqueuses) possèdent un microbiote de composition particulière. Les microbes qui y vivent profitent de conditions (pH, présence ou non de dioxygène, sébum, mucus, nourriture...) qui leur sont favorables. Ils sont hébergés et nourris par leur hôte humain. Leur présence et leur activité sont bénéfiques pour celui-ci.
- Le **microbiote intestinal** est le plus important en nombre. Il est constitué de bactéries anaérobies (qui vivent sans dioxygène). Il se met en place dès la naissance à partir des microbiotes maternels et évolue pour se stabiliser vers l'âge de 3 ans. Sa composition peut varier au cours de la vie et de l'état de santé, mais chacun possède un microbiote qui lui est propre.
- Le microbiote intestinal permet la **digestion** de glucides complexes que nous ne sommes pas capables de digérer par nous-mêmes (fibres végétales). Il nous apporte des acides gras et des **vitamines**. Par son abondance et un effet de compétition, il empêche la prolifération de microbes pathogènes. Il agit sur les cellules **immunitaires** intestinales et permet la maturation du système immunitaire. Certaines bactéries ont un **effet anti-inflammatoire**.
- La relation entre l'organisme humain et ses microbiotes, bénéfique aux différents partenaires, est une **symbiose**. Quand cet **écosystème** est déséquilibré, perturbé dans sa composition et/ou son fonctionnement, des désordres métaboliques (obésité, diabète) ou des **maladies** (inflammatoires, infectieuses) peuvent se mettre en place. Le traitement de ces pathologies implique une restauration de la diversité et de l'abondance du microbiote.



Le rôle du microbiote humain.

À retenir Notre corps héberge naturellement des communautés de microorganismes qui nous sont propres, formant notre microbiote avec lequel nous établissons une relation de symbiose. Les rôles du microbiote intestinal sont multiples, indispensables dans la digestion et l'immunité. Des désordres du microbiote peuvent être à l'origine de problèmes de santé.

Mots-clés

Endémique ● Épidémie ● Microbiote ● Parasite ● Pathogène ● Porteur sain ● Prophylaxie ● Symbiose ● Vecteur

Rappels du programme de 1ère ENS

Tiré du livre de 1ère Edition Bordas



1 Formation des éléments

Transformations nucléaires au sein des étoiles

C'est à partir d'un petit nombre de **particules élémentaires** qui se sont organisées en unités de plus en plus complexes que s'est constituée la matière de l'Univers.

Il y a 13,8 milliards d'années, juste après le **Big Bang**, l'Univers était principalement constitué de noyaux d'**hydrogène**, de numéro atomique $Z = 1$. L'hydrogène est le plus léger des éléments puisqu'il est constitué d'un seul proton.

L'hydrogène est le carburant majeur des étoiles et sa **transformation nucléaire** en hélium est la première étape de la formation d'autres noyaux plus lourds, appelée **nucléosynthèse** (Fig. 1).

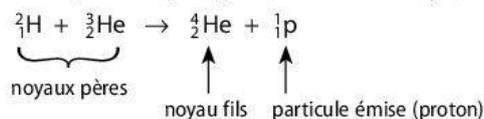
La formation de noyaux à partir de noyaux plus légers peut être modélisée par des réactions de **fusion**.

Lors d'une fusion, deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd. Une grande quantité d'énergie est alors libérée.

La plupart des noyaux d'atomes sont stables. Ils le doivent à l'interaction forte entre nucléons qui l'emporte sur la répulsion électrostatique entre protons (qui possèdent tous la même charge positive). Cependant, au cœur des étoiles, la forte densité et la température extrême permettent à deux noyaux légers de fusionner.

La fusion de deux noyaux peut s'accompagner de l'éjection d'une ou plusieurs particules (neutron, proton...).

Exemple : Fusion d'un isotope de l'hydrogène, le deutérium (${}^2_1\text{H}$), et de l'hélium 3 (${}^3_2\text{He}$) :



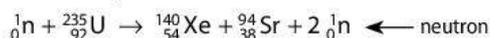
Les éléments plus lourds que l'hélium sont produits dans les derniers stades de la vie des étoiles. Des fusions successives conduisent d'abord jusqu'au fer, l'élément le plus stable du tableau périodique, puis dans la phase ultime de la vie de l'étoile, seront formés les éléments plus lourds que le fer.

Fission nucléaire

La **fission** est un autre type de transformation nucléaire.

Lors d'une fission nucléaire, un noyau lourd se brise en deux noyaux plus légers.

Exemple : Équation de fission possible de l'uranium 235 :



La matière dans l'Univers

Représentant plus de 90 % des atomes de la matière connue, soit presque les $\frac{3}{4}$ de sa masse, l'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'Univers. Il est suivi par l'hélium. Très loin ensuite viennent : l'oxygène, le carbone, l'azote...

Dans l'Univers, les éléments hydrogène et hélium sont prédominants (Fig. 2).

La Terre est surtout constituée d'oxygène, d'hydrogène, de fer, de silicium et de magnésium. Les êtres vivants sont constitués de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote (CHON) qui sont les éléments indispensables à la vie.

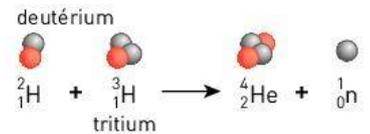


Fig. 1 : Fusion de deux noyaux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium, pour former un noyau d'hélium (et un neutron).

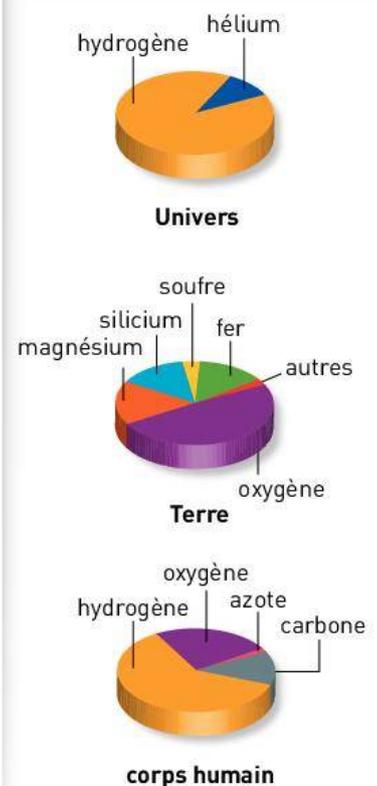


Fig. 2 : Abondance des éléments chimiques (en pourcentage d'atomes) dans l'Univers, sur Terre et dans les êtres vivants.

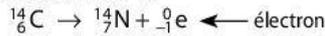
2 Radioactivité

◆ Définition

Un excès de protons par rapport aux neutrons, ou l'inverse, ou encore trop de nucléons, rendent certains noyaux d'atomes instables. Ces **noyaux instables** vont alors se transformer **spontanément** en d'autres noyaux : ils se **désintègrent**, en émettant des **rayonnements** sous forme de **particules chargées** et/ou d'**ondes électromagnétiques**.

La **radioactivité** est la désintégration spontanée d'un noyau instable (noyau père) en un autre noyau plus stable (noyau fils).

Exemple : Désintégration du carbone 14 :



◆ Un phénomène aléatoire

Un noyau radioactif doit se transformer pour être plus stable. Cependant, il est impossible de déterminer à quel moment il va le faire.

La radioactivité est un phénomène **aléatoire**.

Par conséquent, les lois régissant la radioactivité sont statistiques (elles sont élaborées sur un grand nombre d'échantillons d'un noyau donné) et l'avenir d'un noyau radioactif ne se prédit qu'en termes de probabilité.

La radioactivité est un phénomène naturel, mais on sait aussi créer des éléments radioactifs artificiels. Ses nombreuses applications concernent la médecine (radiothérapie, imagerie), la datation, l'industrie (traceurs, stérilisation...).

◆ Demi-vie d'un noyau radioactif

La demi-vie, notée $t_{1/2}$, est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux d'un échantillon radioactif se soit désintégrée.

La **demi-vie** est caractéristique du noyau radioactif (**Fig. 3**).

Exemple : Pour ${}^{238}_{92}\text{U}$, $t_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ années, alors que pour ${}^{15}_8\text{O}$, $t_{1/2} = 1,2 \times 10^2$ secondes.

On note N_0 le nombre de noyaux radioactifs tous identiques initialement présents dans un échantillon. Au bout de la durée $t_{1/2}$, la population de noyaux a diminué de moitié et il en reste un nombre $\frac{N_0}{2}$. On peut déterminer graphiquement $t_{1/2}$ sur la **courbe de décroissance radioactive** (**Fig. 4**).

Phosphore 32	14,3 jours
Iridium 192	74 jours
Cobalt 60	5,25 années
Césium 137	30 années
Carbone 14	5 730 années
Uranium 238	$4,5 \times 10^9$ années

Fig. 3 : Demi-vies de quelques noyaux radioactifs.

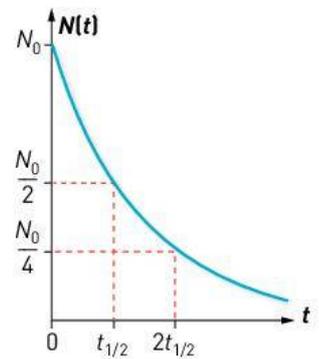


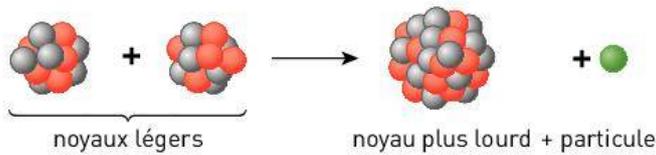
Fig. 4 : Allure de la courbe de décroissance radioactive d'un noyau.

Le vocabulaire à retenir

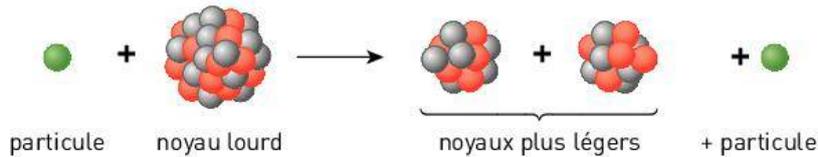
- **Aléatoire** : imprévisible, lié au hasard.
- **Big Bang** : modèle utilisé pour décrire l'origine et l'évolution de l'Univers.
- **Courbe de décroissance radioactive** : représente la réduction du nombre de noyaux radioactifs d'un échantillon au cours du temps.
- **Demi-vie** : au bout de cette durée, la moitié des noyaux d'un échantillon radioactif s'est désintégrée.
- **Fission** : transformation nucléaire dans laquelle un noyau lourd se brise en deux noyaux plus légers.
- **Fusion** : transformation nucléaire dans laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd.
- **Nucléosynthèse stellaire** : ensemble des transformations nucléaires dans les étoiles et qui forment les noyaux.
- **Particule élémentaire de matière** : particule qui ne peut être décomposée (électrons, neutrinos, quarks).
- **Radioactivité** : désintégration d'un noyau instable pour en former un autre plus stable.
- **Spontané/spontanément** : qui se produit de soi-même, sans action extérieure.
- **Transformation nucléaire** : transformation de la matière au cours de laquelle les noyaux des atomes sont modifiés.

1 Formation des éléments

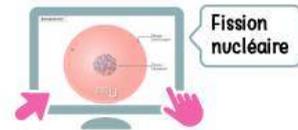
Des réactions de fusion nucléaire dans les étoiles forment les éléments :



La fission nucléaire est un autre type de transformation nucléaire :

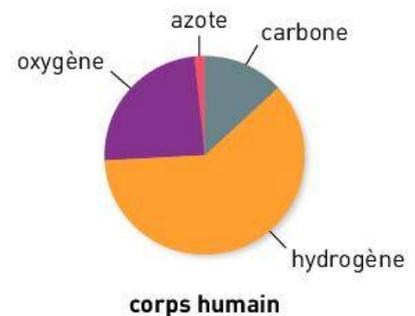
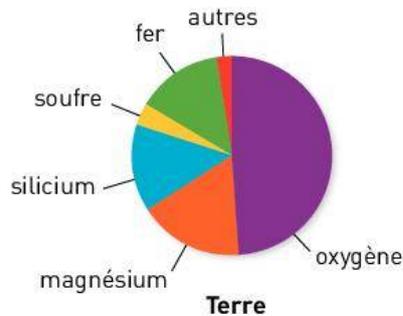
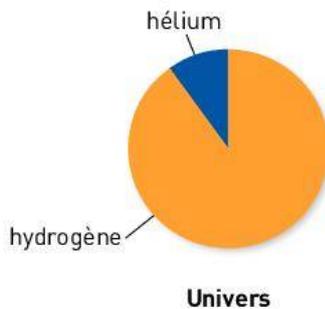


Pour visualiser



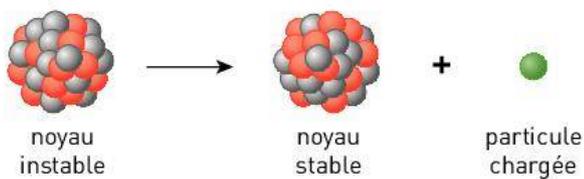
Deux animations pour comprendre la fusion et la fission nucléaires.

Abondance des éléments chimiques



2 Radioactivité

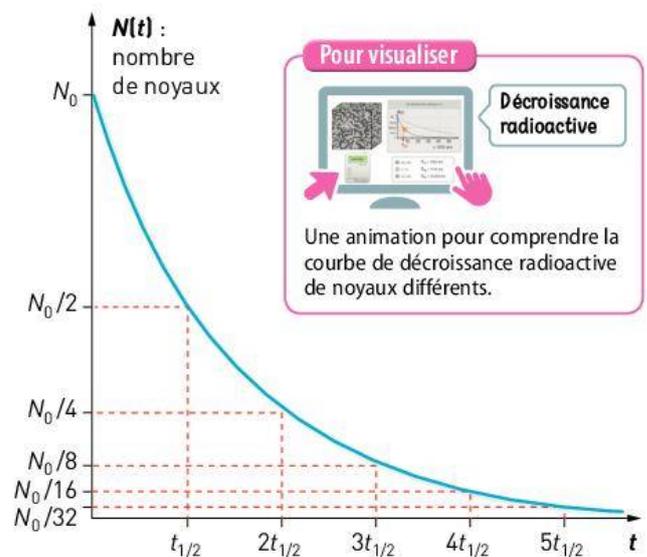
La radioactivité est la désintégration spontanée d'un noyau instable



C'est un phénomène aléatoire au niveau d'un noyau



Courbe de décroissance radioactive



Pour visualiser



Une animation pour comprendre la courbe de décroissance radioactive de noyaux différents.

$t_{1/2}$, la demi-vie, telle que $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$

1 Structure d'un cristal

Le chlorure de sodium, un exemple de cristal

Le chlorure de sodium, couramment appelé sel de table, est un solide de formule chimique NaCl constitué d'ions chlorure Cl^- et d'ions sodium Na^+ . Que ce **cristal** soit obtenu par évaporation de l'eau dans les marais salants ou extrait de mines, il s'agit d'un empilement régulier d'ions disposés de la même manière très ordonnée (Fig. 1). Cette structure peut être décrite par la répétition d'un cube appelé **maille** dans les trois dimensions de l'espace (Fig. 2).

Les cristaux, des édifices ordonnés

Comme le chlorure de sodium, de nombreux solides sont des cristaux.

Un cristal est un solide constitué d'un empilement régulier d'atomes, d'ions ou de molécules.

La structure microscopique d'un cristal peut être décrite par la répétition dans l'espace d'un parallélépipède contenant des entités. Ce parallélépipède est appelé maille.

La forme géométrique de la maille, la nature et la position dans cette maille des entités qui la constituent définissent la structure cristalline.

Les entités occupent une proportion plus ou moins grande du volume de la maille appelée **compacité c** (► fiche n° 9 « Calculer une compacité », p. 287).

La compacité c d'une structure cristalline est un nombre inférieur à 1 et sans unité :

$$c = \frac{\text{volume occupé par les entités}}{\text{volume de la maille}}$$

Structures cubiques

Les structures des cristaux les plus simples peuvent être décrites par une maille cubique dont la longueur de l'arête a est appelé **paramètre de maille**. Si des entités identiques occupent chacun des huit sommets, la structure est **cubique simple**. Si elles occupent les sommets et le centre des faces, alors la structure est **cubique à faces centrées**.

Sachant qu'une entité appartient à plusieurs mailles, on peut compter le nombre d'entités par maille. Dans le cas d'entités sphériques tangentes, on en déduit alors la compacité de la structure. Dans le cas d'atomes, on en déduit aussi la masse volumique du cristal en fonction du paramètre de maille a et de la masse m d'un atome.

	Structure cubique simple	Structure cubique à faces centrées
Maille	a	b
Nombre d'entités par maille	1	4
Compacité c (cas d'entités sphériques tangentes)	0,52	0,74
Masse volumique (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ si m est exprimée en kg et a en m)	$\rho = \frac{m}{a^3}$	$\rho = \frac{4 \times m}{a^3}$

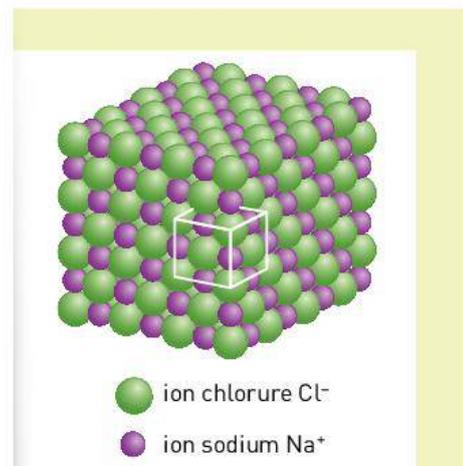


Fig. 1 : Structure du cristal de chlorure de sodium. La maille est délimitée en blanc.

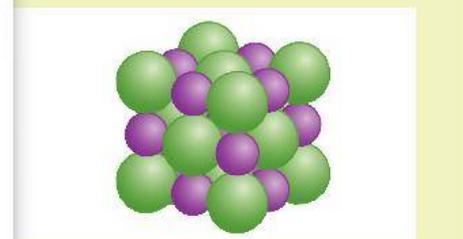
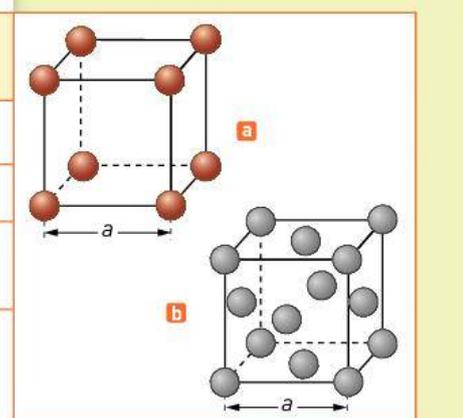


Fig. 2 : Maille du chlorure de sodium.



Remarque : Les entités sphériques et tangentes occupent seulement 52 % du volume de la maille cubique simple. Elles occupent 74 % du volume de la maille cubique à faces centrées : il s'agit d'une structure plus compacte.

Propriétés macroscopiques d'un cristal

La structure microscopique du cristal conditionne certaines de ses propriétés macroscopiques, dont sa masse volumique et sa forme macroscopique.

Exemple : On trouve dans la nature des cristaux de chlorure de sodium (Fig. 3) dont la forme cubique est due à la maille cubique.

Un composé de formule chimique donnée peut cristalliser sous différents types de structures qui ont des propriétés macroscopiques différentes.

Exemple : Le graphite et le diamant sont des cristaux composés d'atomes de carbone C mais leurs propriétés (dureté, masse volumique) sont différentes car leurs structures cristallines sont différentes.

2 Minéraux et cristaux

Roches et minéraux

Les **minéraux** sont caractérisés par leur composition chimique et leur organisation cristalline. Une roche est formée de l'association de cristaux d'un même minéral ou de plusieurs minéraux.

Exemple : Le granite est une roche formée de plusieurs minéraux que l'on distingue à l'œil nu (Fig. 4).

Cristaux dans les organismes biologiques

Des cristaux existent aussi dans les organismes biologiques.

Exemple : Les calculs rénaux sont des cristaux d'oxalate de calcium formés dans les reins.

Cas des solides amorphes

Dans certains solides, l'empilement d'entités se fait sans ordre géométrique, contrairement aux cristaux : ces solides sont dits **amorphes**.

Exemple : Certaines roches volcaniques contiennent du **verre**, issu de la solidification très rapide d'une lave, qui est un solide amorphe.

Selon les conditions de son refroidissement, une roche peut présenter une structure cristalline ou amorphe.

Exemple : L'obsidienne est une roche formée par le refroidissement très rapide d'un magma. Elle est constituée principalement de verre (Fig. 5).



Fig. 3 : Cristaux de chlorure de sodium (halite).

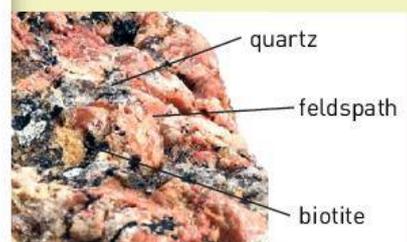


Fig. 4 : Échantillon de granite composé de plusieurs minéraux.



Fig. 5 : Lame mince d'obsidienne.

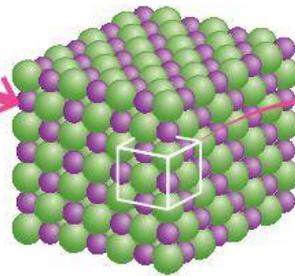
Le vocabulaire à retenir

- **Amorphe (solide) :** solide constitué d'entités empilées sans ordre géométrique.
- **Compacité :** taux d'occupation des entités dans une maille.
- **Cristal :** solide constitué d'un empilement régulier d'atomes, d'ions ou de molécules.
- **Maille :** parallélépipède contenant des entités qui, répété dans l'espace, décrit la structure microscopique d'un cristal.
- **Minéral :** solide possédant une structure cristalline
- **Roche :** matériau naturel formé d'un ou plusieurs minéraux et parfois de verre.
- **Verre :** matériau amorphe, qui ne possède pas de structure cristalline

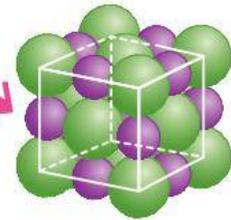
1 Structure d'un cristal



Cristal



Empilement ordonné d'entités

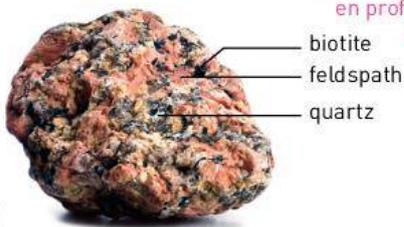


Maille

	Structure cubique simple	Structure cubique à faces centrées
Maille		
Nombre d'entités par maille	1	4
Compacité dans le cas d'entités sphériques tangentes	0,52	0,74
Masse volumique ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\rho = \frac{m}{a^3}$ ← masse atomique en kg ← paramètre de maille en m → $\rho = \frac{4 \times m}{a^3}$	

2 Minéraux et cristaux

Roche contenant des minéraux (structure cristalline)



10 mm

granite

refroidissement en profondeur

 biotite
feldspath
quartz

magma

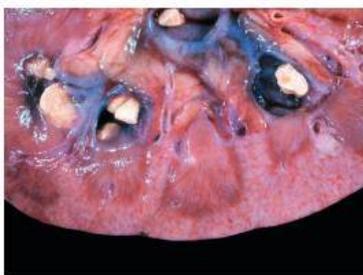
Roche contenant du verre (structure amorphe)



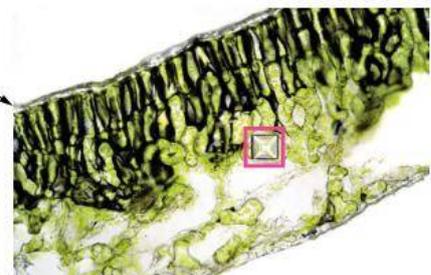
obsidienne

refroidissement très rapide de la lave en surface

Cristaux dans les milieux biologiques



calcul rénal



minéralisation dans une feuille



1 Les premières observations microscopiques

► L'invention du microscope

Il aura fallu presque deux siècles pour inventer le microscope à partir de nombreux essais différents. On considère que Van Leeuwenhoek est le premier à observer des cellules, à l'aide d'un appareil suffisamment performant, sans toutefois les nommer. En les décrivant en 1673, il est devenu le précurseur de la biologie cellulaire et de la microbiologie (Fig. 1).

C'est à partir du XIX^e siècle que la qualité des lentilles et de l'éclairage permettent d'augmenter la résolution* des microscopes au-delà de celui de Van Leeuwenhoek. Les microscopes optiques courants permettent d'avoir un **grossissement** maximal de $\times 1000$.

► Le principe du microscope optique

Le microscope optique utilise comme source d'éclairage un faisceau de photons.

Le grossissement est obtenu par l'utilisation de plusieurs lentilles convergentes*, disposées dans l'objectif et dans l'oculaire. Leur pouvoir grossissant se multiplie, ce qui permet d'accéder à l'échelle cellulaire de l'organisation du vivant.

► La notion de cellule

En 1667, Hooke nomme « cellule » les cavités qu'il observe dans un morceau de liège à l'aide d'un microscope de sa fabrication. Toutefois, le liège étant un tissu mort, les éléments qu'il observe sont en fait les parois d'anciennes cellules. Le faible grossissement de son microscope ($\times 10$) ne lui a pas permis d'être aussi précis que Van Leeuwenhoek dans la description des micro-organismes.

2 La théorie cellulaire

► Les principes de la théorie cellulaire

Le microscope optique a permis l'observation de cellules chez de nombreux organismes différents (Fig. 2) et l'émergence de la théorie cellulaire.

Elle repose sur deux principes fondamentaux émis au XIX^e siècle, que l'on peut aujourd'hui résumer ainsi :

- la cellule est l'unité structurale du vivant. Le fonctionnement des êtres vivants dépend du fonctionnement de leurs cellules, la cellule est donc aussi l'unité fonctionnelle du vivant ;
- toute cellule provient de la division d'une cellule préexistante.

Tous les êtres vivants (animaux, végétaux, champignons, bactéries, etc.) sont constitués de cellules. Une cellule-mère, en se divisant, donne naissance à deux cellules-filles.

► Une théorie controversée

Au XIX^e siècle, de nombreux scientifiques et philosophes s'opposent à la **théorie cellulaire** en niant l'existence des cellules. Leur argumentation repose sur la théorie de la génération spontanée selon laquelle de la matière inerte peut donner naissance à un être vivant, mais aussi sur la négation de l'efficacité du microscope en tant qu'outil scientifique.

L'amélioration des microscopes, dont la résolution passe progressivement de $10\ \mu\text{m}$ à $0,25\ \mu\text{m}$, et les résultats expérimentaux de Pasteur (Fig. 3) mettront fin à cette polémique. La théorie cellulaire est alors admise par la communauté scientifique depuis la fin du XIX^e siècle.



Fig. 1 : Dessins de spermatozoïdes par Van Leeuwenhoek.

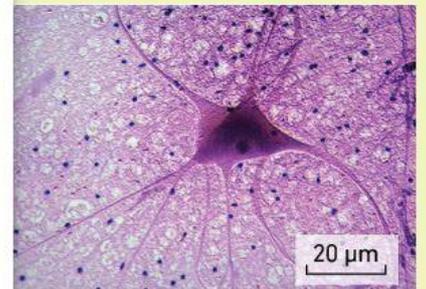


Fig. 2 : Une cellule nerveuse.

Repère

Le **grossissement** ne doit pas être confondu avec le **grandissement** qui est le rapport entre la taille d'une représentation (dessin d'observation ou photographie) et la taille réelle de l'objet (souvent indiquée par une échelle).

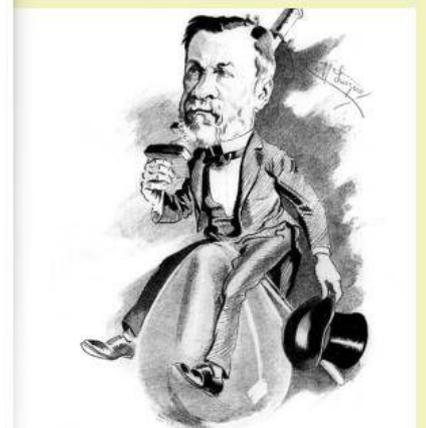


Fig. 3 : Caricature de Pasteur (1884) illustrant ses travaux sur la génération spontanée.

3 De l'échelle cellulaire à l'échelle moléculaire

Le **microscope électronique** utilise un faisceau d'électrons concentré par des lentilles électromagnétiques, ce qui permet de passer d'un grossissement de $\times 1000$ (pour le microscope optique) à $\times 1\,000\,000$ et d'accéder ainsi à l'échelle moléculaire. Le **MET** (microscope électronique à transmission) permet des observations jusqu'à une résolution nanométrique. Il est idéal pour observer des coupes fines qui révèlent les structures internes des organites cellulaires, ainsi que les macromolécules.

Le **MEB** (microscope électronique à balayage) possède une résolution plus faible mais permet d'obtenir des images détaillées de la surface des objets, en trois dimensions (Fig. 4).

Contrairement au microscope optique, le microscope électronique ne permet pas d'observer des cellules vivantes et fournit des images en noir et blanc, colorisées par la suite.

Par l'observation de certaines grosses molécules comme les protéines ou l'ADN, le microscope électronique est devenu l'outil incontournable permettant de comprendre l'organisation du vivant à une échelle inférieure à celle de la cellule (Fig. 5).

4 Construction d'un modèle, la membrane plasmique

La membrane plasmique est une structure fondamentale de toute cellule. Elle délimite un volume dans lequel se concentrent les molécules et les organites indispensables au fonctionnement cellulaire. Si elle est percée ou déchirée, cela entraîne la mort de la cellule. Cependant, la membrane plasmique n'est pas une barrière étanche : certains échanges entre le cytoplasme et l'extérieur sont possibles. Si son organisation moléculaire a pu être approchée par différents résultats expérimentaux, ce sont bien des observations directes de microscopie électronique qui ont permis d'en confirmer la structure.

La membrane plasmique est constituée d'une double couche lipidique parsemée de nombreuses protéines. Elle comporte aussi des glucides liés aux protéines ou aux lipides. On parle de structure en mosaïque.

Les propriétés **hydrophiles** et **hydrophobes** des phospholipides sont à l'origine de cette bicouche qui sépare les milieux intra et extracellulaires, principalement constitués d'eau. De même, les parties hydrophobes des protéines peuvent être incluses dans la bicouche lipidique, tandis que leurs parties hydrophiles sont davantage localisées vers les faces extra et intracellulaires de la membrane (Fig. 6).

Le vocabulaire à retenir

- **Grossissement** : rapport entre la taille apparente d'un objet vu à travers le microscope et la taille apparente du même objet vu à l'œil nu, à 25 cm de distance.
- **Hydrophile** : qui a de l'affinité pour l'eau, qui y est soluble.
- **Hydrophobe** : qui est soluble dans un corps gras mais insoluble dans l'eau.
- **MEB** : microscope électronique à balayage.
- **MET** : microscope électronique à transmission.
- **Microscope électronique** : microscope utilisant un faisceau d'électrons pour obtenir une image à haute résolution de l'objet observé.
- **Théorie cellulaire** : théorie du XIX^e siècle reposant sur deux principes : la cellule est l'unité fondamentale des êtres vivants ; toute cellule provient d'une cellule pré-existante par division.



Fig. 4 : Tardigrade, petit animal observé au MEB.

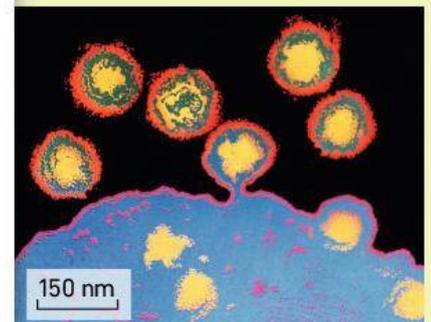


Fig. 5 : Virus du SIDA sortant d'une cellule infectée, observés au MET.

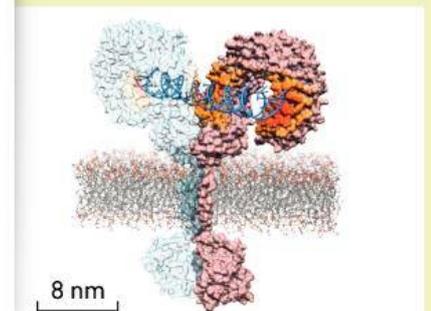
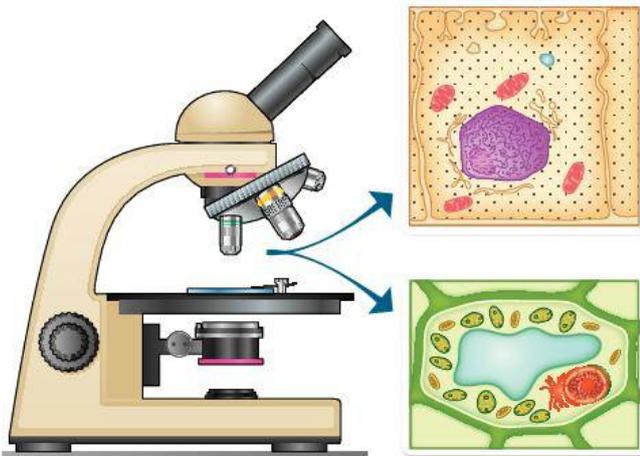


Fig. 6 : Exemple de protéine traversant la membrane, le récepteur TLR3 impliqué dans la défense immunitaire.

1 L'invention du microscope et la théorie cellulaire : XVII^e et XIX^e siècles

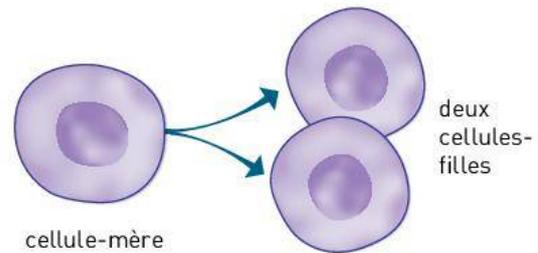
XVII^e siècle : l'invention du microscope permet l'observation des cellules



XIX^e siècle : les deux principes de la théorie cellulaire

1 La cellule : unité structurale et fonctionnelle des êtres vivants

2 Toute cellule provient de la division d'une cellule préexistante



2 De l'échelle cellulaire à l'échelle moléculaire : les apports de la microscopie électronique

1 cm = 10⁻² m

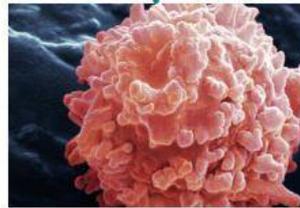
10 μm = 10⁻⁵ m

1 μm = 10⁻⁶ m

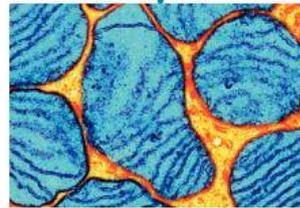
50 nm = 5 × 10⁻⁸ m



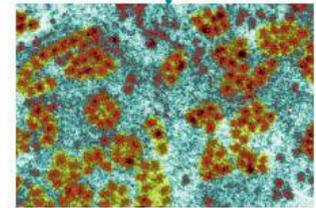
organisme au MEB : moustique



cellule au MEB : globule blanc dans une trompe de moustique (× 7000)

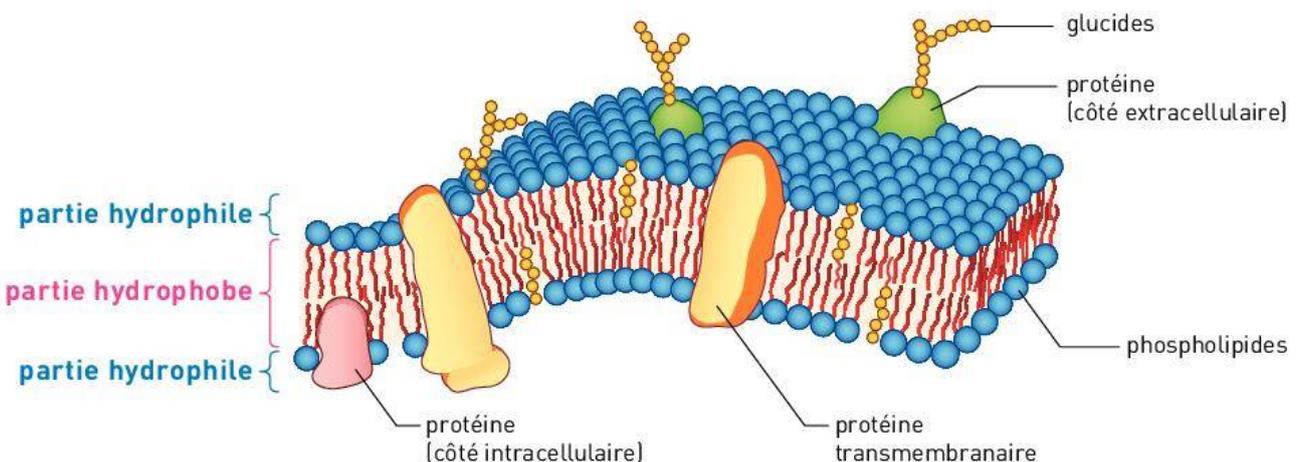


organite au MET : mitochondrie dans un globule blanc (× 20000)



molécules au MET : protéines dans une mitochondrie (× 225 000)

3 La membrane cellulaire, une organisation en mosaïque





1 Rayonnement solaire et albédo

La puissance solaire reçue par la Terre

Comme tous les objets du système solaire, la Terre ne reçoit qu'une infime fraction de la **puissance solaire** totale.

La puissance solaire reçue par un astre dépend essentiellement de deux paramètres : son rayon, et la distance entre le Soleil et l'objet éclairé. Plus son rayon est grand, et plus la puissance solaire reçue est élevée. Plus la distance entre le Soleil et l'astre est grande, et plus la puissance solaire reçue par unité de surface est faible (**Fig. 1**).

Exemples : La Terre reçoit une quantité d'énergie supérieure à ce que reçoit la Lune, qui est 3,6 fois plus petite qu'elle. Jupiter, pourtant 11 fois plus grande que la Terre, reçoit beaucoup moins d'énergie, car elle est environ 5 fois plus éloignée du Soleil.

La puissance solaire moyenne reçue par la Terre en 24 heures, au sommet de son atmosphère, est d'environ $342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

L'albédo terrestre

Lorsque la lumière solaire pénètre dans l'atmosphère, elle est renvoyée dans différentes directions par ses constituants : c'est le phénomène de diffusion. Une partie de l'énergie solaire reçue repart ainsi vers l'espace (**Fig. 2**).

La lumière qui atteint la surface subit également une réflexion. La proportion d'énergie lumineuse qui est réfléchiée est caractérisée par l'**albédo**. Celui-ci varie de 0 à 1, et est d'autant plus élevé que la surface est réfléchissante.

Exemples : Les surfaces sombres comme les océans et les forêts réfléchissent peu la lumière et ont un albédo faible, au contraire des surfaces claires comme les nuages, les étendues de glace et les déserts dont l'albédo est élevé (**Fig. 3**).

En tenant compte de la proportion de chaque type de surface et de leurs albédos, on calcule que l'albédo moyen de la Terre est d'environ 0,30.

La Terre réfléchit vers l'espace 30 % de la puissance solaire qu'elle reçoit.

2 L'effet de serre

L'absorption de l'énergie solaire reçue

Certains gaz de l'atmosphère absorbent directement le rayonnement solaire incident sur certaines plages de longueur d'onde (**Fig. 4**). Ces gaz absorbent environ 20 % de l'énergie solaire reçue, soit une puissance de $70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Ainsi, en tenant compte de l'albédo terrestre, on estime que la moitié seulement de la puissance solaire reçue au sommet de l'atmosphère est absorbée par la surface des océans et des continents.

L'émission d'un rayonnement infrarouge

L'absorption de l'énergie solaire par l'atmosphère et par la surface de la Terre provoque une augmentation de leur température.

L'échauffement de la surface terrestre se traduit par l'émission d'un rayonnement thermique, majoritairement **infrarouge** (IR). Le maximum d'émission se situe pour des longueurs d'onde proches de $10 \mu\text{m}$.

Plus la température est élevée, plus l'intensité du rayonnement IR est importante. Cette dissipation d'énergie par rayonnement limite ainsi l'élévation de température de la surface terrestre.

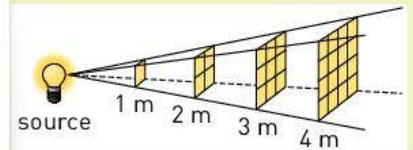


Fig. 1 : Lorsque la distance par rapport à la source lumineuse double, la quantité d'énergie reçue est dispersée sur une surface quatre fois plus grande.

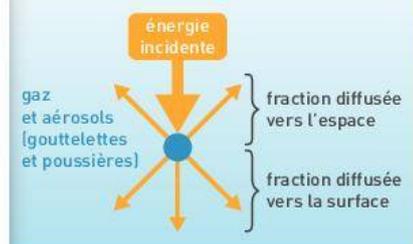


Fig. 2 : Diffusion de la lumière solaire par les constituants de l'atmosphère.



Fig. 3 : L'océan absorbe plus d'énergie solaire que la banquise, qui en réfléchit une grande partie.

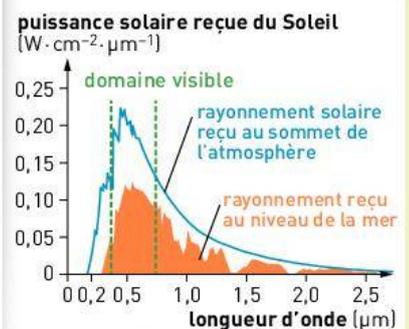


Fig. 4 : Absorption de l'énergie solaire reçue par l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident.

► L'absorption des IR par l'atmosphère

L'atmosphère terrestre piège une fraction du rayonnement IR réémis par la Terre. Ce mécanisme naturel provoque une augmentation de la température de l'atmosphère : c'est l'**effet de serre**.

Exemple : L'absorption du rayonnement IR par l'atmosphère conduit à une élévation de la température de la Terre d'environ 38 °C (Fig. 5).

Cet échauffement provoque de nouveau l'émission d'un rayonnement IR vers l'espace et vers la surface. Le même processus se répète avec des intensités moindres jusqu'à ce que l'ensemble de l'énergie initialement absorbée soit renvoyée vers l'espace.

Les principaux gaz à effet de serre (GES) sont la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone, respectivement responsables de 50 % et 20 % de l'effet de serre. Sans effet de serre, l'eau ne serait présente sur Terre qu'à l'état de glace, ce qui serait incompatible avec la présence d'êtres vivants.

3 Le bilan radiatif terrestre

► Une température équilibrée

On dresse le **bilan radiatif** terrestre en faisant la différence entre l'énergie reçue par la Terre (depuis l'atmosphère et le Soleil) et l'énergie réémise. Cette différence, sur une courte période de temps, est nulle (Fig. 6) : le bilan est à l'équilibre, ce qui signifie que la température moyenne est constante.



► Un équilibre « dynamique »

Une variation de l'activité solaire, une modification de l'intensité de l'effet de serre ou encore un changement d'albédo impactent le bilan radiatif terrestre, et peuvent donc conduire à une variation de la température moyenne.

Le bilan radiatif terrestre est en équilibre dynamique, susceptible de varier.

Exemples : L'albédo moyen peut changer selon la proportion des différents types de surfaces terrestres, l'importance de la nébulosité, et la quantité d'aérosols. L'effet de serre peut s'accroître suite à une augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère.

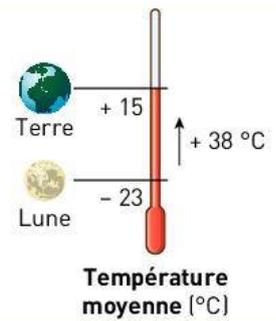
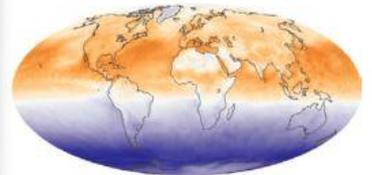


Fig. 5 : La différence de température moyenne entre la Terre et la Lune s'explique par l'effet de serre (la Lune n'a pas d'atmosphère et donc pas de GES).

Novembre 2018



Juillet 2018

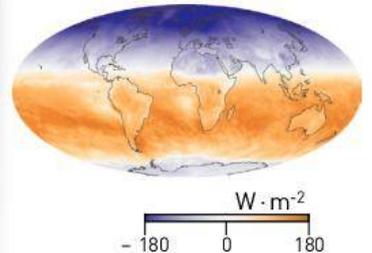


Fig. 6 : Sur une année, la différence entre le rayonnement reçu et le rayonnement réémis par la surface terrestre est nulle.

Le vocabulaire à retenir

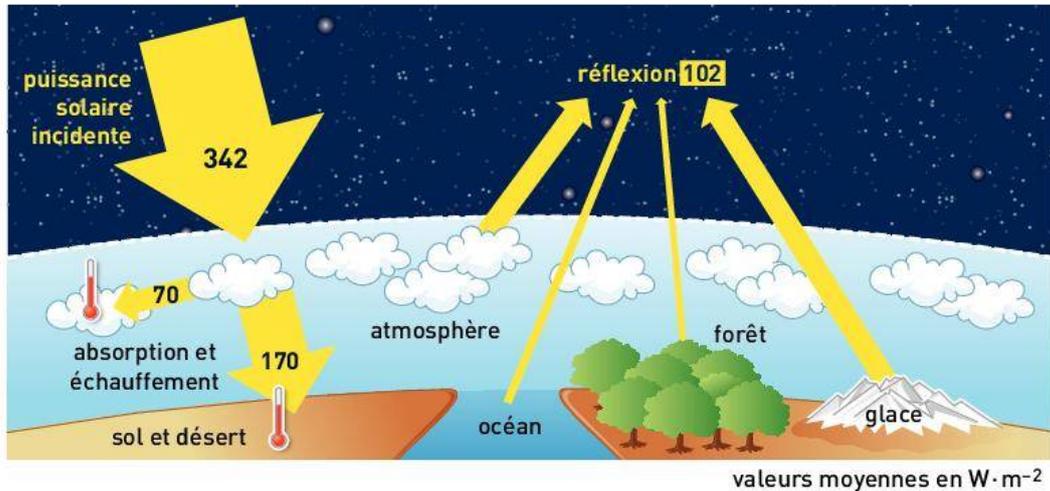
- **Albédo :** rapport entre l'énergie lumineuse réfléchie par une surface et l'énergie lumineuse reçue par cette même surface (nombre de 0 à 1, ou de 0 à 100 %).
- **Bilan radiatif :** différence entre la puissance reçue par la planète et celle réémise vers l'espace.
- **Effet de serre :** phénomène naturel de réchauffement de la surface d'une planète, provoqué par des gaz de

son atmosphère qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par le sol.

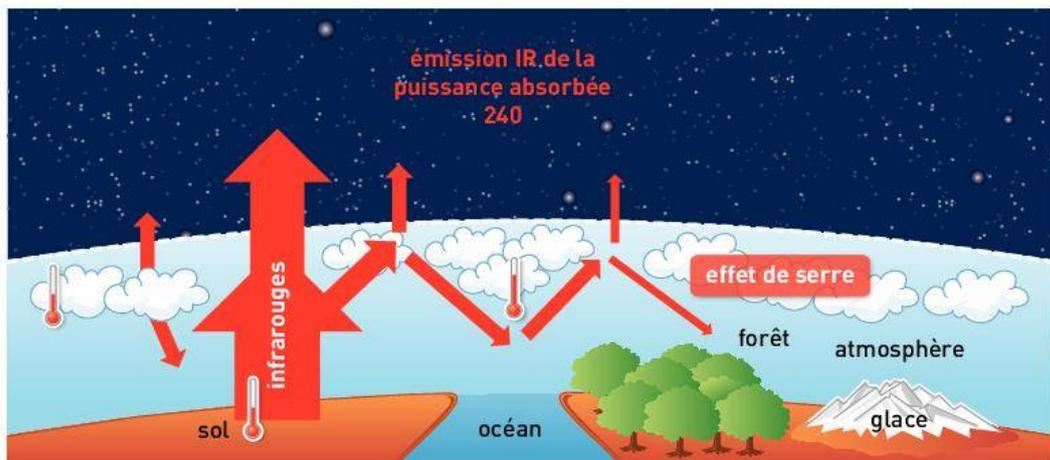
- **Puissance solaire :** quantité d'énergie libérée par le Soleil par unité de temps. Elle s'exprime en watts (W).
- **Rayonnement infrarouge :** radiations électromagnétiques situées dans une gamme de longueurs d'onde allant de 0,78 à 1 000 μm.

1 La Terre reçoit une fraction de la puissance solaire qui dépend de sa taille et de sa distance au soleil

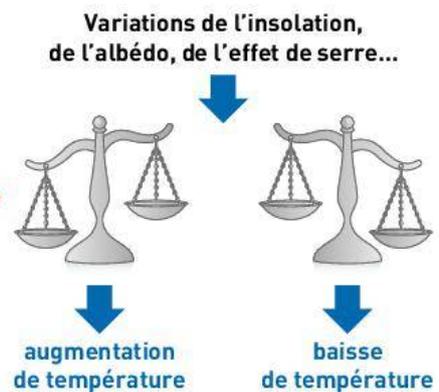
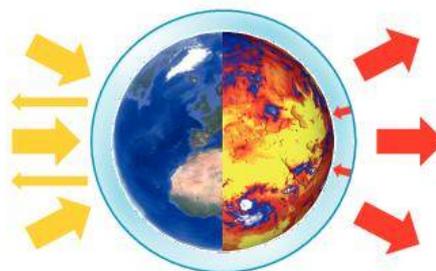
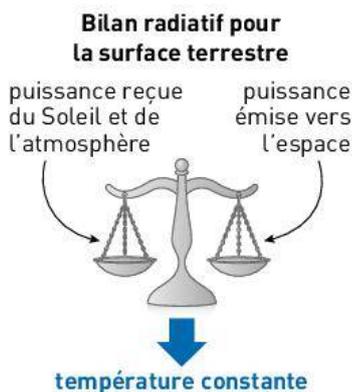
Environ 70 % de la puissance reçue est absorbée.



La puissance absorbée alimente l'effet de serre.



2 Un bilan radiatif en équilibre dynamique



1 De l'énergie pour toutes les cellules

De l'énergie pour les cellules végétales

À partir de lumière, de CO_2 , d'eau et d'ions minéraux, la cellule végétale chlorophyllienne est capable de fabriquer l'ensemble des molécules organiques (glucides, lipides, acides nucléiques* et protéines) dont elle a besoin pour vivre (Fig. 1). C'est la photosynthèse.

En présence de dioxygène (O_2), une partie du glucose produit est consommé par les mitochondries. Cela permet la fabrication d'ATP, source d'énergie pour l'ensemble des réactions cellulaires. Ce processus est la respiration.

Les cellules chlorophylliennes sont également capables d'exporter les molécules organiques produites vers les cellules non chlorophylliennes de la plante, leur permettant de respirer, de se multiplier et de mettre en réserve une partie de ces molécules.

De l'énergie pour les autres cellules

Les molécules organiques issues de la photosynthèse peuvent être consommées par d'autres êtres vivants (animaux, champignons, bactéries) pour participer à leur croissance, ou pour produire de l'ATP par respiration.

Si le milieu de vie est pauvre en dioxygène (O_2), certaines cellules peuvent continuer à produire de faibles quantités d'ATP, par exemple en transformant le glucose en alcool (Fig. 2). Ce processus est appelé fermentation alcoolique.

2 La photosynthèse, un phénomène majeur

Un phénomène quantitativement important

Chaque année, les organismes photosynthétiques produisent plus de 800 milliards de tonnes de matière organique.

Cette masse de matière organique végétale est appelée **biomasse**.

On appelle **productivité primaire brute (PPB)** la production de biomasse végétale par unité de surface et par unité de temps.

Environ 80 % de la PPB est consommée par respiration pour assurer le fonctionnement des cellules végétales. Les 20 % restant correspondent à la **productivité primaire nette (PPN)**, disponible pour le reste de la biosphère.

Un phénomène qualitativement majeur pour les écosystèmes

L'énergie contenue dans la biomasse végétale produite annuellement représente moins de 0,1 % de l'énergie solaire reçue par la planète. Pourtant, les organismes chlorophylliens sont à la base de presque toutes les chaînes alimentaires. On estime ainsi que la moitié de la PPN (donc 10 % de la PPB) permet d'alimenter l'ensemble des organismes non chlorophylliens au sein des réseaux trophiques. L'autre moitié (10 % de la PPB) correspond à la matière organique végétale morte, qui sera ensuite décomposée par respiration et fermentation grâce aux champignons et bactéries. Ces flux de matière et d'énergie peuvent être représentés sous la forme de pyramides écologiques (Fig. 3).

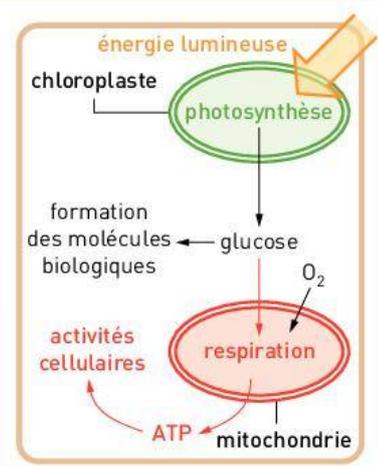


Fig. 1 : Photosynthèse et respiration au sein d'une cellule chlorophyllienne.

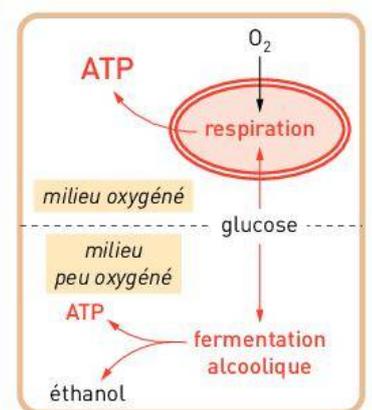


Fig. 2 : Respiration et fermentation, deux façons de produire de l'ATP.

Repère

PPN = PPB – biomasse respirée

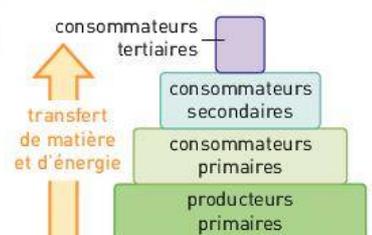


Fig. 3 : Une pyramide écologique traduit les pertes entre chaque niveau trophique*.

3 La photosynthèse, un phénomène peu efficace

● Une perte d'énergie par réflexion et transmission

Une feuille chlorophyllienne réfléchit une partie de la lumière qu'elle reçoit. Une autre partie de la lumière est également transmise du fait de sa finesse (0,2 mm d'épaisseur pour une feuille de haricot par exemple). Ainsi, les feuilles n'absorbent en moyenne qu'environ deux tiers de la lumière reçue (Fig. 4).

● Une perte d'énergie par évapotranspiration

La lumière absorbée par la feuille augmente sa température, ce qui provoque une évaporation de l'eau qu'elle contient. Ce phénomène est appelé évapotranspiration. On estime que la moitié de l'énergie reçue par la feuille est ainsi perdue sous forme de chaleur et de vaporisation de l'eau.

● Une perte d'énergie liée à la photosynthèse

L'étude du spectre d'absorption de la chlorophylle montre que les radiations majoritairement absorbées sont le bleu et le rouge.

La comparaison du spectre d'absorption avec le spectre d'action (Fig. 5) suggère que la chlorophylle est un pigment photosynthétique puisque la photosynthèse utilise essentiellement les radiations bleu et rouge.

La molécule de glucose produite par la photosynthèse contient 20 fois moins d'énergie que ce qui a été absorbé par la chlorophylle. Le reste de l'énergie est dissipé sous forme de chaleur lors de la photosynthèse.

On estime que 1 % seulement de l'énergie reçue par la feuille est converti en énergie chimique dans le chloroplaste sous forme de glucose.

4 Une fossilisation possible de la biomasse

Des circonstances exceptionnelles (régions à forte productivité primaire, sédimentation rapide, milieu pauvre en dioxygène) peuvent permettre à une fraction de la biomasse produite d'échapper à la décomposition.

Des bactéries anaérobies (capables de vivre sans dioxygène) transforment cette biomasse en kérogène, résidu solide riche en carbone et hydrogène mais appauvri en azote et dioxygène.

Le kérogène est à l'origine de la formation de **combustibles fossiles** : le charbon (surtout en milieu continental), le pétrole et le gaz naturel (surtout en mer).

On estime que moins de 1 % de la biomasse produite chaque année est transformée en kérogène. Ce processus, très lent, est à l'origine de combustibles non renouvelables qui couvrent actuellement, à l'échelle mondiale, environ 80 % de nos besoins énergétiques.

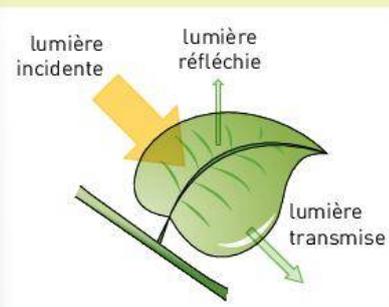


Fig. 4 : Un tiers de la lumière reçue est perdue par réflexion et transmission.

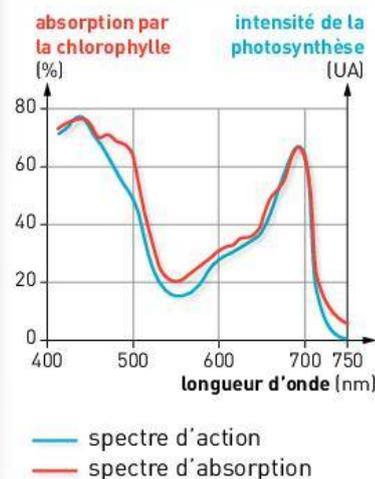


Fig. 5 : La superposition des deux spectres confirme que la chlorophylle est un pigment photosynthétique.

Le vocabulaire à retenir

- **Biomasse** : masse de matières organiques représentant une forme de stockage de l'énergie solaire.
- **Combustibles fossiles** : roches riches en carbone organique, brûlées pour libérer l'énergie qu'elles contiennent.
- **Productivité primaire brute** : biomasse produite par les organismes chlorophylliens par unité de surface et par unité de temps à l'issue du processus photosynthétique.
- **Productivité primaire nette** : gain de biomasse produite par les organismes chlorophylliens par unité de surface et par unité de temps.

1 La rotondité de la Terre

L'environnement « plat » à notre échelle de perception cache la forme réelle de la Terre, dont la compréhension résulte d'une longue réflexion.

Jusqu'au VI^e siècle avant J.-C., on trouve des représentations où la Terre est considérée comme un disque ou un cylindre flottant à la surface d'un océan infini. Certains cependant se doutent que la Terre est « ronde » : les Anciens avaient remarqué que, lorsqu'un bateau arrive à l'horizon, on commence à voir le mât avant la proue. C'est entre les V^e et le IV^e siècles avant notre ère que Pythagore, Platon et surtout Aristote apportent les premières preuves de la forme sphérique de la Terre :

- lors d'une éclipse de Lune, on observe la forme arrondie de l'ombre de la Terre sur la Lune (Fig. 1) ;
- lorsqu'on se déplace du Nord au Sud, l'aspect du ciel change : les étoiles apparaissent au-dessus de l'horizon, tandis que d'autres étoiles disparaissent sous l'horizon dans la direction opposée.

Aristote pense même qu'il n'y a qu'une seule mer de l'Afrique aux Indes. La forme sphérique de la Terre est devenue une évidence pour les savants grecs.

La rotondité étant un fait acquis, des progrès sur la connaissance de la forme de la Terre ne furent accomplis qu'aux XVII^e et XVIII^e siècles par la découverte de l'aplatissement de la Terre aux pôles : la Terre n'est pas exactement sphérique, mais a la forme d'un ellipsoïde.

2 La longueur d'un méridien

Le calcul d'Ératosthène

Au III^e siècle avant J.-C., le savant grec Ératosthène donne une estimation de la circonférence de la Terre. Il a observé qu'à midi, le jour du solstice d'été, il n'y a pas d'ombre à Syène. En revanche, à Alexandrie, à 5 000 stades (environ 800 km) plus au nord, l'ombre faite par un gnomon (bâton) permet de déterminer que les rayons du Soleil font un angle de 1/50 d'angle plein (7,2°) par rapport à la verticale (Fig. 2).

Il considère que la Terre est ronde, que les rayons du Soleil sont parallèles (car le Soleil est infiniment loin) et que les deux villes sont sur un même **méridien**.

Partant du fait que la longueur d'un arc de cercle est proportionnelle à l'angle qui l'intercepte, Ératosthène calcule alors la circonférence de la Terre. Il trouve une valeur $C = 5\,000 \times 50 = 250\,000$ stades, soit environ 40 000 km.

La triangulation de Delambre et Méchain

En 1791, en France, l'Académie des sciences décide que le **mètre**, nouvelle unité de longueur, serait défini comme étant égal au dix-millionième du quart du méridien terrestre.

Trois éléments ont été déterminants pour lancer une mission devant établir la longueur du méridien : la méthode de triangulation de Snellius (1615), les progrès de la trigonométrie sphérique et la mise au point d'un instrument très précis de mesure des angles, le cercle répétiteur de Borda.

La méthode de **triangulation** consiste à mesurer une seule distance (la « base »), puis de construire une chaîne de triangles à partir de cette base. On mesure les angles de ces triangles par visée avec le cercle de Borda, puis on en déduit les distances dans chaque triangle par une formule de trigonométrie : la loi des sinus (Fig. 3).



Fig. 1 : Éclipse de Lune.

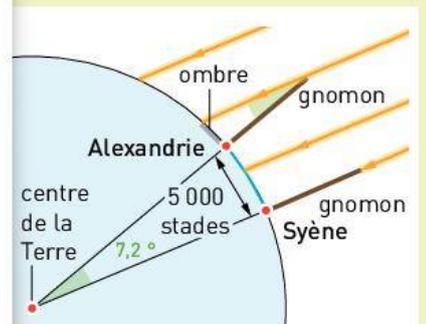


Fig. 2 : Les hypothèses d'Ératosthène.

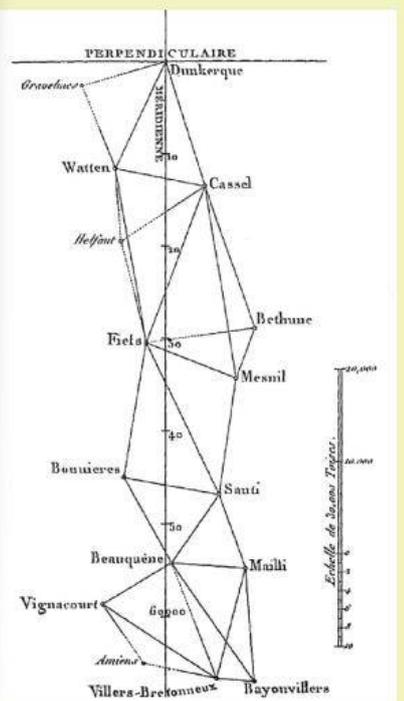


Fig. 3 : Triangulation de Dunkerque à Amiens.

En 1791, deux scientifiques, Jean-Baptiste Delambre et Pierre Méchain, sont chargés de mesurer la partie du méridien de Paris située entre Dunkerque et Barcelone : ils réalisent durant sept ans des mesures avec une chaîne de 94 triangles. Une unique mesure de longueur sera effectuée : celle de la base, située à Melun.

3 Longueur d'un chemin sur Terre

Pour calculer la longueur d'un chemin reliant deux points à la surface de la Terre, on doit tout d'abord connaître la position de ces deux points.

Ce sont les méridiens et les parallèles, cercles imaginaires tracés sur le globe terrestre, qui permettent de faire ce repérage :

- un **méridien** est un cercle qui passe par les deux pôles ;
- un **parallèle** est l'intersection de la sphère terrestre et d'un plan parallèle à celui de l'équateur.

Chaque point sur Terre peut être repéré par deux angles (Fig. 4) :

- la **longitude**, angle mesuré à partir du méridien de Greenwich ;
- la **latitude**, angle mesuré à partir de l'équateur.

Pour relier deux points, on peut imaginer différents trajets.

Lorsque deux points sont sur un même méridien, la longueur du chemin qui les relie suivant ce méridien est celle de l'**arc de méridien** intercepté par un angle que l'on déduit des latitudes des deux points.

Exemple : avec les données de la figure 5 a :

$$\frac{L}{AOB} = \frac{L_M}{360} \text{ où } \widehat{AOB} = 60^\circ - 22^\circ = 38^\circ \text{ et } L_M, \text{ la circonférence du méridien :}$$

$$L_M \approx 40\,000 \text{ km.}$$

Lorsque deux points sont sur un même parallèle, la longueur du chemin qui les relie suivant ce parallèle est celle de l'**arc de parallèle** intercepté par un angle que l'on déduit des longitudes des points.

Exemple : avec les données de la figure 5 b :

$$\frac{L}{ACB} = \frac{L_p}{360} \text{ où } \widehat{ACB} = 55^\circ + 20^\circ = 75^\circ \text{ et où } L_p \text{ est la longueur du parallèle de latitude } 30^\circ \text{ Nord. Ce chemin n'est pas le plus court.}$$

Le plus court chemin entre deux points à la surface de la Terre est l'arc du **grand cercle** qui les relie.

Cet arc de grand cercle est appelé « route orthodromique* » (Fig. 6). Des logiciels SIG (système d'information géographique) calculent sa longueur.

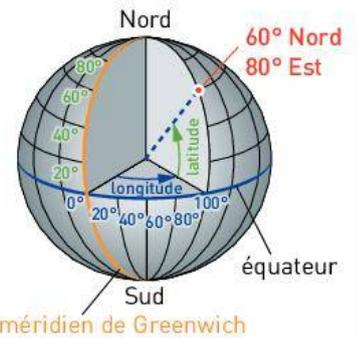


Fig. 4 : Latitude et longitude d'un point à la surface de la Terre.

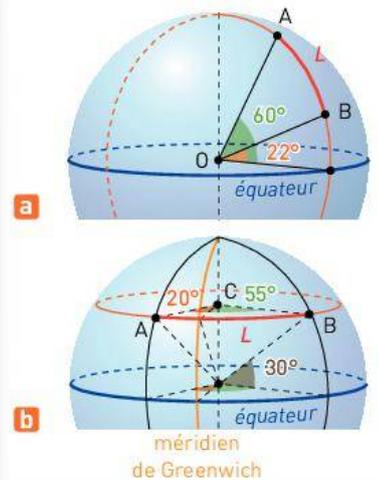


Fig. 5 : Arc de méridien (a) et arc de parallèle (b) reliant deux points à la surface de la Terre.

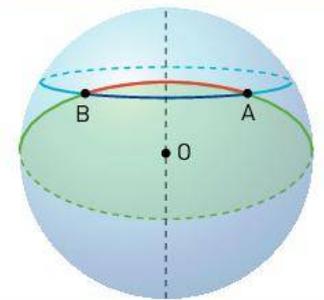


Fig. 6 : Grand cercle reliant deux points A et B.

Le vocabulaire à retenir

- **Arc de méridien** : chemin qui relie deux points d'un même méridien en suivant ce méridien.
- **Arc de parallèle** : chemin qui relie deux points d'un même parallèle en suivant ce parallèle.
- **Grand cercle** : intersection de la sphère terrestre et d'un plan qui passe par son centre.
- **Latitude** : angle mesuré à partir de l'équateur.
- **Longitude** : angle mesuré à partir du méridien de Greenwich.
- **Méridien** : grand cercle qui passe par les deux pôles. La circonférence d'un méridien est environ 40 000 km.
- **Mètre** : unité de mesure de longueur créée en 1799.
- **Parallèle** : intersection de la sphère terrestre et d'un plan parallèle à celui de l'équateur.
- **Triangulation** : méthode de mesure de distances à l'aide d'une chaîne de triangles.

1 La forme de la Terre



Thalès (VI^e siècle av. J.-C.) :
Terre plate

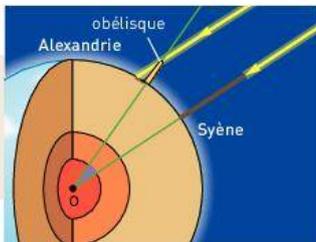


Anaximandre (VI^e siècle av. J.-C.) :
Terre cylindrique



Aristote (IV^e siècle av. J.-C.) :
Terre sphérique

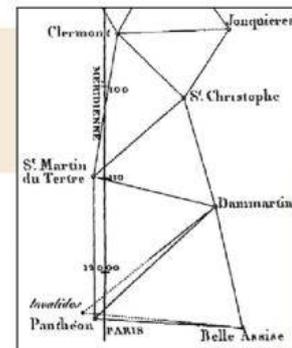
2 La mesure du méridien terrestre



III^e siècle av. J.-C. : Ératosthène calcule la circonférence de la Terre : $\approx 40\,000$ km.



XVII^e siècle : Méthode de triangulation, fondée sur des mesures d'angles et la trigonométrie.



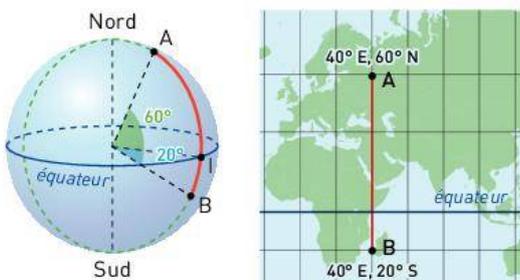
1791 : Mission de Delambre et Méchain.



1799 : Le mètre étalon : dix-millionième partie du quart du méridien terrestre.

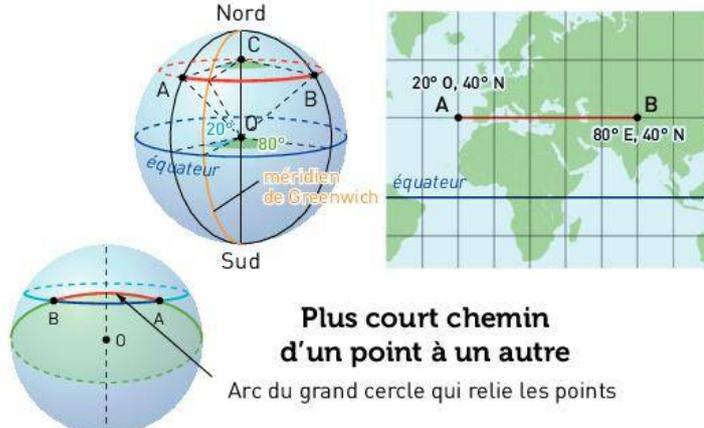
3 Calculs de longueurs sur la sphère terrestre

Longueur d'un arc de méridien



- Outils :**
- proportionnalité des angles et des arcs ;
 - trigonométrie du triangle rectangle.

Longueur d'un arc de parallèle



Plus court chemin d'un point à un autre
Arc du grand cercle qui relie les points



1 Les premières estimations de l'âge de la Terre

Une Terre éternelle, ou au contraire très jeune

Dans la pensée antique, l'Univers est éternel et immuable. Pour Aristote (384-322 avant notre ère), la Terre a toujours existé et est sans âge.

À la Renaissance, des savants déterminent que la Terre serait « née » aux environs de 4 000 ans avant notre ère (Fig. 1) en s'appuyant sur une lecture littérale des récits bibliques.

Une remise en question de l'âge « biblique »

Dès le XVII^e siècle, les géologues sont convaincus que les phénomènes géologiques sont extrêmement lents. Leurs calculs les amènent à envisager des durées de plusieurs millions d'années.

Exemple : On estime qu'il a fallu 4 millions d'années pour que la sédimentation marine produise les couches calcaires de la falaise d'Étretat (Fig. 2).

Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), reprend l'hypothèse d'un autre savant selon laquelle la Terre était une sphère de matière en fusion qui a progressivement refroidi. À l'aide d'expériences sur des boulets de fer incandescents, il estime que la Terre a environ 100 000 ans.

Une longue querelle entre physiciens et géologues

Au XIX^e siècle, Lord Kelvin (1824-1907) élabore un **modèle** mathématique du refroidissement de la Terre : il estime la durée nécessaire pour que le gradient géothermique terrestre atteigne sa valeur actuelle de $30\text{ °C} \cdot \text{km}^{-1}$. Il aboutit à un âge de la Terre compris entre 20 et 40 millions d'années.

Par ailleurs, des géologues étudient les fossiles contenus dans les roches sédimentaires, et les interprètent comme des formes de vie du passé. Charles Darwin (1809-1882) estime que ces fossiles témoignent de l'évolution des espèces, et que celle-ci requiert des durées bien supérieures à l'âge de la Terre estimé par les physiciens.

Au XIX^e siècle éclate une vive polémique entre physiciens, qui estiment que la Terre a quelques dizaines de millions d'années, et les géologues qui envisagent des âges atteignant parfois plus de 3 milliards d'années.

2 La révolution radiochronologique

Les débuts de la radiochronologie

Le début du XX^e siècle marque un tournant. Henri Becquerel, Ernest Rutherford, Pierre et Marie Curie, et Frédéric Soddy découvrent que certains isotopes, dits radioactifs, se désintègrent spontanément en d'autres isotopes, dits **radiogéniques** (voir p. 22-23). Un isotope radioactif est caractérisé par sa demi-vie $t_{1/2}$, durée au bout de laquelle la moitié de la quantité initiale de noyaux dans un échantillon s'est désintégrée (Fig. 3).

Exemple : L'uranium 238 se désintègre en plomb 206, un isotope stable et non radioactif. Sa demi-vie est d'environ 4,5 milliards d'années.

L'évolution des quantités d'isotopes père et/ou fils au cours d'une désintégration radioactive est prévisible (Fig. 3) : c'est la clé de la radiochronologie, une méthode qui fournit une datation chiffrée des échantillons étudiés.

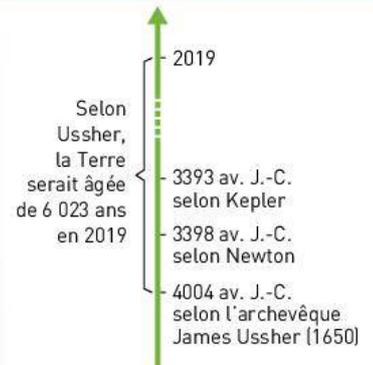


Fig. 1 : Quelques datations « bibliques » de la création de la Terre.



Fig. 2 : Les falaises d'Étretat (Normandie), couches calcaires hautes de 84 m.

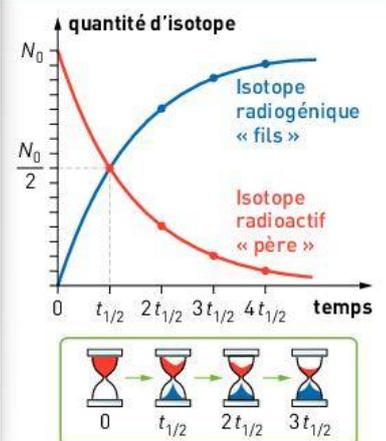


Fig. 3 : La diminution de la quantité d'un isotope radioactif et l'augmentation simultanée de la quantité de l'isotope radiogénique sont prévisibles.

Un outil et une méthode pour dater les échantillons

De 1936 à 1938, Alfred Nier développe un appareil, le spectromètre de masse (Fig. 4), qui mesure la quantité des isotopes d'un élément chimique donné dans un échantillon. Nier élabore aussi la méthode des **isochrones**, grâce à laquelle il est possible de dater un échantillon même si on ne connaît pas les concentrations initiales des isotopes lors de sa formation.

La datation des échantillons géologiques

À partir des années 1900, au fur et à mesure des progrès techniques, les minéraux et roches terrestres sont datés de façon de plus en plus précise grâce aux traces d'isotopes radioactifs, radiogéniques et stables qu'ils contiennent.

Les échantillons géologiques sont datés grâce à des couples d'isotopes père/fils, appelés **géochronomètres**.

Remarque : On observe, au microscope polarisant, des taches sombres au sein de certains minéraux (Fig. 5). Ces taches témoignent de la radioactivité de la roche.

La datation des roches les plus anciennes de la Terre permet de s'approcher de son âge. Cependant ces roches sont rares et difficiles à trouver, car la plupart des roches initialement présentes ont été détruites par l'érosion.

3 Une connaissance stabilisée

Patterson détermine l'âge de la Terre en 1955

Clair Patterson (1922-1955) utilise les géochronomètres $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ et $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ sur des météorites et certains minéraux de sédiments océaniques. Il est le premier à tracer une **géochrone**, isochrone sur laquelle les points correspondant aux météorites et à la Terre s'alignent, ce qui prouve qu'elles ont le même âge (Fig. 6). En 1955, il détermine que la Terre et les astéroïdes se sont formés il y a 4,55 milliards d'années. Cette estimation sera ensuite affinée.

L'âge aujourd'hui admis

La détermination de l'âge de la Terre a fait l'objet de querelles et de nombreuses recherches, jusqu'à devenir une connaissance stabilisée. Les physiciens ont fourni aux géologues l'outil nécessaire à une datation précise.

L'âge de la Terre est de 4,57 milliards d'années. Il s'agit d'une donnée aujourd'hui bien établie, grâce à la collaboration de plusieurs disciplines.

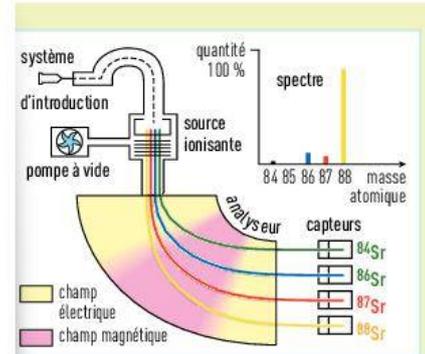


Fig. 4 : La séparation des isotopes d'un élément par le spectromètre de masse.

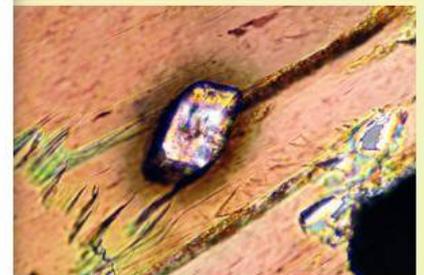


Fig. 5 : L'auréole sombre autour de ce zircon est provoquée par les désintégrations radioactives des isotopes qu'il contient (granite de l'île Vierge).

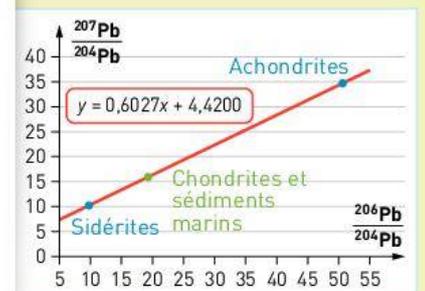


Fig. 6 : La courbe géochrone obtenue par Patterson.

Le vocabulaire à retenir

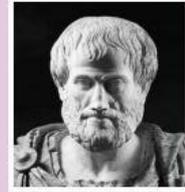
- **Géochrone** : isochrone basée sur l'utilisation de deux géochronomètres U/Pb, appliquée à la Terre.
- **Géochronomètre** : couple d'isotopes (isotope radioactif et isotope radiogénique correspondant) servant à dater les roches ou les fossiles.
- **Isochrone** : droite représentant la mise en relation des rapports isotopiques d'un géochronomètre donné pour plusieurs minéraux d'une roche ; les points de cette droite représentent des échantillons du même âge.
- **Modèle (scientifique)** : représentation simplifiée de la réalité permettant de réaliser des expériences, des simulations et des prévisions.
- **Radiochronologie** : méthode de datation s'appuyant sur les propriétés radioactives de certains atomes, et fournissant un âge numérique.
- **Radiogénique** : qualifie un noyau atomique issu d'une désintégration radioactive. Ce noyau peut être lui-même stable ou radioactif.

L'âge de la Terre : une filiation des idées

Une relecture « scientifique »
des écrits bibliques
Isaac Newton (1642-1727)
*La Terre s'est formée
4000 ans av. J.-C.*



Une conception
philosophique antique
Aristote (-384 à -322)
*La Terre a toujours existé,
elle n'a pas d'âge.*



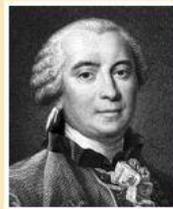
Un sujet de débat scientifique
avec les géologues...
**Charles Lyell
(1797-1875)**
*La Terre a bien plus que
100 millions d'années.*



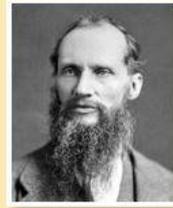
...et les évolutionnistes
**Charles Darwin
(1809-1882)**
*La Terre a plus de
300 millions d'années.*



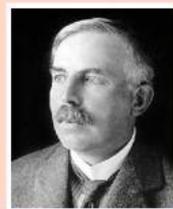
Une véritable approche
scientifique basée sur
l'expérimentation...
Buffon (1707-1788)
La Terre a 100 000 ans.



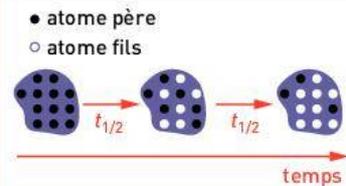
... et la modélisation d'une
durée de refroidissement
Kelvin (1824-1907)
*La Terre a entre 20 et
40 millions d'années.*



Une connaissance stabilisée
par la datation des météorites
Clair Patterson (1922-1995)
La Terre a 4,55 milliards d'années.



L'avènement d'un nouvel outil :
la radiochronologie
Ernest Rutherford (1871-1937)
*L'âge de la Terre s'exprime en
milliards d'années.*



LA TERRE EST ÂGÉE DE 4,57 MILLIARDS D'ANNÉES

Rappels du programme de 1ère Spé SVT

Tiré du livre de 1ère Edition Bordas

Les divisions cellulaires des eucaryotes



1 La stabilité du caryotype au cours des cycles de développement

L'observation du caryotype d'une **cellule somatique**, c'est-à-dire non sexuelle, montre que les chromosomes peuvent être regroupés par paires de chromosomes **homologues** (même taille, même position du centromère, même disposition des bandes de coloration).

➤ Une cellule somatique possède donc deux exemplaires de chaque type de chromosome. Elle est qualifiée de **diploïde**. Son caryotype est alors noté $2n$ (n étant le nombre de types de chromosomes différents). Dans les **gamètes** (spermatozoïdes et ovules), on ne compte en revanche qu'un seul exemplaire de chaque type chromosomique : les gamètes sont des cellules **haploïdes**, comportant n chromosomes.

➤ La méiose est le processus de **division cellulaire** qui permet de produire de telles cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde. La **fécondation**, quant à elle, réunit deux cellules haploïdes pour former la cellule-œuf diploïde. Ces deux mécanismes, méiose et fécondation, se succèdent au cours de tout cycle de développement et garantissent, sauf accident, la **stabilité du caryotype** d'une génération à la suivante.

2 La stabilité du caryotype au cours des cycles cellulaires

Une alternance de cycles produit les cellules somatiques

Toutes les cellules d'un être vivant pluricellulaire proviennent de divisions successives à partir de la cellule-œuf originelle. On appelle **cycle cellulaire** la période qui s'étend depuis la formation d'une cellule, par division d'une cellule-mère, jusqu'au moment où cette cellule finit elle-même de se diviser en deux cellules-filles. À l'intérieur d'un cycle, on distingue l'**interphase**, période pendant laquelle la cellule n'est pas en train de se diviser et la **mitose**, qui correspond aux différentes étapes de la division.

Différents états de condensation de l'ADN au cours du cycle cellulaire

Au début de la mitose, les molécules d'ADN subissent une condensation (elles s'enroulent sur elles-mêmes) et prennent la forme de petits bâtonnets colorables, bien individualisés car **condensés** : les chromosomes (du grec *krōma* : couleur et *sōma* : corps). À la fin de la mitose, les chromosomes se décondensent et prennent un aspect diffus à l'intérieur du noyau cellulaire des cellules-filles. Durant l'interphase qui suit, les chromosomes restent dans cet état **décondensé**.

Des chromosomes alternativement simples ou doubles

L'interphase peut être découpée en trois phases successives.

La phase G1 (G, de l'anglais gap = intervalle) pendant laquelle la quantité d'ADN par cellule reste constante. Pendant cette étape **les chromosomes sont simples** : chacun d'eux est constitué d'une unique molécule d'ADN. La phase S (S comme synthèse) est marquée par un doublement progressif de la quantité d'ADN, à l'origine de la **duplication des chromosomes**. Pendant la phase G2, puis au début de la mitose, **les chromosomes sont doubles** (à deux chromatides réunies au niveau du centromère) et la quantité d'ADN dans la cellule est stable, égale au double de celle de la phase G1. Au cours de la mitose, les deux chromatides de chaque chromosome se séparent au niveau du centromère, et les chromosomes redeviennent simples.

3 La mitose, une reproduction conforme des cellules

Les étapes de la mitose

Bien que la mitose soit un processus continu, on peut la diviser en plusieurs phases permettant de bien comprendre le phénomène :

- **La prophase** (du grec *pro*, avant) : les chromosomes doubles commencent à se condenser, ils deviennent progressivement visibles et bien individualisés. L'enveloppe du noyau disparaît, les chromosomes se dispersent dans le cytoplasme.
- **La métaphase** (du grec *meta*, après) : la condensation des chromosomes est alors maximale. Les chromosomes se placent de telle sorte que tous les centromères sont situés dans un même plan, qualifié d'équatorial.
- **L'anaphase** (du grec *ana*, en haut) : les deux chromatides de chaque chromosome double se séparent après rupture du centromère. Deux lots identiques de chromatides migrent en sens opposé, chacun vers un pôle cellulaire.
- **La télophase** (du grec *telos*, fin) : chaque lot de chromatides arrive à un pôle de la cellule et se décondense. Une enveloppe nucléaire se forme autour de chaque lot et achève ainsi la formation des deux noyaux-fils. La séparation du cytoplasme se produit, ce qui marque la fin de la mitose.

La mitose conserve le caryotype

Les deux cellules-filles issues de la mitose ont exactement les mêmes chromosomes que la cellule-mère. La mitose est donc une reproduction dite conforme, car elle conserve le caryotype au cours des divisions successives.

4 La méiose, une production de cellules haploïdes

Les étapes de la méiose

La méiose est constituée de **deux divisions cellulaires** successives. Elle est précédée, comme toute autre division, d'une phase de **duplication** des chromosomes. Au début de la méiose, chaque chromosome est donc double.

➤ La première division (notée « I ») est composée des quatre phases de toute division cellulaire, mais présente des particularités importantes par rapport à la mitose :

- En **prophase I**, chaque chromosome dupliqué se rapproche de son homologue. Les deux chromosomes de chaque paire s'alignent dans le même sens et s'associent (formation de bivalents). Les deux chromosomes se dissocient ensuite partiellement mais leurs chromatides peuvent s'enchevêtrer, formant des chiasmats.
- En **métaphase I**, ce sont donc des paires de chromosomes doubles (bivalents) qui viennent se placer dans le plan équatorial, et non des chromosomes doubles indépendants les uns des autres comme en mitose. Pour chaque bivalent, les centromères se placent de part et d'autre du plan équatorial, seuls les chiasmats se positionnant dans ce plan.
- En **anaphase I**, ce sont les deux chromosomes doubles de chaque paire qui se séparent et migrent vers les pôles, et non les chromatides de chaque chromosome double comme au cours de l'anaphase de la mitose.
- En **télophase I**, se forment ainsi deux cellules-filles haploïdes, à n chromosomes doubles : elles ne contiennent chacune qu'un seul lot de chromosomes, les deux chromosomes de chaque paire ayant été séparés.

➤ La **seconde division** (notée « II ») se déroule immédiatement à la suite de la première : il n'y a pas de synthèse d'ADN, car chaque chromosome est resté dupliqué. Elle se déroule comme une mitose classique et produit ainsi, pour chaque cellule à n chromosomes doubles, deux cellules à n chromosomes simples.

La méiose modifie le caryotype

Finalement, la méiose produit donc quatre **cellules-filles haploïdes** à partir d'une **cellule-mère diploïde**, le passage de l'état diploïde à l'état haploïde ayant lieu dès la première division.

5 Le rôle fondamental du fuseau de division

Le ballet des chromosomes est orchestré par des protéines fibreuses

Au cours des divisions cellulaires, des fibres protéiques, constituant le fuseau de division, contribuent à la transmission des chromosomes aux cellules-filles.

➤ Au début de la prophase, ces fibres se mettent en place à partir d'un centre organisateur situé à l'un des pôles de la cellule. Certaines fibres s'ancrent sur les bras des chromosomes et exercent des forces qui les conduisent, lors de la métaphase, à se rapprocher du plan équatorial de la cellule. D'autres fibres s'arriment au niveau du centromère de chaque chromosome.

➤ En métaphase de **mitose**, chacune des deux chromatides d'un chromosome est connectée à **l'un des deux pôles** cellulaires. Au cours de l'anaphase, les fibres se raccourcissent, provoquant la **séparation des chromatides** et leur migration vers les pôles opposés.

➤ En métaphase I de la **méiose**, les deux chromatides d'un chromosome sont cette fois connectés **au même pôle** cellulaire, tandis que les chromatides du chromosome homologue sont connectés au pôle opposé. Au cours de l'anaphase I, le raccourcissement des fibres provoque alors la **séparation des deux chromosomes doubles** et leur migration vers les pôles opposés.

Fuseau de division et anomalies du caryotype

Au cours de la **mitose**, il arrive parfois qu'un chromosome ne se sépare pas correctement des autres. Cette **non-disjonction** conduit à la formation de cellules ne comportant pas le nombre normal de chromosomes : c'est ce qu'on appelle une **aneuploïdie**. Dans certains cas, la cellule survit mais échappe aux processus de contrôle du cycle cellulaire, ce qui peut conduire au développement de tumeurs cancéreuses.

➤ Une aneuploïdie provient souvent d'un **problème de fixation des fibres** du fuseau de division au centromère. Il peut arriver par exemple que les deux parties du centromère soient reliées à des fibres du fuseau issues d'un même pôle. Certains **facteurs environnementaux** augmentent la probabilité de telles anomalies (polluants, rayons mutagènes).

➤ Lorsqu'une non-disjonction se produit lors d'une des deux divisions de **méiose**, cela conduit à la formation de gamètes anormaux, dans lesquels un des chromosomes reste en deux exemplaires, ou dans lesquels un des chromosomes est absent. Quand ces gamètes participent à une fécondation, cela conduit à la formation de cellules-œufs dans lesquelles un des chromosomes est en trois exemplaires (**trisomie**) ou en un seul exemplaire (**monosomie**). Seules certaines de ces anomalies chromosomiques sont compatibles avec la vie (trisomie 21, monosomie X par exemple).

FIG. 1 • La mitose sépare les chromatides de chaque chromosome double

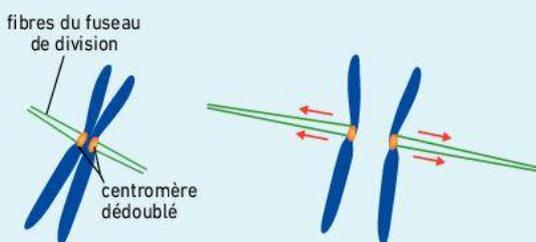
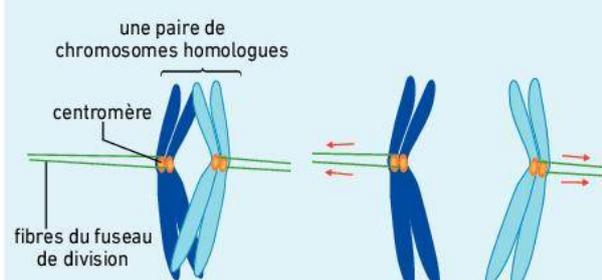


FIG. 2 • La méiose sépare les chromosomes de chaque paire d'homologues



À retenir

● La stabilité du caryotype au cours des cycles de développement

Les **cellules somatiques** sont **diploïdes** : elles contiennent des paires de chromosomes **homologues**. Les **gamètes** sont des cellules **haploïdes** : elles contiennent un seul exemplaire de chaque type chromosomique. La **méiose** et la **fécondation** se succèdent au cours du cycle de développement et permettent la **stabilité du caryotype** d'une génération à la suivante.

● La stabilité du caryotype du cours des cycles cellulaires

Les **cycles cellulaires** font alterner l'**interphase**, période pendant laquelle la cellule n'est pas en train de se diviser et la **mitose**, qui correspond aux différentes étapes de la division. Les chromosomes passent d'un état **décondensé** (durant l'interphase) à un état **condensé** (durant la mitose). L'interphase peut être découpée en trois phases successives. G1, S et G2. Pendant G1 les chromosomes sont **simples** (une seule chromatide). La phase S permet la **duplication** des chromosomes. En G2, les chromosomes sont **doubles**.

● La mitose, une reproduction conforme des cellules

Quatre étapes se succèdent au cours de la mitose : **prophase**, **métaphase**, **anaphase** et **télophase**. Elles permettent la **séparation des deux chromatides de chaque chromosome** double et leur migration en sens opposé vers les pôles cellulaires. Deux cellules-filles contenant exactement les mêmes chromosomes que la cellule-mère se forment alors. La mitose est donc une reproduction conforme, qui conserve le caryotype.

● La méiose, une production de cellules haploïdes

La méiose est constituée de **deux divisions cellulaires** successives. La **première division** permet la **séparation des deux chromosomes de chaque paire de chromosomes homologues**, et la formation de deux cellules-filles haploïdes, à n chromosomes doubles. La **seconde division** se déroule immédiatement à la suite de la première, sans interphase. Elle permet la séparation des chromatides de chaque chromosome double. Finalement, la méiose produit donc des **cellules-filles haploïdes** à partir d'une **cellule-mère diploïde**.

● Le rôle fondamental du fuseau de division

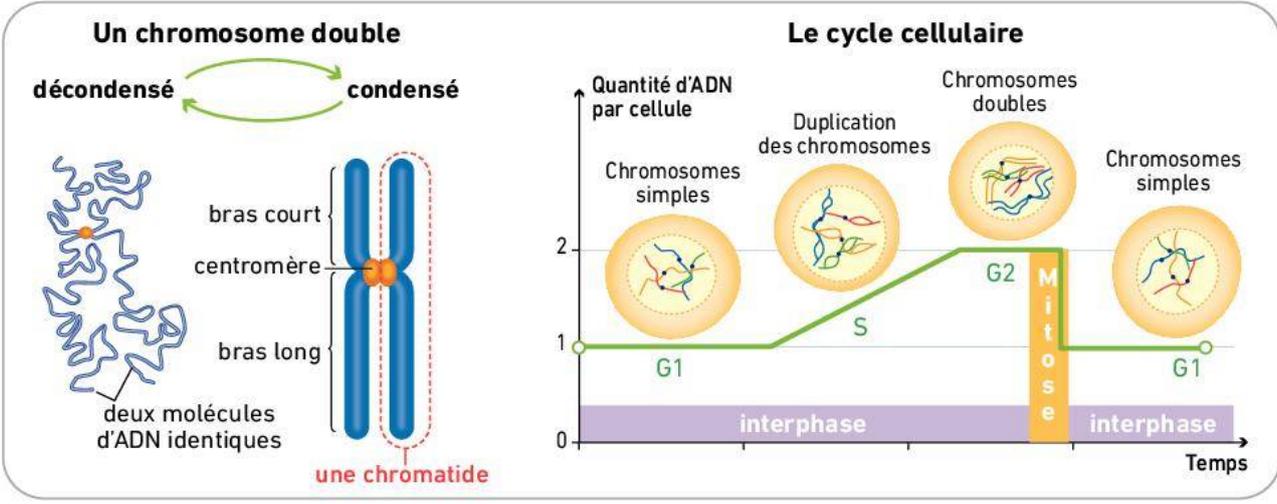
Au cours de la mitose comme de la méiose, un **fuseau de division** constitué de fibres protéiques organise les déplacements des chromosomes. Des anomalies dans le fonctionnement du fuseau de division peuvent provoquer la non-disjonction des chromosomes et la formation de cellules **aneuploïdes**, impliquées dans certains cancers. Lors de la méiose, une non-disjonction conduit à la formation de gamètes anormaux à l'origine d'anomalies du caryotype : **trisomies** ou **monosomies**.

Mots-clés

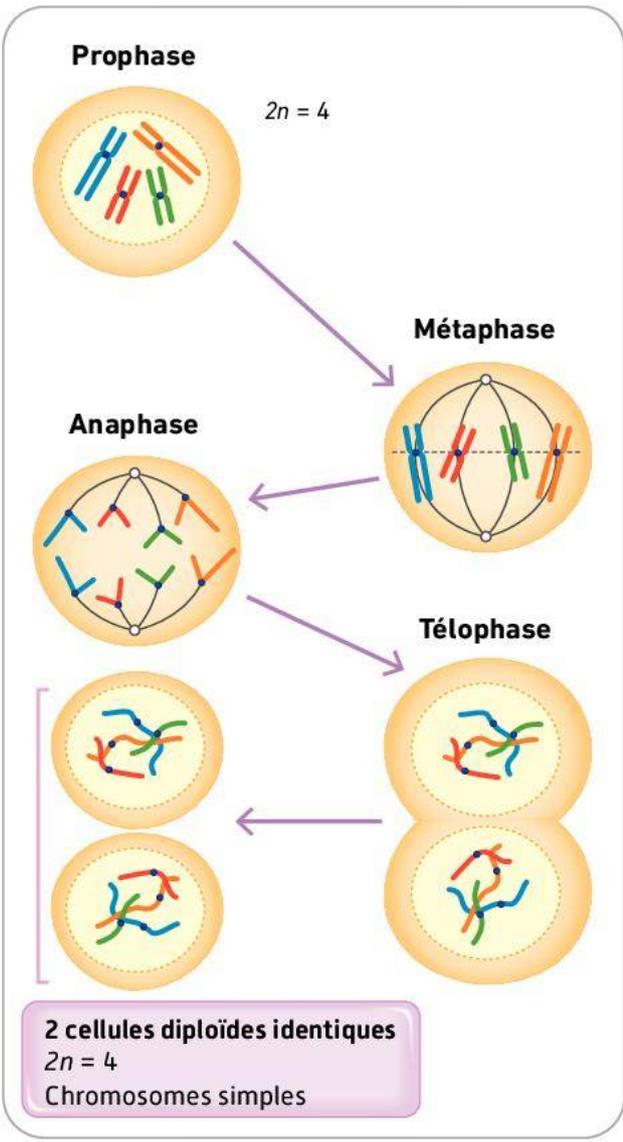
Caryotype ● Cycle cellulaire ● Diploïde ● Fuseau de division ● G1, S (synthèse d'ADN), G2 ● Haploïde ● Méiose ● Mitose.

Schéma bilan

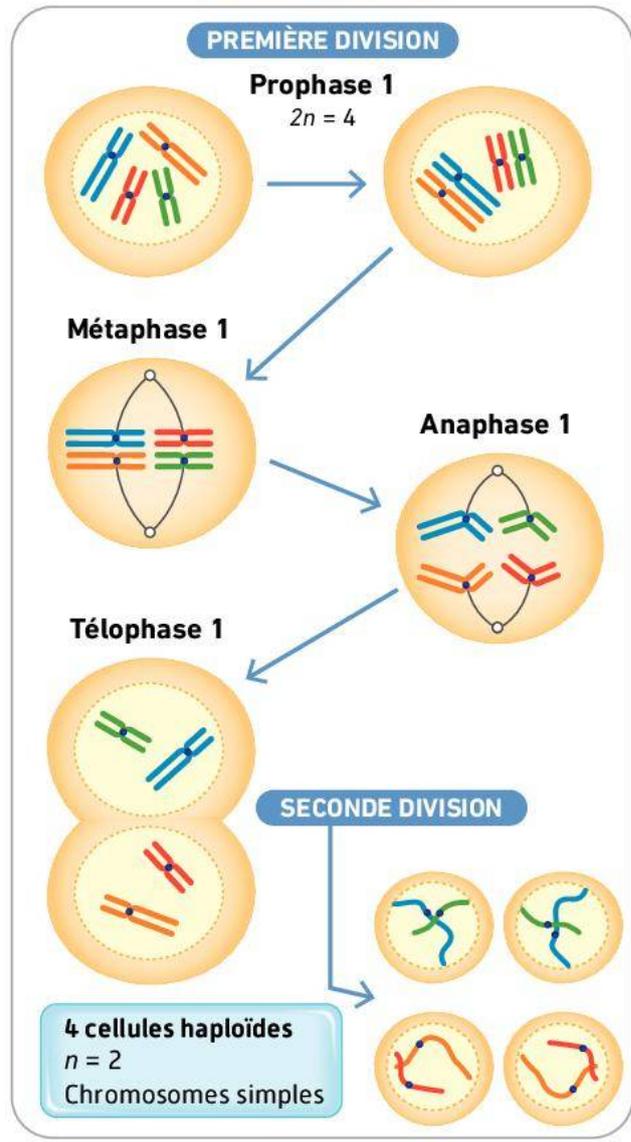
Les chromosomes, éléments permanents des cellules



La mitose, une reproduction conforme des cellules



La méiose, une production de cellules haploïdes



Réplication de l'ADN et variabilité génétique



1

Chromosomes et ADN

Deux mètres d'ADN par cellule

Chaque cellule somatique d'un organisme pluricellulaire contient l'intégralité de l'information génétique. Pour se représenter la quantité d'ADN à laquelle cela correspond, il faut savoir qu'un chromosome simple, ou **chromatide**, comporte **une** molécule d'ADN. Or, le génome humain (diploïde) est constitué de 46 chromosomes, soit 46 molécules d'ADN, totalisant environ 6 milliards de paires de nucléotides. La longueur moyenne de la molécule d'ADN d'un chromosome est ainsi d'environ 4,5 cm, ce qui fait plus de 2 m d'ADN par cellule ! Il faut cependant garder à l'esprit que l'ADN est une molécule très fine (2 nm de diamètre).

Une capacité à se compacter

L'ADN est une longue molécule filamenteuse qui a la capacité de s'enrouler autour de **protéines structurantes**, les histones. Il se forme ainsi une sorte de « collier de perles », la chaîne nucléosomique, qui peut s'enrouler ou se replier sur elle-même. C'est dans cet état que se trouvent les molécules d'ADN en **interphase**, formant dans le noyau des amas diffus auxquels on a donné le nom de chromatine.

Au début d'une **division cellulaire**, la chaîne nucléosomique s'enroule sur elle-même en plusieurs niveaux successifs : l'ADN est alors très condensé, ce qui se traduit par un raccourcissement et un épaississement de la structure : une molécule d'ADN de 8 cm de long ainsi **compactée** formera un chromosome de 7 μm de longueur seulement et de 0,7 μm d'épaisseur. Une conséquence de cette condensation est que chaque chromosome occupant un espace restreint, tous les chromosomes d'une cellule sont bien individualisés, séparés les uns des autres.

2

La réplication de l'ADN

Un préalable à la division cellulaire

Puisqu'au cours de la mitose une cellule transmet son information génétique à deux cellules filles, il est indispensable qu'au cours de l'interphase précédant la division, l'intégralité de l'information génétique ait été dupliquée. Cette étape, qui se déroule au cours de la phase S de l'interphase, est la **réplication de l'ADN**.

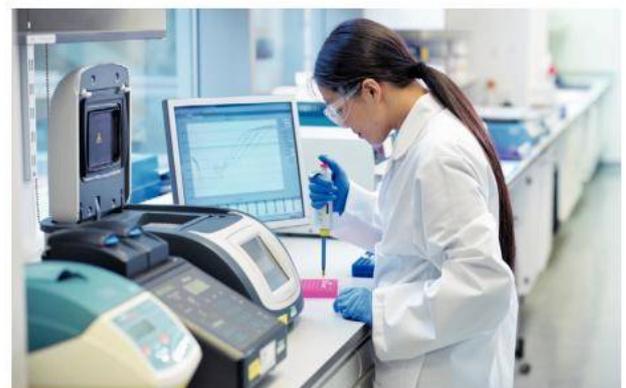
Un mécanisme semi-conservatif

À la suite de leur découverte concernant l'architecture de la molécule d'ADN (1953), Crick et Watson proposèrent un modèle de réplication. Dans cette hypothèse, chacun des deux brins sert de modèle à la fabrication d'un nouveau brin. Une molécule d'ADN donne ainsi naissance à deux molécules d'ADN filles constituées d'un brin « nouveau » et d'un brin « ancien ». Comme la moitié de la molécule initiale est conservée, le mécanisme de réplication de l'ADN est dit **semi-conservatif**. Différentes études expérimentales, utilisant des nucléotides « marqués » qui permettent de suivre l'ADN au cours des générations cellulaires successives, ont confirmé la réalité de ce mécanisme.

Le rôle de l'ADN-polymérase

L'écartement des deux brins de la molécule initiale d'ADN ainsi que l'insertion de nouveaux nucléotides sont assurés par un complexe enzymatique, l'**ADN-polymérase**. Tout en progressant le long de la molécule, l'ADN-polymérase insère un par un de nouveaux nucléotides en face de chacun des deux brins. Cette fabrication de nouveaux brins d'ADN s'effectue en respectant la **complémentarité** des nucléotides : un nucléotide A (Adénine) est associé à un nucléotide T (Thymine) et un nucléotide C (Cytosine) est associé à un nucléotide G (Guanine). Les molécules d'ADN en cours de réplication peuvent être observées au microscope électronique : il est alors possible de voir des zones appelées « **yeux de réplication** » où la molécule d'ADN est dédoublée. Chaque œil comporte en fait deux « fourches de réplication », figures en forme de Y, où une ADN-polymérase effectue la réplication. Ces fourches progressent en sens opposé, assurant la réplication de l'ensemble de la molécule d'ADN. Les deux « copies » restent néanmoins solidaires au niveau d'une zone qui forme le centromère du chromosome.

Ainsi, un chromosome à deux chromatides tel qu'il apparaît au début de la mitose est constitué de deux molécules d'ADN identiques, portant les mêmes informations génétiques.



La PCR, une technologie révolutionnaire : un milliard de copies d'ADN en moins d'une heure !

3

L'ADN, entre stabilité et variabilité

L'origine d'une variabilité de l'ADN

Dans une cellule humaine, à chaque réplication, ce sont plus de 6 milliards de paires de nucléotides qui sont répliqués. Aucun système de copie n'étant infaillible, on comprend aisément qu'il puisse se produire de temps en temps des **erreurs** : il peut y avoir par exemple incorporation d'un nucléotide non complémentaire ou bien un « oubli », ou au contraire l'ajout d'un nucléotide surnuméraire. Même si la **fiabilité** de l'ADN-polymérase peut être considérée comme excellente, on estime qu'elle « se trompe » environ une fois pour 100 000 nucléotides insérés. De plus, même en dehors des périodes de réplication, l'ADN peut être endommagé et sa séquence s'en trouver modifiée. À la fin de l'interphase, on constate que le nombre d'erreurs présentes dans une molécule d'ADN est **beaucoup plus faible** (une pour un milliard de nucléotides environ) que le nombre d'erreurs effectuées au cours de la réplication. En effet, les cellules possèdent plusieurs **systèmes enzymatiques** capables de contrôler l'ADN et de **réparer** les erreurs. Ces enzymes exercent leur action au cours de la réplication ou après celle-ci.

Des mutations de l'ADN

On appelle **mutation** une modification de la molécule d'ADN qui a échappé aux processus de réparation. Notons que si la modification ne concerne bien au départ qu'un seul brin, il y aura néanmoins dès la réplication suivante formation d'une molécule d'ADN portant une paire de nucléotides modifiée. Comme cette molécule d'ADN peut elle-même servir de modèle pour les réplications ultérieures, la mutation peut **se transmettre** au cours des cycles cellulaires successifs, formant un **clone cellulaire** modifié.

La comparaison de molécules d'ADN révèle, comme on peut s'y attendre, l'existence de plusieurs types de **mutations ponctuelles**, portant sur une paire de nucléotides :

- mutation par **substitution**, lorsqu'une paire de nucléotides a été remplacée par une autre paire ;
- mutation par **délétion**, correspondant à la perte d'une paire de nucléotides ;
- mutation par **addition**, lorsqu'une paire de nucléotides supplémentaire a été insérée dans la séquence d'ADN.

Des agents mutagènes

Ces modifications de l'ADN sont **spontanées** et leur fréquence est faible. Cependant, certains facteurs ont la propriété d'augmenter cette fréquence. Ils sont qualifiés d'**agents mutagènes**.

Par exemple, des **substances chimiques** comme le benzène ou l'acridine (utilisée comme colorant) sont des molécules qui **s'intercalent** entre les nucléotides de l'ADN : au cours de la réplication de l'ADN, il y aura alors incorporation d'un nucléotide supplémentaire sur le brin opposé.

Certaines radiations électromagnétiques peuvent pénétrer plus ou moins profondément la matière vivante et endommager l'ADN (rayons gamma, rayons X). Les **rayons ultraviolets (UV)** émis par le Soleil sont les principaux agents mutagènes auxquels sont exposées les populations humaines. Des études expérimentales le confirment : les rayons UV peuvent détruire des cellules (**effet léthal**) et ont également un **effet mutagène** important.

Les effets des UV sur l'ADN sont multiples et bien connus : ils entraînent souvent la formation de **liaisons covalentes** entre deux nucléotides consécutifs (par exemple deux nucléotides T, constituant ce qu'on appelle un dimère T). Cette liaison anormale crée localement une **modification de la structure de l'ADN** qui perturbe le fonctionnement normal de l'ADN-polymérase au moment de la réplication.



Les rayons UV peuvent détruire des cellules, favoriser des mutations, et parfois rendre des cellules cancéreuses.

4

Mutations et polyallélisme

Nous savons que pour un gène, il existe le plus souvent plusieurs « versions » différentes, appelées **allèles**.

Par exemple, si tous les êtres humains ont nécessairement un groupe sanguin, tous n'ont pas les mêmes allèles déterminant ce groupe. Pour certains gènes, il peut exister une très grande **diversité** d'allèles.

La comparaison des allèles d'un gène montre que ceux-ci diffèrent en général par quelques nucléotides seulement. L'origine commune des divers allèles d'un gène ne fait pas de doute : c'est en effet par **mutation** que se forme un nouvel allèle. Lorsqu'un individu hérite d'un nouvel allèle, celui-ci devient transmissible de génération en génération : à long terme, il peut se répandre dans une population. Il est important de remarquer que ce mécanisme à l'origine des allèles est purement **aléatoire** : il ne fait appel à aucun mécanisme prédéterminé et ne répond à aucune nécessité ni à aucun objectif.

Cette diversité des allèles constitue l'essentiel de la **diversité génétique** d'une population et, par là même, de la diversité des individus au sein d'une espèce.

Ainsi, le phénomène de mutation, s'il peut se révéler parfois néfaste pour un individu, doit être compris comme étant le fondement même de la **biodiversité** génétique des populations et des espèces.

À retenir

Chromosomes et ADN

Une chromatide est constituée d'une longue molécule d'ADN qui s'enroule autour de protéines structurantes.

En **interphase**, cette chaîne se replie mais reste dans un état **faiblement condensé**.

Au début de la **mitose**, les protéines structurantes se rapprochent, ce qui assure une **compaction** très importante de la molécule d'ADN ; l'ensemble prenant l'aspect caractéristique d'un chromosome.

La réplication de l'ADN au cours de l'interphase

Au cours de la **phase S** de l'interphase, la quantité d'ADN double : chaque molécule d'ADN est **répliquée** en deux molécules filles, selon un **mécanisme semi-conservatif**. En effet, chacun des deux brins de l'ADN sert de matrice : l'**ADN-polymérase** forme deux nouveaux brins en incorporant des nucléotides par complémentarité avec les deux brins d'origine. En absence d'erreur, les deux molécules d'ADN sont identiques et possèdent la **même séquence de nucléotides**.

L'origine d'une variabilité de l'ADN

La **molécule d'ADN** n'est pas totalement stable : il peut se produire des erreurs de **réplication** ou des **lésions** de l'ADN, modifiant la séquence de nucléotides de la molécule.

La plupart des erreurs de réplication de l'ADN sont **réparées** par des **systèmes enzymatiques**. Cependant, certaines erreurs échappent à cette réparation : ces modifications de l'ADN sont qualifiées de **mutations**.

Certains facteurs (substances chimiques, phénomènes physiques) augmentent la fréquence des mutations : ce sont des **agents mutagènes**.

Les mutations de l'ADN

On distingue plusieurs types de mutations ponctuelles : **substitution** (un nucléotide est remplacé par un autre), **délétion** (un nucléotide est perdu), **addition** (un nucléotide est ajouté). Le phénomène de mutation est certes **peu fréquent** mais étant donné le nombre de nucléotides présents dans une cellule et le nombre de divisions cellulaires, la mutation est un **phénomène banal** auquel aucun être vivant n'échappe. La destinée d'une cellule mutée est variable : elle peut mourir ou bien être à l'origine, par divisions cellulaires successives, d'un **clone mutant** portant l'information génétique modifiée.

Les mutations à l'origine de la biodiversité

Les différents **allèles** d'un gène présentent un nombre limité de différences : en effet, c'est par **mutation** de la séquence de nucléotides d'un gène que se forme un nouvel allèle.

À l'échelle des **populations** et des **espèces**, les mutations sont la source **aléatoire** de la diversité des allèles (polyallélisme). C'est donc sur le phénomène de mutation que repose la **biodiversité génétique**.

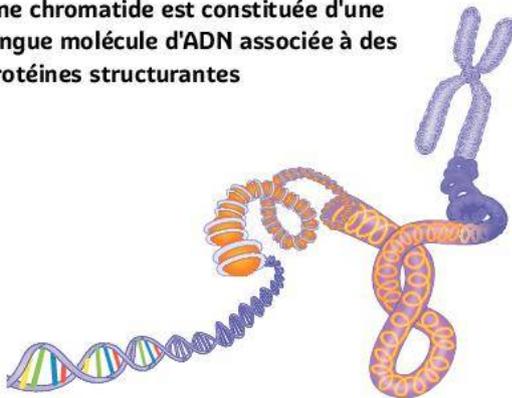
Mots-clés

ADN-polymérase • agent mutagène • clone • compaction • enzyme réparatrice de l'ADN • mutation • polyallélisme • protéine structurante • réplication semi-conservative

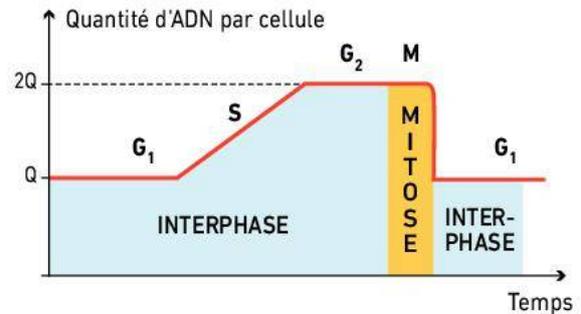
Schéma bilan

Chromosomes et ADN

Une chromatide est constituée d'une longue molécule d'ADN associée à des protéines structurantes

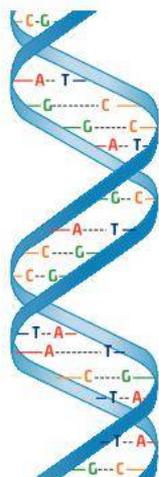


La quantité d'ADN double au cours de la phase S de l'interphase

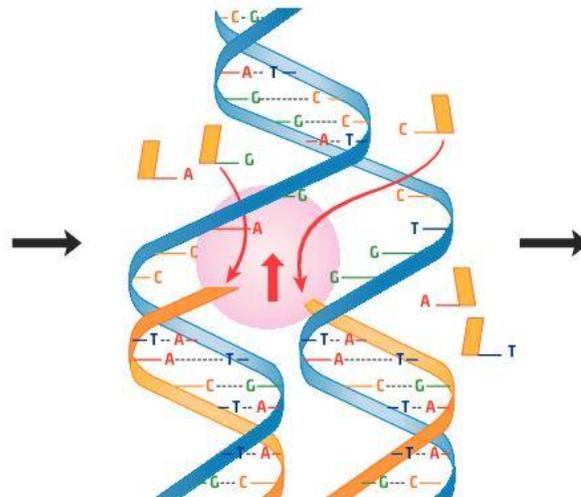


La réplication semi-conservative de l'ADN

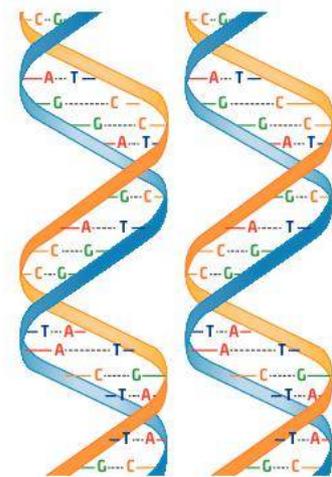
Molécule d'ADN initiale



Incorporation de nucléotides par complémentarité



Deux molécules d'ADN identiques

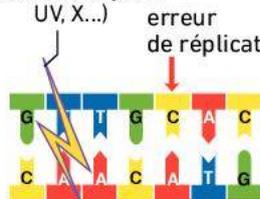


Mutations de l'ADN et variabilité génétique

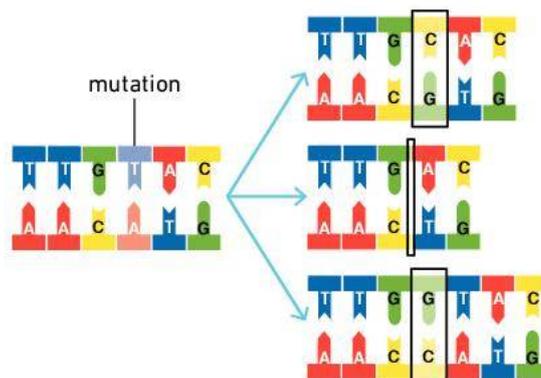
L'ADN peut parfois être endommagé ou modifié

agents mutagènes

(benzène, rayons UV, X...)



Les mutations sont à l'origine de la diversité des allèles



substitution d'une paire de nucléotides

délétion d'une paire de nucléotides

addition d'une paire de nucléotides

plusieurs allèles d'un même gène



1

Une relation entre ADN et protéines

Les protéines, des macromolécules essentielles

Les fonctions essentielles des cellules et leur structure elle-même sont assurées par des macromolécules, les **protéines**. Une protéine est constituée par un ou plusieurs **polypeptides**. Chaque polypeptide est une chaîne d'**acides aminés**, petites molécules liées entre elles par des liaisons peptidiques.

Il existe vingt acides aminés différents, possédant chacun des propriétés chimiques particulières (acide, basique, hydrophobe, hydrophile, etc.). Dans une protéine, les acides aminés réagissent avec leurs voisins selon leurs affinités chimiques, si bien que la chaîne polypeptidique ne conserve jamais une forme linéaire : elle se replie dans l'espace et adopte une **forme caractéristique**, qui lui confère ses propriétés.

Les gènes contrôlent la synthèse des protéines

Différentes expériences historiques ont montré que des mutations touchant un gène affectent le fonctionnement de protéines. Elles ont abouti au concept « **un gène, une protéine** ». Cette idée a été ensuite affinée : par exemple, dans le cas de maladies génétiques touchant l'hémoglobine, on a constaté qu'une mutation de l'ADN modifiait un acide aminé dans la protéine. Par la suite, on a pu comparer la position des mutations sur un gène donné et la position des acides aminés sur la séquence de la protéine correspondante. On a alors constaté que l'enchaînement des acides aminés d'une protéine suit le même ordre que la succession des informations sur l'ADN : c'est la **colinéarité** gène/protéine. On comprend ainsi la signification de l'information codée par l'ADN : la succession des nucléotides d'un gène indique l'enchaînement des acides aminés qui constituent une protéine.

2

La transcription, première étape de l'expression d'un gène

La nécessité d'un intermédiaire

Chez les eucaryotes, l'ADN est toujours localisé dans le noyau cellulaire, séparé du cytoplasme par l'enveloppe nucléaire. À aucun moment cet ADN ne quitte le noyau, et c'est pourtant dans le cytoplasme que s'effectue la

synthèse des protéines. Cette synthèse ne peut être dirigée par l'information génétique que si des « copies » du gène à exprimer sont exportées du noyau vers le cytoplasme. Ces copies sont fabriquées dans le noyau, sous forme d'**ARN**, une molécule très proche de l'ADN : cette étape est la **transcription**.

L'ARN ou acide ribonucléique est, comme l'ADN, une molécule formée par une succession de nucléotides de quatre types différents. Cependant, les nucléotides de l'ARN diffèrent de ceux de l'ADN par le glucide qu'ils possèdent (du ribose à la place du désoxyribose). De plus, le nucléotide T est remplacé dans l'ARN par le **nucléotide U**. Enfin, l'ARN n'est constitué que d'**une seule chaîne** de nucléotides.

La transcription de l'ADN en ARN

La transcription nécessite l'action d'une enzyme, l'**ARN-polymérase**. Au fur et à mesure de sa progression le long de l'ADN, l'ARN-polymérase incorpore des nucléotides libres, présents dans le noyau, par complémentarité avec l'un des brins de l'ADN : G se place en face de C, C en face de G, A en face de T et U en face de A. Le brin d'ARN ainsi produit est donc complémentaire du brin d'ADN qui a servi de matrice, appelé brin transcrit. Par conséquent, le message de l'ARN est **identique** à celui du **brin non transcrit** d'ADN (à la différence du nucléotide U qui, sur l'ARN, occupe la place du nucléotide T de l'ADN). Plusieurs ARN-polymérases se succèdent le long d'un même segment d'ADN et entament la fabrication « à la chaîne » d'ARN identiques entre eux, et qui constituent autant de copies des informations contenues dans le gène.

3

La maturation des ARN

Les gènes des eucaryotes sont morcelés

Chez les eucaryotes pluricellulaires, la longueur totale d'un gène est cinq fois plus importante que celle de l'ARN exporté dans le cytoplasme. Dans le noyau, il y a donc **une maturation de l'ARN**. Par transcription, il se forme d'abord une molécule d'**ARN pré-messager** aussi longue que le gène, constituée d'une alternance de séquences qui ne serviront pas à la synthèse des protéines (les introns) et de séquences codant pour la protéine (les exons).

Dans un deuxième temps, les introns sont supprimés et les exons successifs sont raccordés entre eux : ce processus, qui aboutit à la formation de l'**ARN messager (ARNm)** est appelé l'**épissage**.

► Un processus de diversification des protéines

Un même ARN pré-messager peut subir des maturations différentes et donner des ARN messagers différents selon le type de cellule ou selon le moment où le gène s'exprime. En effet, certains exons peuvent ou non être retenus dans l'ARN messager définitif. Ce phénomène, appelé **épissage alternatif**, concerne 60 % de nos gènes. Il permet à un gène de coder selon les cas pour plusieurs protéines différentes, aux fonctions différentes. Cette découverte a amené les scientifiques à remettre en cause le concept historique « un gène, une protéine ».

4

La traduction de l'ARN messager en protéine

► Le code génétique, un système de correspondance

Le code génétique est le système qui établit la correspondance entre un triplet de nucléotides de l'ARN, ou **codon**, et un acide aminé. Comme il existe quatre nucléotides, on dénombre 64 triplets de nucléotides différents (4^3) ; or, ces codons permettent de « désigner » 20 acides aminés. De ce fait, la plupart des acides aminés sont codés par plus d'un triplet : le code génétique est **redondant**. En revanche, chaque triplet ne code que pour un seul acide aminé, toujours le même : le code génétique est **univoque**. Trois triplets ne codent pour aucun acide aminé et sont qualifiés de « codons-stop ».

Le code génétique est commun à l'ensemble des êtres vivants, hormis quelques exceptions pour lesquelles un ou deux codons sont différents. Cette **universalité** est un argument en faveur d'une origine commune de tous les êtres vivants.

► La traduction a lieu au niveau des ribosomes

L'assemblage des acides aminés en protéine, dicté par l'information génétique, constitue la **traduction**. Elle se déroule dans le cytoplasme au niveau de structures appelées **ribosomes**. Les ribosomes sont formés d'une petite sous-unité,

capable de reconnaître et de se fixer sur une molécule d'ARNm, et d'une grosse sous-unité, associée à la petite sous-unité et qui réalise l'assemblage des acides aminés.

La traduction commence toujours par un codon particulier de l'ARNm, le **codon initiateur** AUG. Ensuite, le ribosome se « déplace » de triplet en triplet, en formant des **liaisons peptidiques** entre les acides aminés correspondant à chaque codon et l'acide aminé précédent dans la chaîne protéique. C'est l'**élongation**. Cette phase se poursuit jusqu'à la lecture d'un **codon-stop** par le ribosome ; celui-ci se dissocie alors et libère la protéine ainsi formée.

Plusieurs ribosomes effectuent la synthèse de protéines à partir d'un même ARNm. Ils se succèdent sur le brin d'ARN et forment un ensemble caractéristique appelé **polysome**. Chaque molécule d'ARNm gouverne ainsi la synthèse simultanée de 10 à 20 molécules protéiques identiques.

5

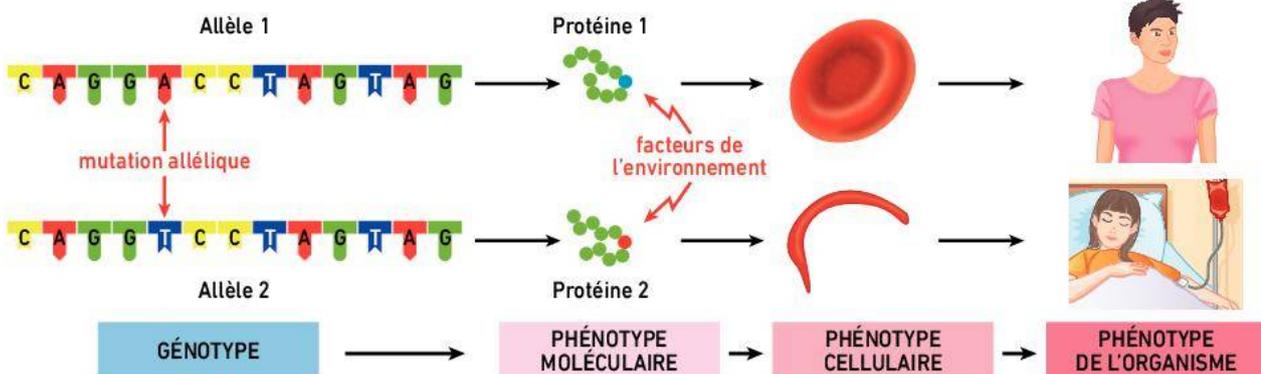
La régulation de l'expression des gènes

Une cellule n'exprime qu'une partie des gènes qu'elle possède : en exprimant des gènes différents, les cellules se **spécialisent**. L'activité des gènes d'une cellule est donc **régulée** sous l'influence de facteurs internes, notamment au cours du développement, ou externes, en réponse aux conditions environnementales. En effet, des molécules, appelées facteurs de transcription, peuvent se fixer sur une séquence d'ADN régulatrice, non codante, et ainsi activer ou réprimer l'expression d'un gène.

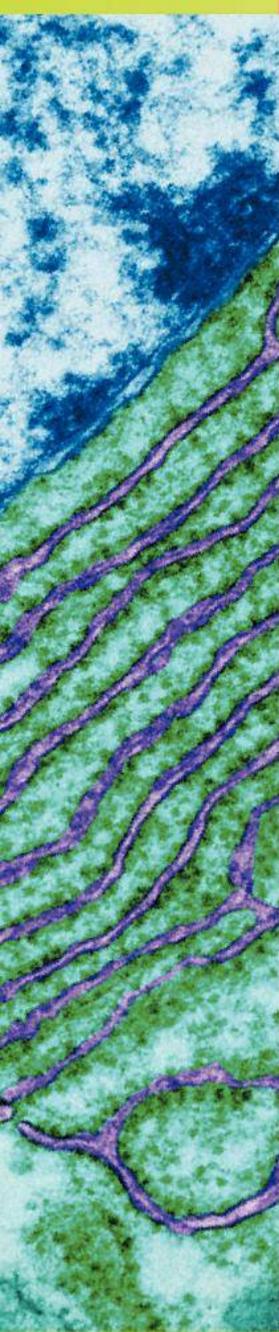
Le **phénotype**, ensemble des caractéristiques d'un être vivant, peut être défini à chacun des niveaux d'organisation du vivant, de la molécule à l'organisme. Il résulte en partie de l'expression de son **génotype**, c'est-à-dire de son patrimoine génétique, transmis de générations en générations. L'ensemble des ARN et des protéines résultant de la transcription et de la traduction de l'ADN constitue le **phénotype moléculaire**.

C'est l'activité de ces molécules produites à partir de l'ADN qui va, en interaction avec de multiples facteurs, déterminer le phénotype cellulaire, et en définitive l'ensemble du phénotype macroscopique observable à l'échelle de l'organisme.

Du génotype au phénotype



À retenir



- **Les gènes commandent la synthèse des protéines**

Les **protéines** sont des macromolécules essentielles au fonctionnement des cellules. Elles sont formées d'une succession de petites molécules, les acides aminés. Toutes les protéines sont le produit de l'**expression d'un gène**. La séquence de l'ADN, succession de nucléotides le long des brins de la molécule, est une **information codée** nécessaire à la **synthèse des protéines**. L'enchaînement des acides aminés d'une protéine suit en effet la séquence des nucléotides du gène correspondant.

- **La transcription de l'ADN en ARN pré-messager**

L'**ARN messager** est une copie éphémère d'un fragment d'ADN, formée dans le noyau et exportée dans le cytoplasme pour y être utilisée. La production de l'ARN messager débute par une opération de **transcription** au cours de laquelle est synthétisé un ARN pré-messager par complémentarité avec le brin transcrit de l'ADN, grâce à l'action de l'**ARN-polymérase**.

- **La maturation de l'ARN pré-messager en ARN messager**

L'ARN pré-messager transcrit à partir de l'ADN subit, avant d'être exporté, un **épissage** au cours duquel des séquences appelées introns sont supprimées et les séquences codantes appelées exons sont raccordées entre elles. L'épissage alternatif permet à un même gène de coder pour **plusieurs protéines** différentes selon les exons retenus pour la constitution de l'ARN messager.

- **Le code génétique est un système de correspondance**

Le **code génétique** permet la traduction de l'ARN messager en protéines : une suite de trois nucléotides, ou codon, code pour un acide aminé, toujours le même. Ce tableau de correspondance entre les 64 codons différents et les acides aminés qui leur sont associés est **universel** à l'ensemble du monde vivant.

- **La traduction de l'ARN messager en protéine**

Les **ribosomes** réalisent la synthèse des protéines à partir de l'information de l'ARN messager. La **traduction** commence toujours par le codon d'initiation. Elle se poursuit de codon en codon, ajoutant les acides aminés correspondants jusqu'à la rencontre d'un **codon-stop**.

- **La régulation de l'expression des gènes**

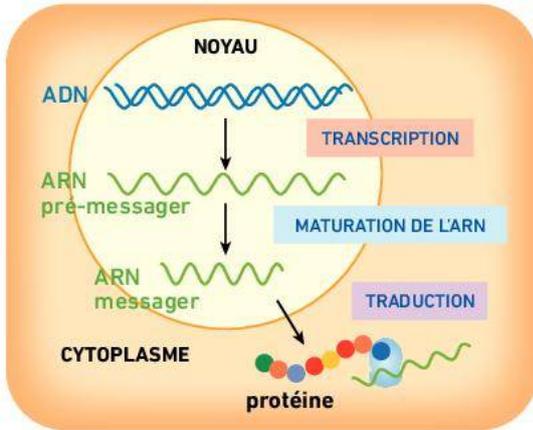
L'activité des gènes de la cellule est **régulée**, c'est-à-dire que l'expression d'un gène peut être activée ou réprimée, sous l'influence de facteurs internes ou externes. Le **phénotype** résulte de l'ensemble des produits de l'ADN (protéines et ARN) présents dans la cellule.

Mots-clés

ARN messager ● ARN-polymérase ● ARN pré-messager ● Code génétique ● Codon ● Génotype ● Phénotype
● Protéines ● Régulation ● Ribosome ● Traduction ● Transcription

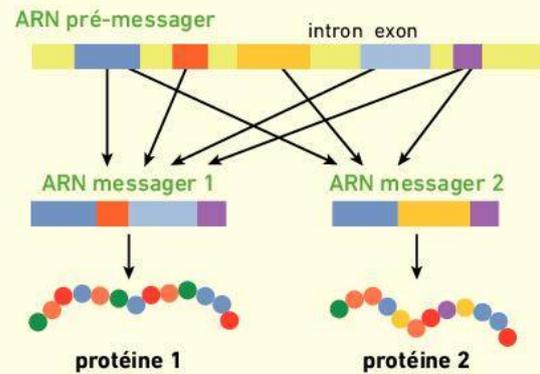
L'expression du patrimoine génétique

Du gène à la protéine, plusieurs étapes



LA MATURATION DE L'ARN

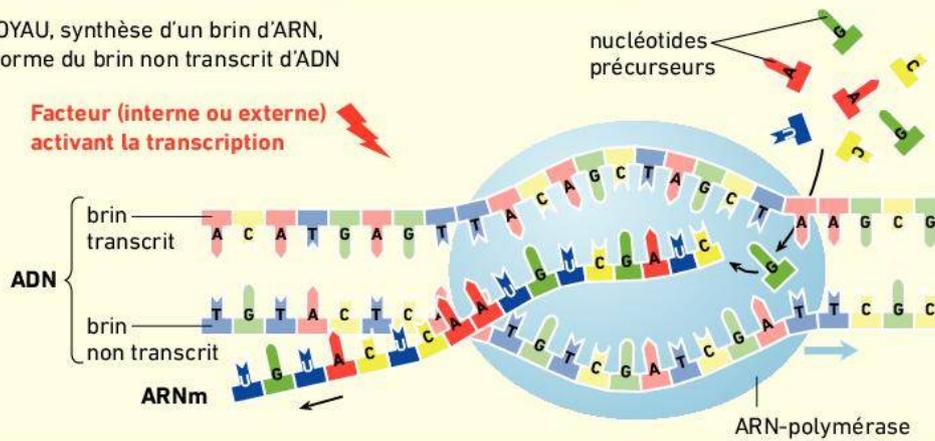
Un gène, plusieurs protéines



LA TRANSCRIPTION

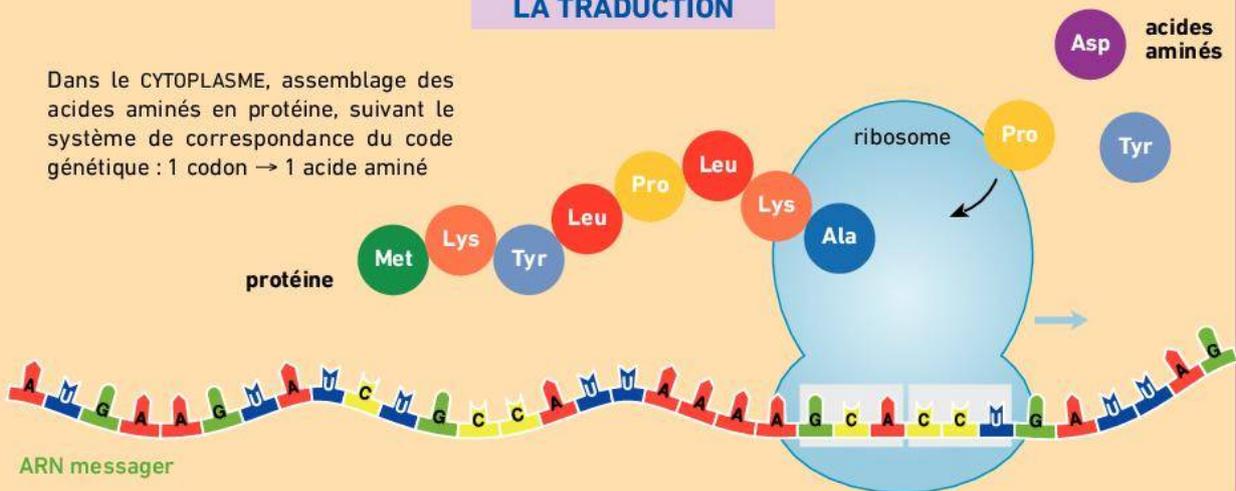
Dans le **NOYAU**, synthèse d'un brin d'ARN, copie conforme du brin non transcrit d'ADN

Facteur (interne ou externe) activant la transcription



LA TRADUCTION

Dans le **CYTOPLASME**, assemblage des acides aminés en protéine, suivant le système de correspondance du code génétique : 1 codon → 1 acide aminé



Les enzymes, des biomolécules aux propriétés catalytiques



Parmi les protéines intervenant dans la réalisation du phénotype, les enzymes constituent un groupe essentiel. En effet, ces molécules sont impliquées dans toutes les réactions biochimiques se produisant dans une cellule vivante. L'équipement enzymatique dont bénéficie ou non un organisme est donc déterminant pour l'établissement de son phénotype.

1 Les caractéristiques de la catalyse enzymatique

La nécessité d'une catalyse

L'immense majorité des réactions se déroulant dans l'organisme sont catalysées par des **enzymes**. Une simple réaction comme l'hydrolyse de l'amidon peut certes se produire assez rapidement *in vitro*, mais elle nécessite un milieu acide ($\text{pH} = 1$) et une température élevée (100°C). De telles conditions sont incompatibles avec la vie. Pour se dérouler rapidement à une température de 37°C , l'hydrolyse de l'amidon doit être catalysée par l'amylose, une enzyme produite par des cellules spécialisées des glandes salivaires et de la muqueuse intestinale. Cet exemple peut être généralisé : les innombrables réactions biochimiques se déroulant dans chacune des cellules nécessitent une **catalyse enzymatique**.

Les propriétés d'un catalyseur

Les enzymes possèdent les deux propriétés fondamentales de tout **catalyseur** :

- elles **accélèrent la vitesse de la réaction** ;
- elles participent à la réaction, mais n'apparaissent pas dans le bilan de la réaction. En effet, elles se **retrouvent dans leur état initial** à la fin de la catalyse.

La durée d'une réaction enzymatique est de l'ordre de 10^{-3} seconde. Après leur intervention au cours de la réaction, les enzymes conservent leurs propriétés et sont disponibles pour catalyser de nouvelles réactions. En une seconde, une molécule d'enzyme peut ainsi catalyser mille réactions chimiques ! C'est la raison pour laquelle une faible concentration en enzyme est en général suffisante.

La spécificité de la catalyse enzymatique

On appelle **substrat** la molécule dont l'enzyme catalyse la transformation. Le plus souvent, une enzyme ne peut agir que sur un **substrat** bien déterminé et pour un **seul type de réaction** : les enzymes ont donc une **double spécificité**. Par exemple, l'amylose, qui catalyse l'hydrolyse de l'amidon, ne peut pas agir sur une protéine. Elle ne peut pas non

plus catalyser une autre réaction qu'une hydrolyse. On imagine ainsi la diversité des enzymes indispensables pour catalyser toutes les réactions biochimiques nécessaires à la vie d'un être vivant.

Cette double spécificité est utilisée pour la dénomination des enzymes. Les enzymes sont souvent désignées par le suffixe « ase ». Le nom de l'enzyme indique en général la nature du substrat sur lequel elle agit : l'amylose catalyse l'hydrolyse de l'amidon, la saccharase l'hydrolyse du saccharose... La nature des réactions chimiques catalysées constitue le critère essentiel de classification des enzymes. Ainsi on distingue les hydrolases (qui dissocient par action de l'eau), les polymérase (qui associent en chaînes), les synthétases (qui effectuent des liaisons), les transférase, etc.



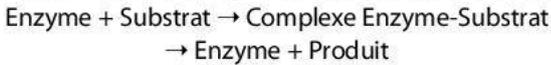
2 L'interaction enzyme-substrat

Les enzymes sont des biomolécules

Les enzymes sont des molécules biologiques, fabriquées par les êtres vivants eux-mêmes. La plupart des enzymes sont des **protéines**. Une enzyme est donc formée d'un enchaînement d'acides aminés liés les uns aux autres. Les acides aminés qui constituent cette chaîne ont des propriétés différentes qui les font interagir : des acides aminés plus ou moins lointains peuvent établir entre eux des liaisons de différents types (liaisons hydrogène, interactions ioniques entre acides aminés de charges différentes, ponts disulfures, c'est-à-dire liaisons covalentes entre atomes de soufre appartenant à des acides aminés différents). Ces liaisons entraînent un repliement de la chaîne donnant ainsi sa **forme tridimensionnelle** à la protéine.

► La formation d'un complexe enzyme-substrat

L'activité catalytique d'une enzyme nécessite sa fixation sur le substrat formant ainsi le **complexe enzyme-substrat**. Ce complexe est transitoire : il se dissocie une fois la réaction réalisée en libérant l'enzyme et les produits de la réaction.



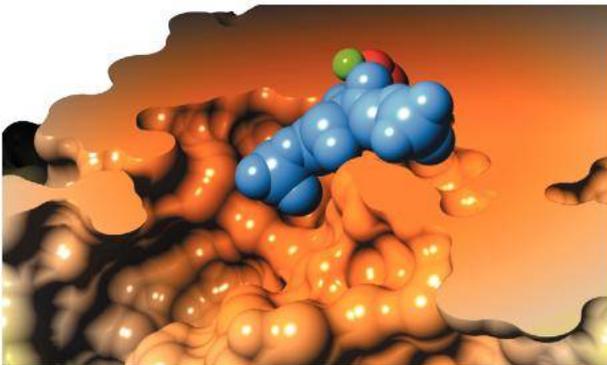
La **structure tridimensionnelle** de l'enzyme comporte un domaine spécialisé dans la liaison au substrat : c'est le **site actif**, dans lequel peut se loger transitoirement le substrat. Dans ce site actif, le substrat est positionné de façon à ce que les acides aminés responsables de la catalyse de la réaction chimique soient dans un agencement optimal pour réagir avec le substrat.

La composition des acides aminés constituant le site actif détermine les propriétés chimiques de l'enzyme. La réaction catalysée par une enzyme est en effet une conséquence de la présence des acides aminés situés à proximité du substrat.

► La structure de l'enzyme détermine ses spécificités

La comparaison des sites actifs de différentes enzymes montre que les enzymes qui n'agissent pas sur les mêmes substrats ont des sites actifs de forme différente, ce qui explique la spécificité de substrat. Le modèle utilisé classiquement pour la décrire est celui de la complémentarité entre la forme d'une **clé** et celle de la **serrure** correspondante. Ainsi, une enzyme ne peut former un complexe enzyme-substrat qu'avec une molécule qui possède une forme **complémentaire** de celle de son site actif.

D'autre part, des enzymes qui agissent sur le même substrat, mais qui catalysent des réactions différentes n'ont pas les mêmes acides aminés en contact avec le substrat, ce qui explique la spécificité d'action.



■ Molécule de substrat se fixant sur le site actif d'une enzyme.

► La cinétique enzymatique

L'activité enzymatique s'évalue expérimentalement en mesurant la **vitesse initiale** de la réaction catalysée. Cette vitesse exprime la quantité de substrat transformé (ou la quantité de produit formé) par unité de temps au début de

la réaction. Plus la probabilité de rencontre entre les molécules d'enzyme et de substrat est élevée, plus la vitesse de réaction est importante. C'est la raison pour laquelle la vitesse de la catalyse enzymatique est maximale au début de la réaction (un nombre maximum d'enzymes est « occupé »). Cette vitesse diminue ensuite progressivement, en fonction de la quantité de substrat restant à transformer. La vitesse de la réaction enzymatique est donc le coefficient directeur de la tangente à la courbe de cinétique au tout début de la réaction.

La vitesse de la catalyse enzymatique dépend de nombreux facteurs : elle augmente en fonction de la **concentration en enzyme** et de la **concentration en substrat** et dépend de **facteurs** tels que la température et le pH du milieu. Une augmentation de la température entraîne un accroissement de l'agitation des molécules en solution et donc des probabilités de rencontre entre l'enzyme et son substrat. Cependant, au-delà d'une valeur optimale, une température élevée détériore l'enzyme de façon irréversible.

3

L'équipement enzymatique des cellules

► Les enzymes, produits de l'expression génétique

Les enzymes sont des biomolécules qui résultent de l'expression génétique, c'est-à-dire de la transcription en ARN et de la traduction en protéines. La modification d'un ou de quelques acides aminés suffit pour changer la structure de l'enzyme et par conséquent son activité catalytique. Ainsi, suite à une ou des **mutations**, la chaîne d'acides aminés constituant une enzyme peut être modifiée. Dans certains cas, l'enzyme présente un **site actif différent** et exerce son action sur un autre substrat. Une simple mutation ponctuelle peut aussi avoir pour conséquence la perte totale de la capacité de catalyse. Des mutations peuvent avoir pour effet d'enrichir le potentiel de catalyse d'un organisme. Elles peuvent aussi être pénalisantes et constituer la cause de certaines maladies génétiques.

► Les enzymes, marqueurs de la spécialisation cellulaire

Les cellules spécialisées d'un organisme pluricellulaire se distinguent par leur structure et par leur fonction. Elles se différencient en n'exprimant pas toutes les mêmes gènes. On peut constater que les cellules spécialisées ne possèdent pas toutes le même équipement enzymatique. Alors que certaines enzymes (ADN-polymérase par exemple) sont présentes dans la plupart des cellules, d'autres (comme l'amylase) ne sont présentes que dans les cellules dont la fonction nécessite cette enzyme. Pour chaque type cellulaire, on peut ainsi établir un **profil enzymatique** qui est l'ensemble des enzymes dont la cellule est équipée. Ce profil enzymatique, déterminant pour la fonction d'une cellule, est donc un marqueur de sa spécialisation.

À retenir

Les enzymes sont des catalyseurs biologiques

Les enzymes sont des **protéines** : ce sont des molécules biologiques dont la production résulte d'une expression de l'information génétique.

Dans des conditions compatibles avec la vie, les enzymes sont indispensables pour **accélérer** les réactions biochimiques. Comme tout **catalyseur**, une enzyme retrouve son état initial en fin de réaction.

La formation d'un complexe enzyme-substrat

La catalyse enzymatique nécessite la formation d'un **complexe** transitoire entre l'enzyme et son substrat. À la fin de la réaction, l'enzyme libère le produit ou les produits de la réaction et retrouve son état initial.

Les enzymes sont des protéines dont la forme tridimensionnelle ménage un **site actif** permettant, par complémentarité spatiale, la fixation temporaire du substrat et la réalisation de la réaction catalysée.

Le rôle du site actif

Une enzyme est **doublement spécifique** : elle ne peut catalyser qu'un seul type de réaction sur un seul type de substrat. La composition en acides aminés du site actif détermine à la fois quel substrat peut s'associer à l'enzyme et la nature de la réaction chimique catalysée.

Les nombreuses réactions biochimiques du métabolisme d'une cellule exigent donc une grande diversité d'enzymes très spécialisées.

La cinétique enzymatique

La **vitesse** de la réaction enzymatique est la quantité de substrat transformé (ou de produit formé) par unité de temps. Cette vitesse est maximale au **début de la réaction**. Elle dépend de la probabilité de rencontre et d'association entre enzyme et substrat, et donc de leurs concentrations.

La vitesse de catalyse dépend aussi de facteurs externes, comme la température par exemple.

Enzymes et spécialisation cellulaire

Les cellules d'un organisme pluricellulaire sont spécialisées : elles accomplissent des fonctions différentes. Ces fonctions sont conditionnées par la diversité et la quantité d'enzymes dont est équipée une cellule. L'**équipement enzymatique** d'une cellule est un marqueur de sa spécialisation.

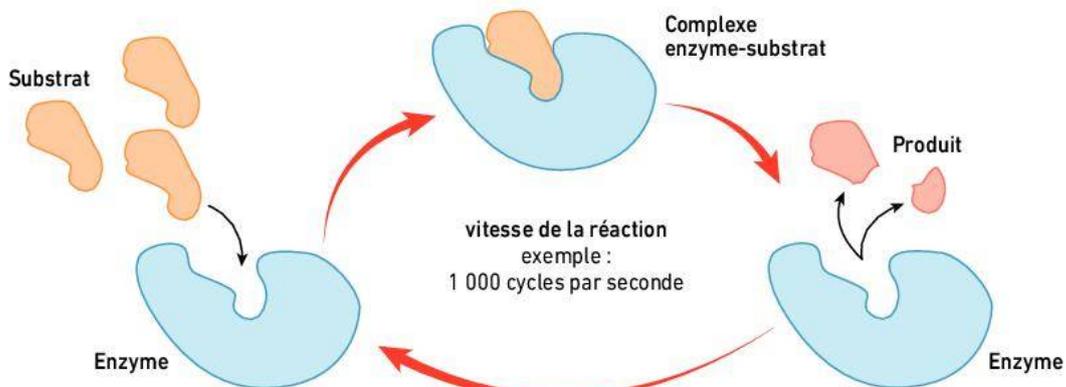
Mots-clés

Catalyse ● Complexe enzyme-substrat ● Double spécificité ● Enzyme ● Équipement enzymatique ● Produit
● Site actif ● Spécialisation cellulaire ● Substrat ● Vitesse

Schéma bilan

Les enzymes, des biomolécules aux propriétés catalytiques

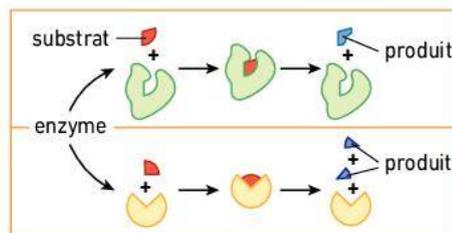
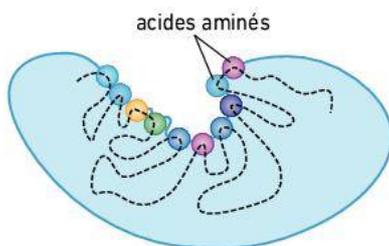
Les enzymes sont les catalyseurs des réactions biochimiques



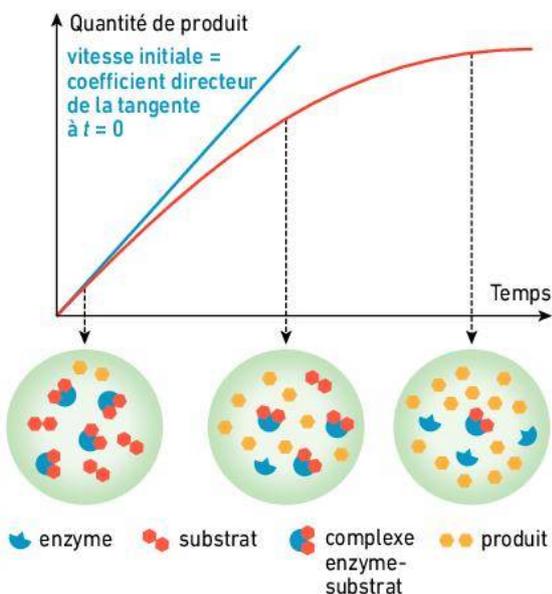
La structure tridimensionnelle de l'enzyme délimite un site actif

		Substrats	
Enzymes			

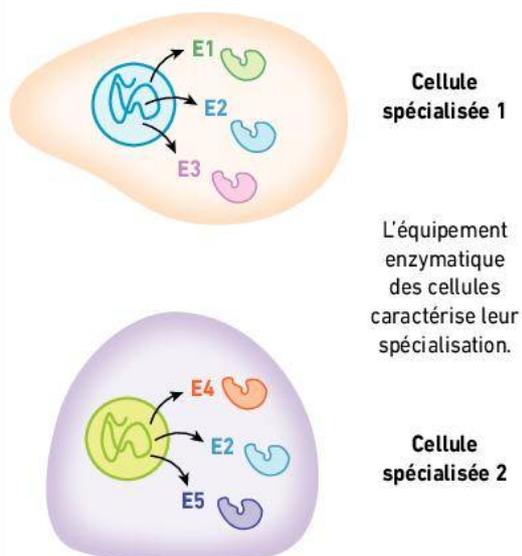
Spécificité de substrat :
une enzyme ne reconnaît qu'un seul substrat.



La cinétique enzymatique



Enzyme et spécialisation cellulaire



La structure du globe terrestre



1

Des contrastes importants entre continents et océans

Des reliefs contrastés

L'étude de la fréquence des différentes altitudes à la surface de notre planète révèle tout d'abord une grande diversité : l'Everest culmine à + 8 848 m, tandis que la fosse des Mariannes, la zone la plus profonde des océans, s'enfonce à - 11 034 m.

Au-delà de cette diversité, on distingue clairement des classes d'altitude typiquement océaniques, et des classes d'altitudes typiquement continentales. L'altitude moyenne des continents est de + 300 m, tandis que celle des océans est de - 4500 m.

Des roches très différentes

La distribution bimodale des altitudes est une conséquence d'un contraste géologique très net entre les domaines océanique et continental.

Le fond des océans est recouvert d'une couche de sédiments relativement fine (de 0 à 2 000 m d'épaisseur). En dessous, se trouve la **croûte océanique**, constituée en général de deux roches, le **basalte** et le **gabbro**. Il s'agit de deux **roches magmatiques**, c'est-à-dire issues du refroidissement et de la solidification d'un magma.

Basalte et gabbro partagent une même composition chimique et minéralogique (on y trouve surtout des cristaux de pyroxène et de feldspath). Cependant, ces deux roches présentent des textures différentes : alors que le gabbro est entièrement constitué de cristaux de grande taille au contact les uns avec les autres (texture grenue), le basalte présente peu ou pas de grands cristaux, mais une grande quantité de très petits cristaux (les microlites) dispersés dans un matériau minéral non cristallisé (amorphe). La texture du basalte est qualifiée de **microlitique**.

La surface des continents présente une grande diversité de roches : des roches sédimentaires, des roches magmatiques, mais aussi des roches métamorphiques, c'est-à-dire résultant de transformations à l'état solide des autres catégories de roches. Cependant, les forages révèlent que la roche la plus représentative de la **croûte continentale** est une roche magmatique, le **granite**.

De texture **grenue**, le granite est constitué d'une association caractéristique de minéraux (quartz, feldspaths et micas). Sa composition chimique est différente de celle du basalte et du gabbro : plus riche en silice et en potassium, le granite contient en revanche moins de fer. Sa **densité** est un peu plus faible que celle du gabbro et du basalte : 2,7 contre 3.

2

L'apport des études sismologiques

Séismes et ondes sismiques

Un séisme résulte de la libération brutale d'énergie lors de la rupture de roches soumises à de fortes contraintes. L'énergie libérée au foyer du séisme se dissipe sous forme d'ondes sismiques, se propageant à l'intérieur des roches et à leur surface. Ces ondes, émises dans toutes les directions, peuvent être enregistrées à une très grande distance du foyer du séisme, sous forme de graphiques appelés sismogrammes.

Ceux-ci révèlent plusieurs types d'ondes : les ondes « de volume » se propagent à l'intérieur du globe. Parmi elles, on distingue les ondes P (Premières), les plus rapides, qui se propagent à travers les solides et les fluides et les ondes S (Secondes), qui ne se propagent que dans les milieux solides. Les ondes « de surface » ne se propagent que dans les couches superficielles du globe ; ce sont les moins rapides, mais elles sont responsables de la plupart des dégâts.

Les discontinuités sismiques

Lorsqu'une onde sismique atteint une **discontinuité**, c'est-à-dire la limite entre deux milieux aux propriétés physico-chimiques différentes, elle est en partie réfractée (en changeant de milieu, sa trajectoire est déviée et sa vitesse modifiée), en partie réfléchi (renvoyée dans le même milieu par la surface de discontinuité). L'étude de la propagation des ondes P et S à l'intérieur du globe permet de mettre en évidence plusieurs discontinuités majeures, et apporte ainsi de précieuses informations sur la structure du globe terrestre.

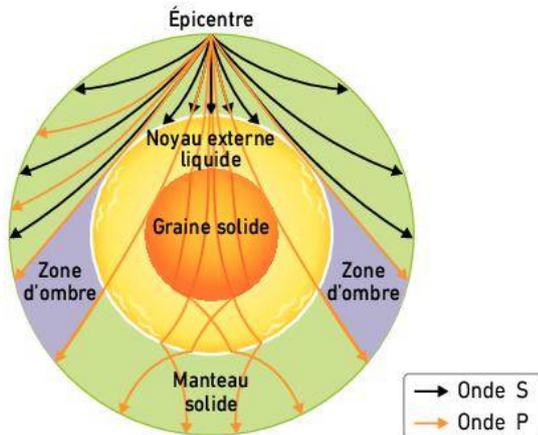
La discontinuité de Mohorovičić, ou **Moho**, sépare la croûte du **manteau**. Elle est caractérisée par une augmentation brutale de la vitesse des ondes P et S lorsque ces ondes passent de la croûte au manteau. En effet, celui-ci est constitué d'une roche de plus forte densité (3,3), la **péridotite**. La profondeur du Moho (donc l'épaisseur de la croûte) est très variable : en moyenne, elle est voisine de 7 km sous les océans, de 30 km sous les continents.

Pour chaque séisme, il existe une large zone du globe où les stations d'enregistrement ne reçoivent aucune onde directe : cette « zone d'ombre », s'étendant pour les ondes P entre 11 500 et 14 500 km du foyer sismique révèle l'existence de la discontinuité de Gutenberg, située à 2 900 km de profondeur. Elle sépare le manteau d'un milieu plus dense, le **noyau** (les ondes P s'y propagent plus rapidement), constitué principalement de fer. Les ondes S se comportent comme les ondes P jusqu'à une distance de

11 500 km. Elles se propagent donc dans tout le manteau, montrant qu'il est partout à l'état solide. En revanche, ces ondes S ne réapparaissent pas au-delà de 14 500 km. Cela montre que le noyau est à l'état liquide au moins dans ses régions les moins profondes (noyau externe).

La discontinuité de Lehmann, située à 5 150 km de profondeur, sépare ce noyau externe, liquide, du noyau interne ou graine, solide.

Ce modèle concentrique de la structure interne du globe, basée sur les études sismologiques constitue le modèle PREM (*Preliminary Reference Earth Model*).



● Lithosphère et asthénosphère

L'étude des séismes au voisinage des fosses océaniques montre une répartition particulière des foyers sismiques le long d'un plan passant par la fosse, et descendant obliquement jusqu'à une profondeur de plusieurs centaines de kilomètres. Cette répartition résulte de l'enfoncement du fond océanique, constitué de roches rigides, dans des roches au comportement plus souple, ductile. Elle révèle l'épaisseur de la couche de roches rigides sous les océans : environ 100 km.

L'étude de la vitesse des ondes sismiques en fonction de la profondeur montre *en général* sous les continents comme sous les océans une diminution des vitesses pour des profondeurs supérieures à 100 km, et sur une épaisseur d'environ 200 km : c'est la LVZ (Low Velocity Zone) ou zone de faible vitesse. On appelle **lithosphère** l'ensemble des roches rigides situées au dessus de cette limite, et **asthénosphère** les roches ductiles situées en dessous. La lithosphère comprend ainsi la croûte (océanique ou continentale) et la partie rigide du manteau (manteau lithosphérique).

3

L'apport des études thermiques

● L'augmentation de température à l'intérieur du globe terrestre

L'étude des températures au fond de forages réalisés dans la croûte montre une augmentation de la température des roches avec la profondeur. En moyenne,

cette augmentation est de 30 °C par kilomètre. Ce **gradient géothermique** est presque toujours positif, et révèle l'existence d'une énergie thermique à l'intérieur du globe terrestre.

● Un modèle thermique du globe terrestre

Le **géotherme** terrestre, courbe décrivant les variations de température en fonction de la profondeur au sein de la Terre, montre des variations importantes du gradient géothermique suivant les couches traversées. Cela s'explique par l'existence de deux modes de transfert de l'énergie thermique, aux efficacités bien différentes : dans la lithosphère rigide, l'énergie thermique ne peut s'évacuer des zones les plus chaudes vers les zones les plus froides que par **conduction thermique**, c'est-à-dire de proche en proche, sans déplacement de matière. Ce mode de transfert de l'énergie thermique est peu efficace : le gradient géothermique est donc fort entre la surface et la base de la lithosphère.

Lorsque la température du manteau dépasse 1 300 °C, c'est-à-dire en moyenne à partir de 100 km de profondeur, la rigidité des péridotites du manteau diminue fortement : elles deviennent ductiles. Cette température limite est à l'origine du contraste entre lithosphère et asthénosphère.

Sous la lithosphère, le gradient géothermique est nettement plus faible. Cela s'explique par un transfert d'énergie thermique plus efficace, par **convection thermique** : soumises à une forte augmentation de la température, les roches deviennent moins denses et ont alors tendance à remonter. Ce faisant, elles refroidissent, leur densité augmente et elles ont donc tendance à s'enfoncer. Des boucles de circulation de matière, appelées « cellules de convection » se mettent en place à grande échelle au sein du manteau et dans le noyau externe, et assurent un transfert de d'énergie thermique efficace.

● Des hétérogénéités thermiques au sein du manteau terrestre

La **tomographie sismique** permet d'identifier des variations localisées de température à l'intérieur du globe (anomalies thermiques), à partir des variations de vitesse des ondes sismiques par rapport au modèle PREM.

En traversant les zones froides, plus rigides, les ondes sismiques sont accélérées alors qu'au niveau des zones plus chaudes, moins rigides, les ondes sont ralenties.

Dans les zones de subduction, une anomalie thermique négative correspond à l'enfoncement de la lithosphère, plus froide, dans l'asthénosphère.

Au niveau des zones volcaniques de **point chaud**, il est possible de déceler une anomalie thermique positive à l'intérieur du manteau. Il s'agit d'un panache de matériel chaud provenant du manteau profond et remontant localement par convection thermique.

À retenir

● Océans et continents

La répartition bimodale des altitudes à la surface du globe met en évidence un contraste de relief entre les domaines océaniques et continentaux. Cela reflète une différence géologique marquée par la nature des roches, **basalte** et **gabbro** pour les océans et **granite** pour les continents, et par leur **densité** (environ 3 pour les océans contre 2,7 pour les continents).

● Une structure du globe en couches concentriques révélée par la sismologie

Un séisme résulte de la libération brutale d'énergie lors de la rupture de roches soumises à d'importantes contraintes. L'étude de la propagation des **ondes sismiques** révèle d'importantes **discontinuités** sur lesquelles les ondes se réfléchissent ou se réfractent en changeant de vitesse. Elle permet de construire un modèle du globe en plusieurs couches, le modèle PREM. La **croûte**, océanique ou continentale, est limitée à sa base par la discontinuité de Mohorovičić, ou **Moho**. Le **manteau**, solide, est situé entre le Moho et la discontinuité de Gutenberg, à 2 900 km de profondeur. Il est constitué de roches denses à l'état solide, les **péridotites**, dans lesquelles les ondes se propagent à une plus grande vitesse que dans la croûte. À plus de 2 900 km se trouve le **noyau**, liquide dans sa partie externe et solide dans sa partie interne.

● Un modèle basé sur le comportement des roches

Les études sismologiques permettent également de distinguer deux couches qui diffèrent par leur comportement : en surface se trouve la **lithosphère**, enveloppe constituée des roches rigides de la croûte et du manteau. Son épaisseur est d'une centaine de kilomètres en moyenne. En dessous, se trouve une zone du manteau où les roches sont ductiles : cette zone moins rigide du manteau est l'**asthénosphère**. La limite entre ces deux enveloppes correspond à une température de 1 300 °C, qui modifie le comportement des péridotites du manteau.

● Un modèle thermique du globe

La température augmente avec la profondeur suivant une courbe nommée **géotherme**. Ce profil d'évolution de la température interne présente des différences suivant les enveloppes internes de la Terre, qui s'expliquent par les modes de transfert de l'énergie thermique. Dans la lithosphère rigide, la chaleur est évacuée par **conduction**, alors que dans le manteau situé sous la lithosphère, elle est évacuée par **convection**, mécanisme plus efficace de transfert thermique. Cette différence de dissipation de l'énergie thermique interne explique le contraste entre le **gradient géothermique** élevé dans la lithosphère et faible dans le manteau situé en dessous.

La **tomographie sismique** permet de révéler des hétérogénéités thermiques au sein du manteau dans certaines régions du globe (fosses océaniques, volcans de point chaud).

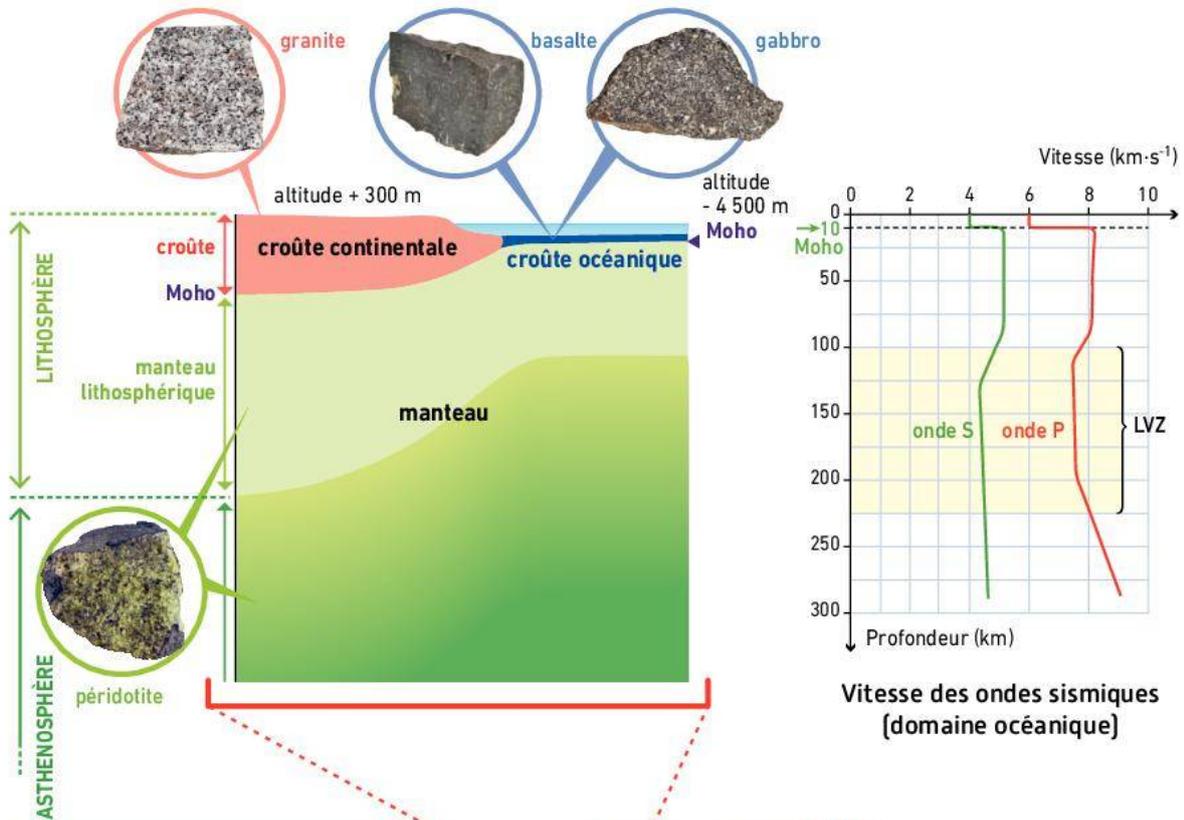
Mots-clés

Asthénosphère ● Basalte ● Conduction ● Convection ● Croûte ● Gabbro ● Géotherme ● Granite ● Lithosphère ● Manteau ● Moho ● Noyau

Schéma bilan

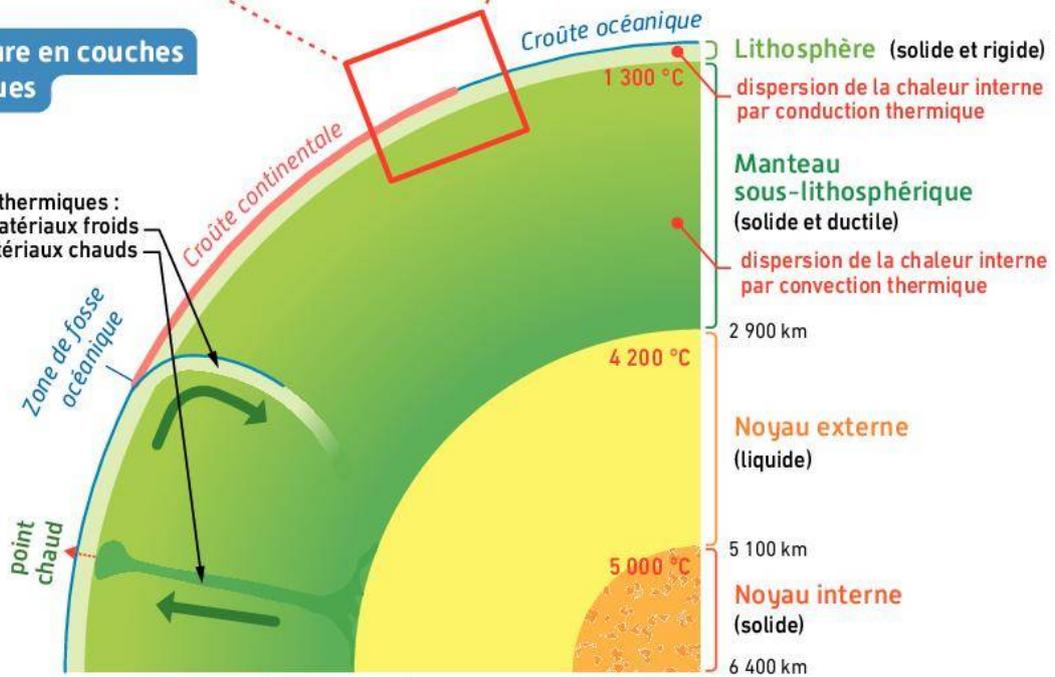


Un contraste continents océans



Une structure en couches concentriques

Hétérogénéités thermiques :
 - descente de matériaux froids
 - montée de matériaux chauds



Comportement des ondes sismiques

- Augmentation progressive de Vp et Vs
- Diminution brutale de Vp
- Disparition des ondes S
- Augmentation brutale de Vp
- Retour des ondes S

La mobilité horizontale des plaques lithosphériques



La surface de notre planète est découpée en un ensemble de **plaques lithosphériques** peu déformables, mais mobiles les unes par rapport aux autres (14 plaques principales, une quarantaine de microplaques). Cette mobilité horizontale est l'expression d'une dynamique plus profonde, qui affecte le manteau sous-lithosphérique. Plusieurs méthodes permettent de préciser et de quantifier les mouvements de ces plaques.

1 La géodésie spatiale : une mesure des mouvements actuels des plaques

Les signaux envoyés vers la surface par de nombreux **satellites géodésiques** en orbite autour de la Terre permettent de connaître le positionnement de balises situées à la surface des plaques lithosphériques.

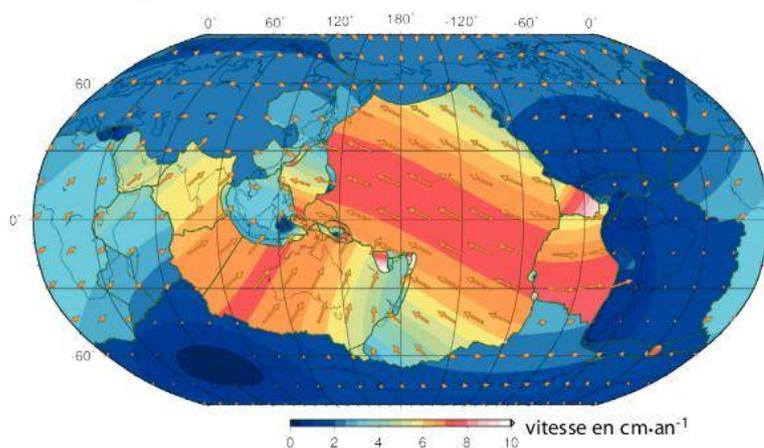
Leur longitude, latitude et altitude sont mesurées en continu avec une précision inférieure au millimètre, ce qui permet de calculer des vitesses de **déplacement absolu**, par rapport au repère fixe des méridiens et parallèles terrestres.

Le mouvement des plaques, les unes par rapport aux autres, détermine leurs **déplacements relatifs**.

Les frontières de deux plaques adjacentes peuvent ainsi être animées de mouvements :

- de **divergence** (éloignement de deux plaques) au niveau des **dorsales** ;
- de **convergence** (rapprochement de deux plaques) au niveau des zones de **subduction** et au niveau des zones de **collision** continentale.

Notons qu'il existe aussi des mouvements de coulissage (glissement horizontal de deux plaques l'une contre l'autre).



■ Vitesse des plaques lithosphériques mesurée par géodésie. (carte centrée sur le Pacifique.)

2

Des indices géologiques du déplacement des plaques lithosphériques

L'apport des anomalies magnétiques des fonds océaniques

Certaines roches magmatiques comme les basaltes peuvent conserver les caractéristiques du champ magnétique terrestre au moment de leur formation. À l'aide de magnétomètres très sensibles, on peut retrouver dans un échantillon de roche la « trace » de ce champ magnétique ancien (ou champ paléomagnétique).

L'étude de roches variées a ainsi montré que la polarité du champ magnétique a subi au cours des temps géologiques de nombreuses inversions. À certaines époques, appelées périodes inverses, les pôles magnétiques Nord et Sud étaient inversés par rapport à la situation actuelle. Ces changements de polarité sont parfaitement documentés et ont pu être datés avec précision en domaine continental, ce qui a permis de construire un « calendrier » des inversions magnétiques. Les relevés effectués au niveau du plancher océanique basaltique révèlent des **anomalies du champ magnétique** : selon les endroits, son intensité est soit plus grande que la valeur attendue (anomalie positive), soit plus faible (anomalie négative). Ces anomalies dessinent un profil magnétique en « peau de zèbre » avec des bandes de largeur variable, grossièrement parallèles et symétriques par rapport à l'axe de la dorsale. La mise en relation du profil magnétique du plancher océanique avec le calendrier des inversions magnétiques a permis de dater indirectement les basaltes du plancher océanique et de montrer que les basaltes sont d'autant plus vieux qu'on s'éloigne de part et d'autre de l'axe de la dorsale.

Cette répartition des âges prouve que l'**expansion océanique** s'effectue à partir de l'axe des dorsales. De nouveaux matériaux rocheux s'y forment, puis s'éloignent latéralement, de part et d'autre de cet axe. La connaissance précise de l'âge des basaltes permet alors de calculer la vitesse de l'expansion océanique (en $\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$) et donc la vitesse de divergence des plaques.

La vitesse d'expansion de l'océan Atlantique Nord lors des 2 derniers millions d'années est d'environ $4 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$ soit une divergence de $4 \text{ cm}\cdot\text{an}^{-1}$ des plaques nord-américaine et eurasiatique.

► L'apport des forages océaniques

De nombreux forages profonds réalisés dans les océans ont confirmé l'expansion océanique et la divergence des plaques au niveau de la dorsale. Les sédiments les plus profonds ont le même âge que les basaltes qu'ils recouvrent. Plus on s'éloigne de la dorsale, plus les sédiments sont épais et plus les couches au contact des basaltes sont anciennes. Par exemple, dans l'océan Atlantique Nord, la croûte océanique la plus ancienne (datée du Jurassique, soit -175 Ma environ) se trouve proche des continents américain et européen ; en se rapprochant de la dorsale, les basaltes sont de plus en plus récents.

Connaissant ainsi la répartition géographique de l'âge des basaltes de la croûte océanique, on peut calculer la vitesse de divergence des plaques. Cette vitesse est variable d'une dorsale à une autre (de 2 à 3 cm·an⁻¹ pour les dorsales les plus lentes, jusqu'à 16 cm·an⁻¹ pour les plus rapides).

► L'apport des volcans de point chaud

Il existe sur notre planète plusieurs grands alignements d'édifices volcaniques inactifs, à l'extrémité desquels se situent des volcans actifs. Ces volcans sont qualifiés d'« **intraplaques** », car dans la plupart des cas ils sont situés loin d'une frontière de plaques. Dans un alignement, les volcans sont d'autant plus vieux qu'ils sont éloignés du volcan actif.

Ces alignements remarquables proviennent de l'activité d'un **point chaud**, région fixe du manteau profond qui envoie vers la surface un panache de matériel chaud ; des magmas issus de ce manteau anormalement chaud perforent épisodiquement la plaque lithosphérique située au-dessus du point chaud.

Ces points chauds constituent donc des **repères fixes**. La datation des édifices volcaniques qu'ils engendrent et la mesure des distances séparant ces volcans permettent de calculer les vitesses et de connaître les directions de déplacement des plaques. Ainsi, les alignements volcaniques situés dans l'océan Pacifique ont permis de reconstituer les mouvements de cette plaque au cours des 65 derniers millions d'années.

De -65 Ma à -44 Ma, la plaque s'est déplacée vers le nord, créant ainsi toute la chaîne volcanique des îles Empereur, puis la plaque a changé de direction de -44 Ma à aujourd'hui. Elle se dirige à présent vers le nord-ouest avec une vitesse d'environ 8,5 cm·an⁻¹, Hawaï étant le volcan actif de cet alignement.

3

Les marqueurs des zones de divergence et des zones de convergence

Les frontières des plaques en convergence et celles des plaques en divergence présentent des marqueurs géologiques différents, qui permettent de les caractériser.

► Des marqueurs thermiques

Le **flux géothermique** mesuré en surface correspond à la dissipation de la chaleur interne du globe. Sa valeur moyenne est de 87 mW·m⁻². Cependant, le flux géothermique présente des variations importantes selon les régions (il est en moyenne plus élevé en domaine océanique qu'en domaine continental) et selon les contextes géodynamiques.

Les dorsales présentent un flux thermique plus élevé que la moyenne. Cette anomalie thermique positive est liée à la remontée asthénosphérique dans l'axe des dorsales et à la présence de magma à l'origine de la croûte océanique.

Les zones de subduction présentent un flux thermique très contrasté : à l'aplomb des fosses océaniques, le flux thermique est plus faible que la moyenne. Cette anomalie négative correspond au plongement de la plaque océanique froide dans l'asthénosphère. À l'inverse, au niveau de l'arc volcanique, le flux thermique est plus élevé, du fait de la présence de magmas au sein de la croûte.

► Des marqueurs sismiques

Les zones de subduction présentent une répartition caractéristique des foyers des séismes. Les foyers sismiques sont de plus en plus profonds en allant de la fosse vers l'arc volcanique, pouvant atteindre une profondeur de 700 km.

Au niveau d'une dorsale et des chaînes de montagnes, les foyers des séismes restent superficiels (jusqu'à 50 km). Ils sont très dispersés dans le cas des chaînes de montagnes, et en revanche, localisés très près de l'axe des dorsales.

► Des marqueurs pétrologiques

Les dorsales fabriquent dans leur axe des roches magmatiques qui s'intègrent à la croûte en formation (zone d'expansion océanique) : en profondeur, des gabbros, **roches plutoniques** à la texture grenue, et en surface des basaltes, **roches volcaniques** à la texture microlitique. La couleur sombre de ces roches magmatiques témoigne de leur teneur en silice relativement faible (SiO₂ entre 45 et 52 %).

Les zones de subduction produisent des roches magmatiques aux teintes variables, plus claires que celles de la croûte océanique, car plus riches en silice (SiO₂ > 53 %). En profondeur se forment des roches plutoniques (texture grenue) comme les diorites ou des granites ; elles s'intègrent à la croûte continentale. En surface, le volcanisme produit des roches à la texture microlitique, comme l'andésite et la rhyolite.

Des magmas peuvent également se former au sein de la croûte continentale dans les zones de collision. Dans ce contexte, la teneur en silice est souvent supérieure à 66 %. Il se forme alors principalement des roches claires, plutoniques, de la famille du granite.

À retenir

● La géodésie spatiale : une mesure des mouvements actuels des plaques

La lithosphère terrestre est découpée en plaques animées de mouvements. Le mouvement des plaques peut être décrit et quantifié par différentes méthodes.

Les **mesures géodésiques** réalisées permettent de détecter les **mouvements actuels** et de calculer des vitesses de déplacement des plaques avec une grande précision. Ces mesures permettent de caractériser les **déplacements absolus** et les **déplacements relatifs** au niveau des **frontières divergentes et convergentes**.

● Des indices géologiques du déplacement des plaques lithosphériques

En domaine océanique, la répartition symétrique des **anomalies magnétiques** de part et d'autre de l'axe de la dorsale témoigne de l'**expansion océanique** qui s'y déroule. La datation de ces bandes d'anomalies magnétiques permet de calculer des **vitesse de divergence** des deux plaques lithosphériques concernées.

Les **forages océaniques** profonds permettent d'avoir accès aux roches de la croûte océanique (basaltes). À mesure que l'on s'éloigne de la dorsale, les sédiments au contact du basalte sont **de plus en plus épais et âgés** ; cela confirme l'expansion océanique et la divergence des plaques, et permet d'en calculer la vitesse.

Le **volcanisme intraplaque** génère des **alignements** de volcans lorsque la plaque se déplace au-dessus du **point chaud**, toujours fixe. L'orientation des alignements et la datation des édifices volcaniques permettent de décrire les déplacements de la plaque, et d'en calculer la vitesse.

● Les marqueurs des zones de divergence et des zones de convergence

Les **frontières divergentes** présentent des **séismes superficiels**, un **flux thermique élevé** et sont à l'origine des **roches magmatiques sombres** de la croûte océanique : basaltes et gabbros.

Les frontières convergentes en **subduction** sont le siège de **séismes profonds** ; le **flux thermique est très contrasté** : faible au niveau de la fosse, fort localement au niveau de l'arc volcanique. Elles produisent des **roches magmatiques plus claires**, telles que les diorites et les andésites.

Au niveau des frontières convergentes en **collision**, les **séismes sont superficiels**, le **flux thermique est faible**. Elles produisent des **roches magmatiques claires** : des granites.

Mots-clés

Anomalies magnétiques ● Collision ● Convergence ● Divergence ● Dorsale ● Expansion océanique
● Flux géothermique ● Géodésie ● Plaques lithosphériques ● Roches plutoniques ● Roches volcaniques
● Subduction ● Volcanisme intraplaque

La mobilité horizontale des plaques lithosphériques

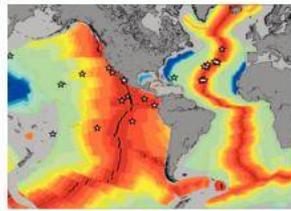
Mesures géodésiques



Mesures géodésiques

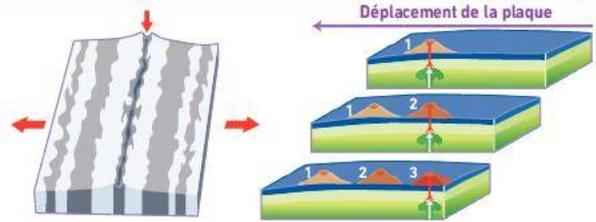
Déplacement des plaques lithosphériques

Mesures géologiques



Forages océaniques

Âge du fond des océans et expansion océanique



Enregistrement du paléomagnétisme

Expansion océanique

Déplacement de la plaque

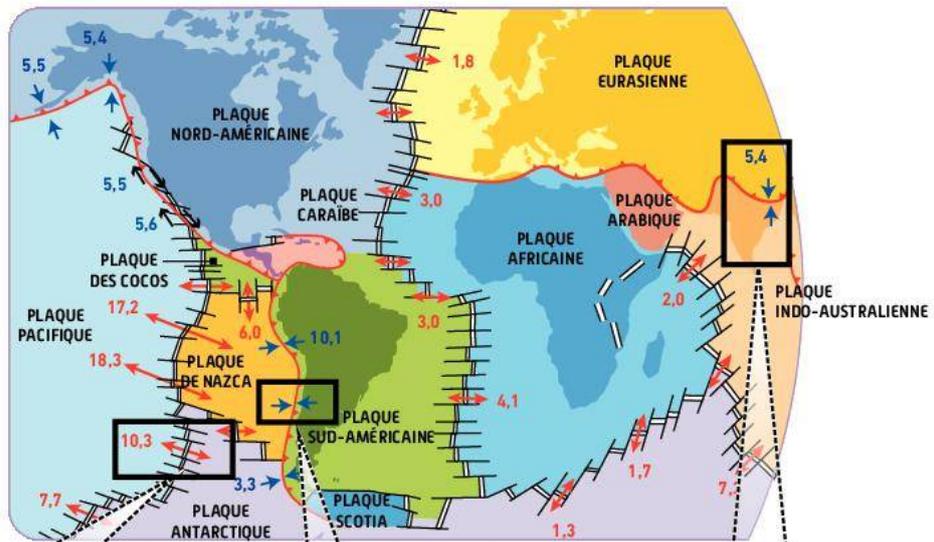
Points chauds

Déplacement des plaques lithosphériques

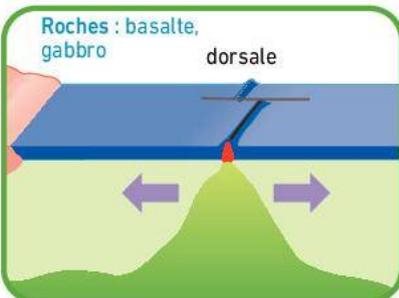
Déplacements relatifs au niveau des frontières de plaques

- frontière divergente
- ←← frontière convergente
- ↔ coulissement

17,2 vitesse de déplacement (cm-an⁻¹)



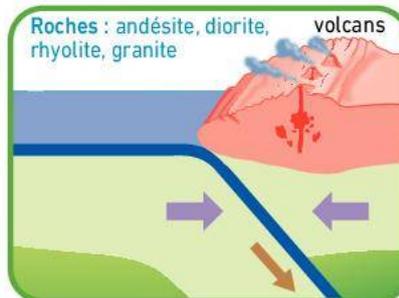
Zone de divergence EXPANSION



- Flux thermique fort
- Séismes superficiels

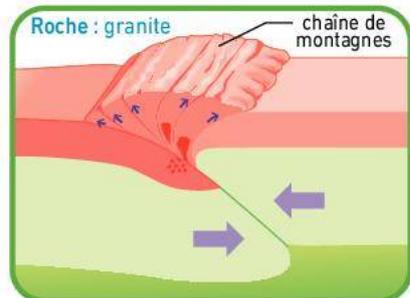
- manteau lithosphérique
- manteau asthénosphérique
- croûte océanique
- croûte continentale
- magma

Zone de convergence SUBDUCTION



- Flux thermique :
 - faible au niveau de la plaque plongeante ;
 - fort au niveau de l'arc volcanique
- Séismes superficiels, intermédiaires et profonds

Zone de convergence COLLISION



- Flux thermique faible
- Séismes superficiels

- ↔ divergence
- ←→ convergence
- subduction

La dynamique des zones de divergence



1 La divergence océanique

L'étude du relief des fonds océaniques montre que les dorsales sont des bombements de grande amplitude des fonds marins. Parfois larges de plusieurs milliers de kilomètres, elles forment un réseau long de 60 000 km, qui domine les plaines abyssales en moyenne à 2 500 m de profondeur (voir à ce sujet la carte p. 412). Les dorsales sont caractérisées par des **activités sismiques** (séismes peu profonds), **tectoniques** (nombreuses failles normales dues à l'extension provoquée par la divergence), **magmatiques** (21 km³ de roches volcaniques et plutoniques produites chaque année) et **hydrothermales** (fumeurs noirs).

2 Le magmatisme de dorsale

► Fusion partielle des péridotites

La tomographie sismique explique le flux géothermique anormalement élevé au niveau des dorsales, en mettant en évidence à leur aplomb une **remontée asthénosphérique**. Les péridotites y sont soumises à des mouvements de convection ascendants qui les font remonter et provoquent leur **décompression**. En revanche, ce mouvement se fait pratiquement sans échanges thermiques avec l'environnement, donc **sans baisse significative de la température** des roches.

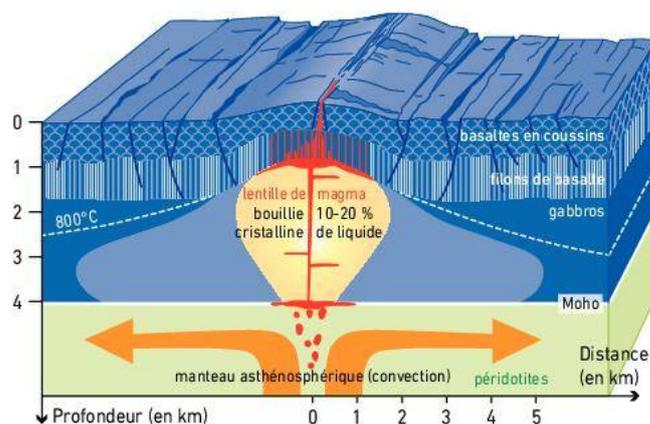
L'étude du comportement de la péridotite dans la presse à enclume de diamant permet de tracer son **solidus** (courbe de début de fusion) et son **liquidus** (courbe de fin de fusion). Entre ces deux courbes, la péridotite est partiellement fondue. Si on reporte dans ce diagramme de phase la courbe représentant le **géotherme typique d'une dorsale**, on constate que celui-ci **recoupe la courbe de solidus** entre 100 et 20 km de profondeur environ. Les péridotites situées sous l'axe de la dorsale peuvent donc produire des magmas. Il s'agit toujours d'une **fusion partielle**, qui ne concerne pas plus de 20 % de la péridotite. Le magma (puis les roches qui se forment suite à sa cristallisation) n'a pas la même composition chimique et minéralogique que la péridotite. En effet, certains éléments chimiques (comme la silice, le calcium, etc.) passent plus facilement dans la phase liquide que d'autres (comme le fer ou le magnésium, par exemple).

Les gouttelettes de magma issues de cette fusion partielle, moins denses que la roche solide, remontent et s'accumulent dans une zone située entre 2 et 7 km sous l'axe de la dorsale. Là s'accumule un liquide épais où se forment des cristaux : c'est la **chambre magmatique**.

► Mise en place de la croûte océanique

Au sein de la chambre magmatique des courants brassent cette bouillie cristalline. Le contact des parois, un peu moins chaudes que le cœur de la chambre, favorise la lente cristallisation du magma. La roche qui se forme ainsi **en profondeur** (roche **plutonique**) est **grenue**, c'est-à-dire entièrement constituée de gros cristaux jointifs. Dans ce cas, pyroxène et plagioclase prédominent : il s'agit d'un **gabbro**.

La divergence des plaques lithosphériques provoque l'**extension de la dorsale**, et plus particulièrement de son axe. Des **failles normales** se forment dans le toit de la chambre magmatique. Du magma s'y infiltre, formant des filons verticaux atteignant la surface des roches. Le refroidissement de ce magma à proximité ou au contact de l'eau de mer très froide est rapide : la roche qui se forme par arrivée du magma **en surface** (roche **volcanique**) est **microlitique**, c'est-à-dire constituée d'une pâte minérale qui n'a pas eu le temps de cristalliser et de cristaux, pour la plupart microscopiques : des microlites. Comme dans le gabbro, pyroxène et plagioclase prédominent : la roche qui cristallise dans les filons ou sous forme de laves en coussins au contact direct de l'eau de mer est un **basalte**.



► Des magmas mantelliques à l'origine de la croûte océanique.

3 La diversité des dorsales

Le magmatisme qui vient d'être décrit concerne les dorsales dites « rapides », c'est-à-dire celles qui sont situées aux frontières de plaques où la vitesse de divergence est au moins de 9 cm·an⁻¹. Les dorsales moins actives ont des fonctionnements différents.

► Des dorsales productrices de croûte

Les **dorsales rapides** présentent un bombement large de plusieurs milliers de kilomètres. La vallée axiale est peu marquée, voire absente. Ces caractéristiques sont dues à la présence d'un manteau très chaud sous de la croûte. **La production de magma y est permanente**, et suffisamment forte pour que l'essentiel de la création de nouvelle surface océanique s'y fasse par **accrétion**, c'est-à-dire par apport de nouvelles roches magmatiques. Ces dorsales présentent une croûte océanique continue, formée d'environ 2 km de basalte en coussins et en filons, qui reposent sur 3 à 5 km de gabbros.

Les dorsales rapides, comme la dorsale Est-Pacifique, produisent donc **une croûte océanique épaisse** de 5 à 7 km, principalement par **magmatisme**.

► Des dorsales qui produisent peu ou pas de croûte

L'étude de la dorsale Atlantique a révélé des caractéristiques différentes de celles des dorsales rapides. Le bombement est nettement plus étroit. Au centre se trouve une **vallée axiale** (le rift) produite par le fonctionnement de nombreuses **failles normales**, ainsi que des **failles de détachement**, qui mettent des péridotites à l'affleurement. Ces caractéristiques sont à mettre en relation avec la présence d'un manteau nettement moins chaud que sous une dorsale rapide. Il n'y a parfois pas de chambre magmatique, ou plusieurs petites chambres magmatiques qui ne fonctionnent que de façon intermittente. Très peu de magma étant produit, très peu de basaltes et de gabbros sont mis en place : **la croûte océanique est peu épaisse, discontinue, voire totalement absente**. Les roches retrouvées à l'affleurement sont pour partie au moins des péridotites serpentinisées, c'est-à-dire fortement hydratées et altérées par une circulation hydrothermale importante.

Le magmatisme ne joue donc qu'un rôle secondaire dans le cas des dorsales lentes, l'essentiel de la divergence étant assumé par des **phénomènes tectoniques** : failles normales et failles de détachement.

Notons qu'il existe tous les intermédiaires entre les deux modèles de dorsale que nous venons de décrire.

4

Les transformations de la lithosphère océanique

► Des changements chimiques et minéralogiques

Dès sa formation au niveau de la dorsale, la nouvelle croûte océanique et les roches du manteau superficiel sont traversées par une eau froide qui s'infiltre grâce aux très nombreuses failles. L'eau se réchauffe au contact des roches profondes. Sa densité diminue et elle ressort par des cheminées hydrothermales, les fumeurs noirs, à des températures comprises entre 300 et 400 °C.

L'équivalent de la moitié de l'eau de l'Atlantique passerait ainsi par la **circulation hydrothermale** des dorsales chaque année.

Des réactions chimiques ont lieu entre l'eau et les minéraux : l'eau se charge en éléments métalliques, tandis que des molécules d'eau pénètrent au sein même des cristaux. Les roches subissent de ce fait des transformations chimiques et minéralogiques qualifiées d'**hydrothermalisme**.

Au cours de cette circulation, les roches se refroidissent. Cette baisse de température déstabilise les associations minérales présentes initialement. Ainsi, les cristaux de pyroxène et de plagioclase réagissent entre eux et avec l'eau dès que la température s'abaisse sous 700 °C. Il se forme alors un nouveau minéral hydraté : la hornblende. Lorsque la température descend sous 500 °C, ce minéral réagit à son tour avec d'autres, et de nouveaux minéraux, encore plus hydratés, apparaissent, comme la chlorite et l'actinote.

Les roches de la lithosphère subissent donc dès leur mise en place sur la dorsale un **métamorphisme**, c'est-à-dire des transformations minérales à l'état solide, dues à leur **hydratation** et à des changements d'environnement physique (pression, température). En l'occurrence, les roches passent dans le **faciès « schistes verts »**, environnement caractérisé par une pression et une température basses. On appelle metabasaltes, métagabbros et métapéridotites du faciès schistes verts les **roches métamorphiques** ainsi formées.

► Des changements physiques

Les circulations hydrothermales refroidissent rapidement les roches sur une dizaine de kilomètres d'épaisseur. Lorsque la température du manteau superficiel passe sous 1 300 °C, la péridotite devient rigide : **un manteau lithosphérique se forme**. Le refroidissement se poursuivant, d'abord par hydrothermalisme, puis par conduction thermique, l'isotherme 1 300 °C (qui correspond à la limite lithosphère/asthénosphère) se situe de plus en plus profondément : **le manteau lithosphérique s'épaissit** donc au cours du vieillissement de la lithosphère océanique. Après 25 Ma, il a plus de 40 km d'épaisseur. À l'âge de 100 Ma, son épaisseur dépasse 100 km.

Le vieillissement s'accompagne aussi d'une augmentation de la densité de la lithosphère. En effet, les roches métamorphiques qui se forment au cours du refroidissement sont plus denses que les roches magmatiques initiales. **Le métamorphisme « alourdit » la croûte** et l'ensemble de la lithosphère océanique. De plus, si la croûte conserve son épaisseur initiale, l'épaississement du manteau lithosphérique (densité 3,3) augmente peu à peu sa contribution à la densité moyenne de la lithosphère. À partir d'un certain âge, celle-ci dépasse la densité du manteau asthénosphérique ductile ($d = 3,25$) sur lequel la lithosphère océanique rigide repose en équilibre dynamique. C'est pourquoi l'océan devient **de plus en plus profond** à mesure que l'on s'éloigne de l'axe de la dorsale en direction des plaines abyssales.

À retenir

La divergence océanique

Les dorsales sont des bombements larges de plusieurs milliers de kilomètres, formant un réseau long de 60 000 km, qui domine les plaines abyssales, en moyenne à 2 500 m de profondeur. Elles sont caractérisées par une forte **activité tectonique** (failles normales dues à l'extension provoquée par la divergence), **magmatique** (production de basalte et de gabbro) et **hydrothermale** (fumeurs noirs).

Le magmatisme de dorsale

Une **remontée asthénosphérique** se produit sous les dorsales à cause de mouvements ascendants du manteau, anormalement chaud. Vers 70 km de profondeur, la péridotite décompressée et encore très chaude subit une **fusion partielle**. Certains minéraux fondent davantage que d'autres, si bien que le magma formé n'a pas la même composition que celle de la péridotite. Les gouttelettes de magma basaltique remontent et s'accumulent près de la surface dans une **chambre magmatique**. Le refroidissement lent de ce magma en profondeur produit des **roches plutoniques, donc grenues** (gabbros). Son refroidissement rapide en surface produit des **roches volcaniques, donc microlitiques** (basaltes). Ces roches magmatiques forment la nouvelle croûte océanique.

La diversité des dorsales

La présence d'un manteau très chaud sous certaines dorsales permet une **production de magma permanente et abondante**. La création de nouvelles surfaces océaniques est alors rapide et se fait surtout par **magmatisme**. Ces **dorsales rapides** présentent une croûte océanique continue, constituée de basaltes et de gabbros. Là où le manteau est nettement moins chaud, l'activité magmatique est **faible et intermittente**. La création de nouvelles surfaces océaniques est lente, la croûte océanique est **peu épaisse, discontinue, voire totalement absente**. L'essentiel de la divergence est pour ces **dorsales lentes** assumé par **des phénomènes tectoniques** : **failles normales** et failles de détachement, qui portent des péridotites hydratées à l'affleurement.

Les transformations de la lithosphère océanique

La circulation d'eau dans la jeune lithosphère océanique entraîne un **hydrothermalisme**, c'est-à-dire une **hydratation** et une transformation chimique des minéraux qui la constituent. Le **refroidissement** déstabilise les associations minérales initiales. De nouveaux minéraux se forment, par **métamorphisme**. Ce refroidissement provoque aussi l'enfoncement de l'isotherme 1 300 °C (limite lithosphère/asthénosphère) et donc l'**épaississement** de la lithosphère océanique. L'ensemble de ces changements a pour conséquence l'**augmentation de densité** de la lithosphère, qui s'enfonce peu à peu dans l'asthénosphère sous-jacente.

Mots-clés

Densité • Dorsale • Faille normale • Fusion partielle • Hydrothermalisme • Magmatisme • Métamorphisme • Remontée asthénosphérique

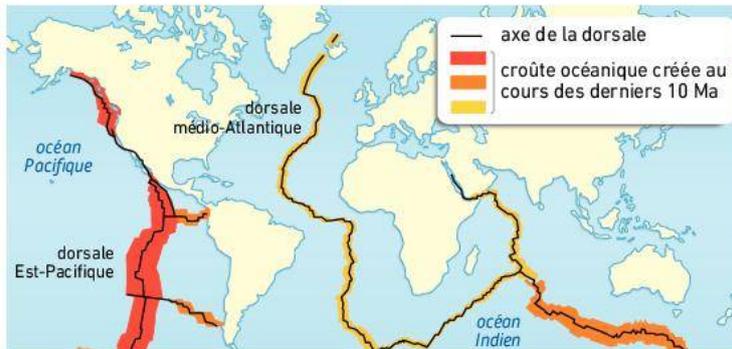
Schéma bilan

La dynamique des zones de divergence

Des dorsales et des lithosphères océaniques diversifiées

Dorsale rapide

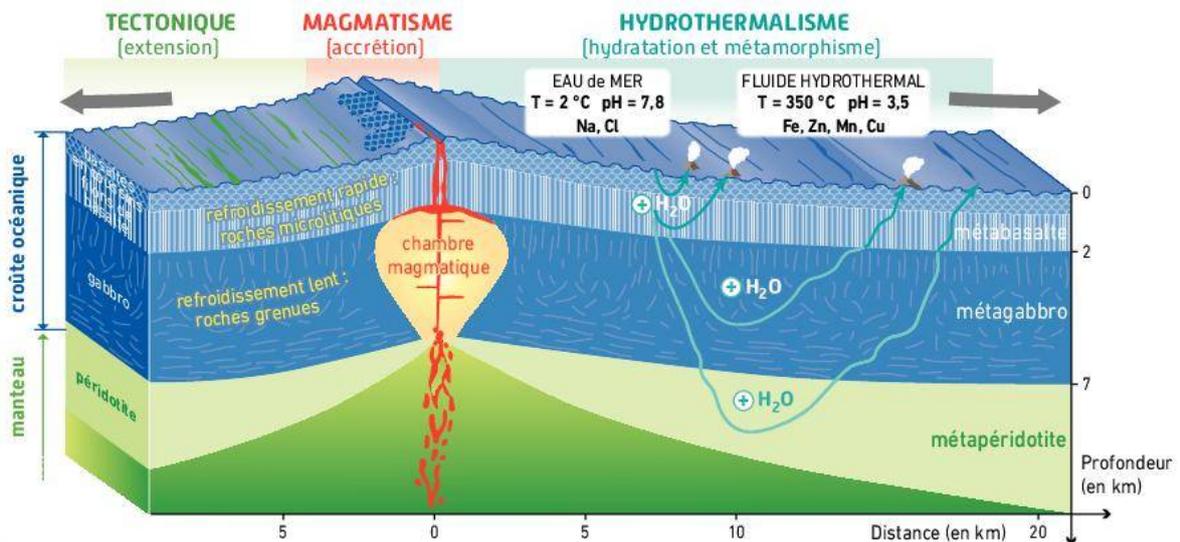
manteau très chaud
 ▼
 production de grandes quantités de magma
 ▼
 croûte océanique continue



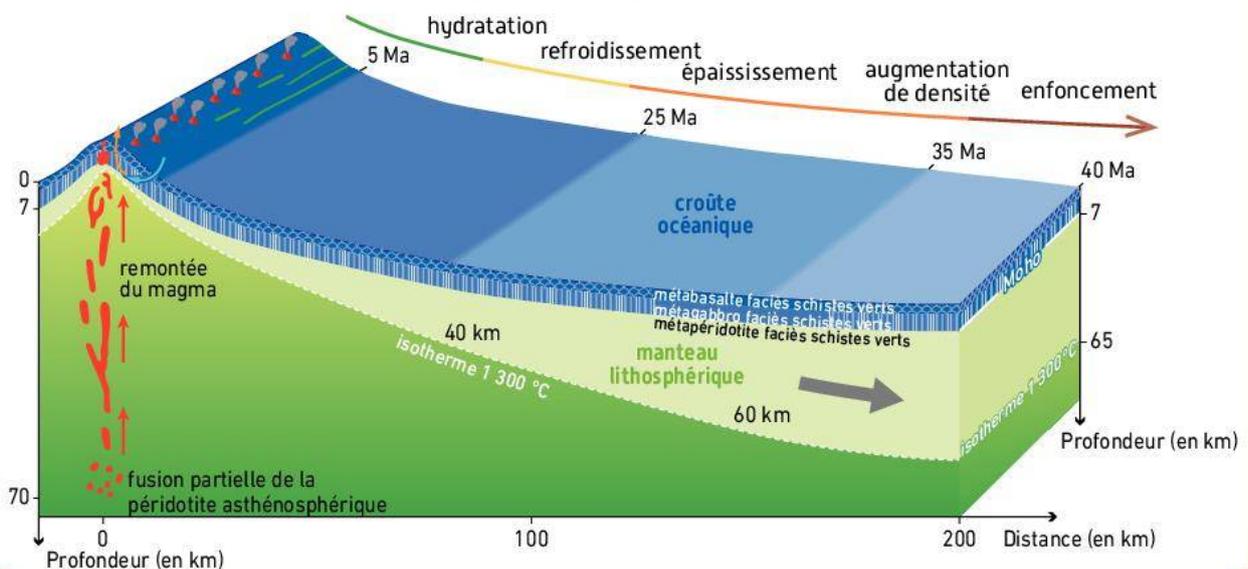
Dorsale lente

manteau moins chaud
 ▼
 production de faibles quantités de magma
 ▼
 croûte océanique discontinue ou absente

Mise en place de la lithosphère océanique



Évolution de la lithosphère océanique



La dynamique des zones de convergence



Au niveau des dorsales océaniques, les plaques sont divergentes et de nouvelles portions de lithosphère se forment. Par ailleurs, les fonds océaniques les plus anciens, situés en bordure des océans, n'ont pas plus de 200 millions d'années. Ceci suggère que la lithosphère océanique âgée se résorbe au niveau de zones de convergence, par le phénomène de subduction. D'autres zones de convergence voient s'affronter des plaques lithosphériques continentales, cette convergence étant marquée par la formation de chaînes de montagnes. On précisera ici les marqueurs et les mécanismes des phénomènes de subduction et de collision continentale.

1

Convergence lithosphérique et subduction océanique

Des marqueurs de la subduction

Une **zone de subduction** est une frontière de plaques convergentes, au niveau de laquelle une plaque lithosphérique océanique plonge obliquement dans l'asthénosphère sous une autre plaque, océanique ou continentale. La première est qualifiée de **plaque subduite**, la seconde de **plaque chevauchante**.

Le relief de ces zones est asymétrique : en partant de la plaque subduite, on trouve souvent une **fosse océanique** profonde de plusieurs kilomètres, puis, sur la plaque chevauchante, des reliefs positifs formant un **alignement d'îles** volcaniques ou une **cordillère** parallèle à la ligne de côte, également parsemée de **volcans**.

Les nombreux séismes qui se produisent dans ces zones sont remarquables par la répartition de leurs foyers : les séismes superficiels, souvent violents et dévastateurs, ont leurs foyers principalement localisés dans la croûte de la plaque chevauchante. D'autres séismes dessinent un « plan incliné » qui s'enfonce jusqu'à 700 km de profondeur. L'inclinaison de ce plan, nommé **plan de Wadati-Benioff**, est variable selon les zones de subduction. La distribution de ces foyers sismiques caractérise le plongement de la lithosphère océanique rigide dans l'asthénosphère ductile.

Les anomalies du flux géothermique constatées précédemment à la surface des zones de subduction (chapitre 2) correspondent en profondeur avec les **anomalies thermiques** révélées par la tomographie sismique : les isothermes (lignes d'égale température) adoptent une forme remarquable : ils plongent obliquement sous la fosse océanique, confirmant la présence d'un matériau froid (la lithosphère océanique) s'enfonçant dans un matériau chaud (l'asthénosphère).

Le magmatisme des zones de subduction

L'activité volcanique des zones de subduction est intense. C'est le cas des rives de l'océan Pacifique (la « ceinture de feu ») ou encore des Petites Antilles. Les nombreux édifices volcaniques présents sur les îles ou dans la cordillère connaissent des **éruptions de type explosif** particulièrement dangereuses : elles s'accompagnent souvent de nuées ardentes dévastatrices.

Ceci s'explique par la richesse en silice des magmas formés dans ce contexte. Cette caractéristique rend en effet le magma visqueux, ralentit sa remontée vers la surface et empêche son dégazage progressif. Lorsqu'il atteint la surface, des **roches volcaniques** se forment, comme l'andésite ou la rhyolite. Mais la plus grande partie du magma refroidit et cristallise dans les profondeurs de la croûte, formant des **roches plutoniques** de type granitique (granite, diorite, etc.). La **diversité de ces roches magmatiques** s'explique aussi par la cristallisation fractionnée, qui enrichit le magma en silice à mesure qu'il remonte et refroidit, ainsi que par la contamination des magmas par les roches de la croûte environnante.

Malgré la diversité de ces roches, leur composition chimique apparentée indique qu'elles se forment à partir d'un **même type de magma, riche en eau**.

En effet, certains minéraux, comme les amphiboles et les micas (biotite, muscovite), contiennent dans leur formule chimique des groupements hydroxyles (OH) révélateurs de l'hydratation du magma.

L'origine des magmas

Les magmas des zones de subduction sont issus de la **fusion partielle** du **coin de manteau** situé sous la plaque chevauchante. Pourtant, les températures qui règnent dans ces péridotites ne devraient pas permettre leur fusion partielle, à moins qu'elles soient hydratées. Or, la croûte océanique qui entre en subduction est très hydratée : les basaltes et gabbros qui la composent ont été transformés par les circulations hydrothermales et sont devenus des metabasaltes et métagabbros du faciès « schiste vert », riches en **minéraux hydroxylés**.

En s'enfonçant dans l'asthénosphère plus chaude, la lithosphère océanique se réchauffe lentement tout en étant soumise à une pression croissante. Ce changement de faciès déstabilise les minéraux de la plaque plongeante : ils réagissent entre eux (**réactions métamorphiques**, à l'état solide) et de nouveaux minéraux, caractéristiques des **faciès schistes bleus** puis **éclogites**, se forment.

Ces **nouveaux minéraux** (glaucophane, grenat, omphacite) sont **peu ou pas hydroxylés**. Ainsi, ces transformations métamorphiques s'accompagnent d'une **déshydratation de la croûte océanique** en subduction. L'eau libérée remonte et provoque l'**hydratation des péridotites du coin de manteau** de la plaque chevauchante. Cela rend possible leur **fusion partielle**, à l'origine des **magmas**.

► Le mécanisme de la subduction

La densité moyenne de la lithosphère océanique augmente avec son âge, comme nous avons pu l'établir au chapitre précédent. Après 15 à 20 millions d'années environ, elle devient plus dense que le manteau asthénosphérique. Ce **déséquilibre gravitaire** n'entraîne néanmoins pas une plongée immédiate dans l'asthénosphère : l'ensemble des matériaux mis en jeu sont à l'état solide, les différences de densité sont faibles, et la portion de lithosphère qui pourrait sombrer est solidaire du continent, beaucoup moins dense. Des accidents tectoniques liés aux mouvements des plaques sont nécessaires pour déclencher la subduction.

L'**augmentation de densité** est accentuée par les **transformations métamorphiques** qui affectent la croûte océanique lors de la subduction. En effet, la densité d'un métagabbro augmente lorsqu'il passe du faciès « schiste vert » à celui de « schiste bleu », puis d'« éclogite ».

► Subduction et convection mantellique

L'étude des forces qui agissent au niveau d'une plaque océanique montre que l'augmentation de densité est le **principal moteur de la subduction**. Ce faisant, le **panneau de lithosphère en subduction** tracte toute la lithosphère océanique située en surface, jusqu'à l'axe de la dorsale. Il provoque les **mouvements descendants de la convection** mantellique. Ceux-ci participent à leur tour à la mise en place des **mouvements ascendants** sous la dorsale. La subduction joue donc un **rôle essentiel dans l'expansion océanique**, et plus généralement dans le mouvement des plaques lithosphériques.

■ Paysage des Dolomites, dans les Alpes italiennes. Ces reliefs sont constitués de roches sédimentaires formées il y a 250 millions d'années dans l'océan Téthys, avant sa fermeture et la collision des plaques eurasienne et apulienne.



2 Convergence lithosphérique et collision continentale

La subduction peut entraîner la fermeture d'un océan et provoquer la collision des continents situés de part et d'autre. Les lithosphères continentales ayant des densités faibles par rapport à la lithosphère océanique et à l'asthénosphère, la subduction ne peut se poursuivre dans les mêmes conditions : la poursuite de la convergence modifie alors considérablement la géométrie des deux continents en collision : un **raccourcissement** se produit, compensé par un **épaississement**. Près de la surface, les déformations sont en général cassantes : on voit apparaître des **failles inverses**. Plus en profondeur, la chaleur permet des déformations plus souples, telles que les plis-failles et les **plis**. Ces déformations se superposent sur des kilomètres d'épaisseur, contribuant à créer des reliefs.

Des déformations de grande ampleur se produisent, de l'échelle kilométrique à l'échelle régionale. Les contraintes compressives peuvent ainsi déplacer sur des dizaines de kilomètres des formations rocheuses, décollées de leur contexte originel et charriées au-dessus d'autres roches, parfois plus récentes. On parle alors de **nappes de charriages**. L'ensemble de la croûte continentale peut aussi être affecté par des failles majeures, qui conduiront à un **empilement** d'écaïlles crustales. Si une partie de cette surépaisseur se retrouve dans les reliefs (4 800 m dans les Alpes, 8 800 m dans l'Himalaya), la majeure partie se retrouve en profondeur. Les images de sismique-réflexion montrent la présence de **racines crustales** : la croûte continentale sous les plus hautes chaînes de montagnes peut ainsi dépasser 100 km d'épaisseur. Parfois, une véritable subduction continentale entraîne une partie de la croûte, qui passe alors sous l'autre, le manteau lithosphérique accompagnant ce mouvement.

Au sein des écaïlles crustales, les **roches subissent un métamorphisme** lié à une augmentation de pression et de température. De nouveaux minéraux apparaissent, souvent orientés par les contraintes compressives. On obtient des roches foliées (alternance de lits clairs et sombres), schisteuses (structurées en feuillets parallèles), comme les micaschistes ou les gneiss.

Ces déformations se produisent pour la plupart à grande profondeur au sein de la chaîne de collision, mais le jeu de grandes failles et les phénomènes d'érosion peuvent porter ces roches à l'affleurement.

À retenir



Des marqueurs de la subduction

Les **zones de subduction** sont des frontières de plaques convergentes, au niveau desquelles une plaque lithosphérique océanique plonge obliquement dans l'asthénosphère sous une autre plaque, océanique ou continentale. Les nombreux **séismes** qui se produisent dans ces zones dessinent un **plan incliné** qui s'enfonce jusqu'à 700 km de profondeur, et qui témoigne du plongement de la **lithosphère océanique froide et rigide** dans l'**asthénosphère chaude et ductile**.

Le magmatisme des zones de subduction

Les nombreux volcans présents sur la plaque chevauchante sont de type **explosif**, car leur magma est riche en silice, ce qui le rend visqueux. Ce magma permet la formation de **roches volcaniques et plutoniques diversifiées**. Leur composition chimique indique cependant qu'elles se forment à partir d'un **même type de magma, riche en eau**.

L'origine des magmas

Les magmas des zones de subduction sont issus de la **fusion partielle** du **coin de manteau** de la plaque chevauchante. Cette fusion partielle est possible du fait de la **hydratation des péridotites**. L'eau présente dans ces péridotites provient de la **déshydratation des minéraux de la croûte en subduction**, sous l'effet de l'augmentation de pression et de température (réactions métamorphiques).

Le mécanisme de la subduction et l'origine de la convection mantellique

Le **déséquilibre gravitaire** dû au vieillissement de la lithosphère océanique peut déclencher l'entrée en subduction, à la faveur d'un accident tectonique de grande ampleur. L'**augmentation de densité**, accentuée par le métamorphisme qui se produit lors de la subduction, est le **principal moteur de la subduction**. Celle-ci est à l'origine des mouvements descendants de la **convection mantellique**, et indirectement des mouvements ascendants sous la dorsale, organisant ainsi les mouvements des plaques lithosphériques.

Convergence lithosphérique et collision continentale

Quand la lithosphère océanique est totalement résorbée, deux blocs continentaux, de densité égale, s'affrontent. La convergence s'accompagne alors d'intenses déformations à toutes les échelles. Les roches sont **plissées**, fracturées (**failles inverses**), **charriées** parfois sur des dizaines de kilomètres. De grandes failles traversent la croûte continentale, séparant des blocs qui se chevauchent les uns sur les autres. C'est par cet écaillage crustal que l'on explique la création de reliefs et la présence d'une **racine crustale**. Des déformations affectent aussi les roches et les minéraux qui les composent.

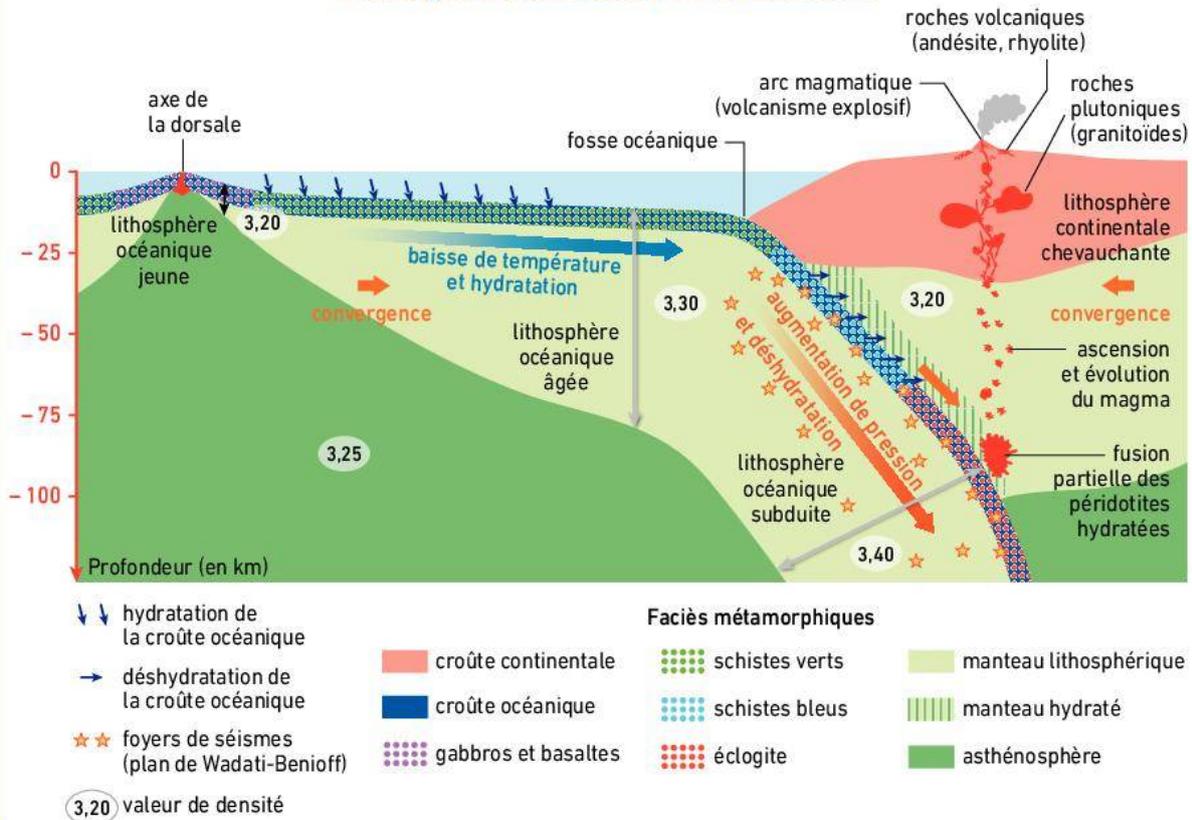
Mots-clés

Chevauchement ● Coin de manteau ● Faille inverse ● Massif plutonique ● Nappe de charriage ● Panneau en subduction ● Plaque chevauchante ● Pli ● Racine crustale ● Volcanisme explosif ● Zone de subduction

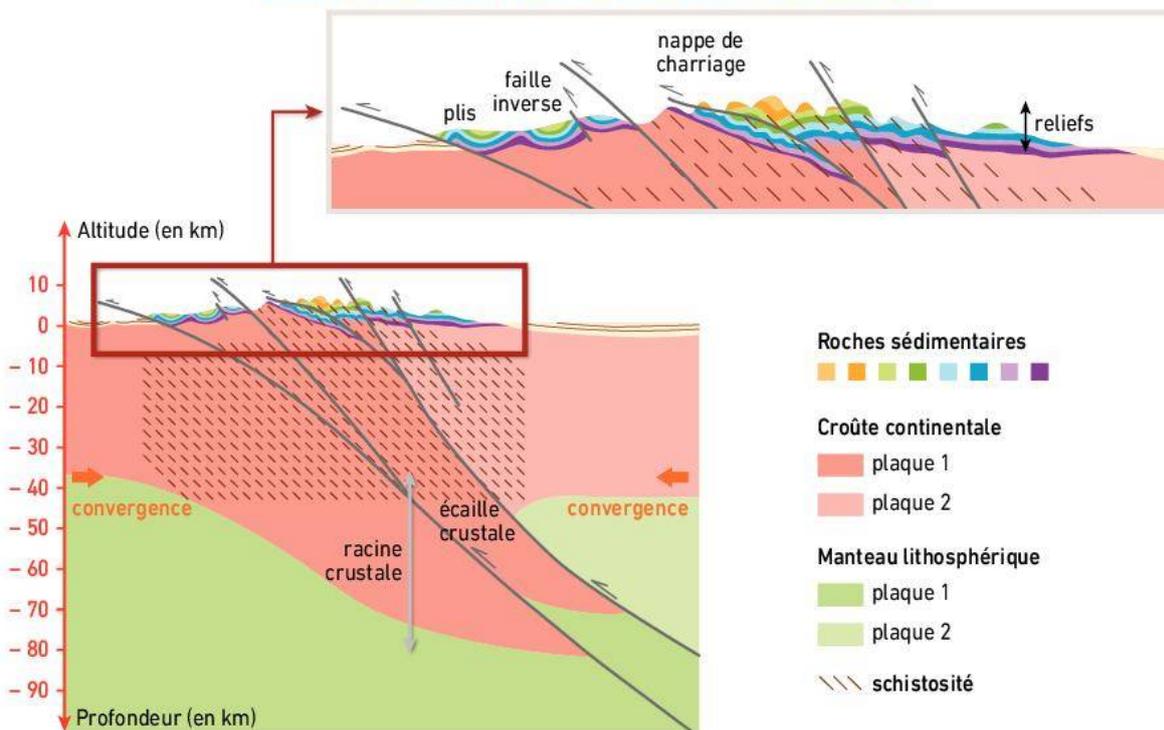
Schéma bilan

La dynamique des zones de convergence

Convergence lithosphérique et subduction



Convergence lithosphérique et collision continentale



La dynamique des écosystèmes



Un écosystème est un ensemble formé par un milieu physique, le **biotope**, et les êtres vivants qui l'occupent, associés en une communauté appelée **biocénose**. La préservation des écosystèmes passe par une bonne connaissance scientifique de leur fonctionnement. L'exemple des **écosystèmes forestiers** permet de comprendre leur organisation et leur dynamique. Les principes qui les régissent peuvent être étendus aux autres écosystèmes de la planète.

1

Structurations verticale et horizontale de la forêt

Les forêts se caractérisent par une forte **structuration verticale**. On peut facilement distinguer plusieurs niveaux au-dessus du sol : une strate de mousses et de champignons (quelques cm de haut) ; une strate herbacée composée d'herbes, de fougères, de jeunes germinations (jusqu'à 1 m) ; une strate arbustive (de 1 à 7 m) et une strate arborée (au-dessus de 7 m). Horizontalement, la forêt n'est pas homogène. On distingue des zones où dominent les grands arbres, d'autres où dominent les buissons, des clairières, des arbres morts (qui favorisent le développement de certaines espèces) ou encore les lisières, qui délimitent les bordures extérieures de la forêt.

La particularité de l'écosystème forestier est d'être dominé par les **arbres**. Ils structurent l'écosystème forestier, conditionnent son fonctionnement, sa dynamique et son équilibre. Les arbres modifient le biotope et les **paramètres abiotiques** et par conséquent influencent la répartition de la biocénose. La présence des arbres est responsable d'un microclimat au sein de la forêt. En effet, ils filtrent la lumière qui pénètre jusqu'au sol et régulent la température et l'humidité. De plus, dans une forêt tempérée caducifoliée (composée d'arbres perdant leurs feuilles en automne), les arbres participent au contraste des conditions saisonnières.

Certaines espèces moins tolérantes à l'ombre pourront se développer en lisière de forêt ou au début du printemps avant la pousse des feuilles des arbres. En revanche, les espèces tolérantes à l'ombre pourront se développer sous un couvert végétal dense.

2

Fonctionnement de l'écosystème forestier

Les interactions entre organismes

Les êtres vivants d'un écosystème sont sans cesse en interaction. On peut différencier les interactions qui ont des effets bénéfiques pour l'un des partenaires au détriment

de l'autre et les interactions qui ont des effets bénéfiques pour les deux partenaires. La diversité des interactions biotiques peut donc s'étudier à la lueur de leurs effets, négatifs ou positifs, sur les partenaires.

La **compétition** : elle peut se manifester entre des individus d'une même espèce ou d'espèces différentes, par exemple lorsque les individus exploitent **la même ressource** (la lumière, l'eau...) ou **le même espace**. Cette compétition a des effets sur la biodiversité de l'écosystème. Par exemple, la **compétition pour la lumière** peut provoquer une réduction du nombre de jeunes arbres ou une modification de la forme des arbres. Dans un écosystème forestier, cette compétition peut aboutir à un équilibre stable entre les espèces ou à l'élimination d'une espèce (par exemple au cours d'une succession végétale).

Le **parasitisme** : les êtres vivants **parasites** vivent aux dépens de leur hôte. Dans le cas des galles, certains insectes parasites déposent leurs pontes sur une zone de l'arbre qui, en réaction, produit une structure protectrice. Les larves se nourriront ensuite de ce végétal. Tout au long de leur développement, les parasites utilisent certaines ressources de leur hôte et les affaiblissent sans forcément provoquer leur mort.

La **prédation** : un prédateur est un organisme libre qui se nourrit aux dépens d'un autre. Cette définition inclut les animaux herbivores. Les effectifs des populations de prédateurs et de proies évoluent de manière dépendante, cyclique et décalée. C'est le cas par exemple entre les grands herbivores de la forêt et les strates herbacée et arbustive, qui subissent une pression d'herbivorie.

La **symbiose** : cette relation désigne une association durable à bénéfices réciproques entre êtres vivants. La majorité des plantes vivent en symbiose avec des champignons et/ou des bactéries. Les **mycorhizes**, qui sont des associations entre filaments de champignons et racines de végétaux, favorisent l'alimentation en eau et sels minéraux pour la plante qui, en échange, fournit des matières organiques aux champignons. Certaines bactéries symbiotiques facilitent l'assimilation de molécules azotées.

Les réseaux trophiques

Un **réseau trophique** regroupe l'ensemble des relations alimentaires entre les individus d'un écosystème. Il traduit donc les chaînes de circulation de matière et d'énergie au sein d'une biocénose.

Au sein d'un réseau trophique, il est possible de définir différents niveaux :

– les **producteurs primaires** sont les végétaux chlorophylliens : autotrophes, ils utilisent l'énergie lumineuse

pour transformer la matière minérale en matière organique grâce à la photosynthèse ;

- les **consommateurs** : hétérotrophes, ils se nourrissent de matière organique et dépendent donc entièrement des producteurs ;
- les **décomposeurs** sont des consommateurs ayant un rôle particulier : hétérotrophes, ils transforment la matière organique morte en matière minérale et permettent son recyclage. Ils jouent un rôle fondamental dans le sol, participant activement à sa formation.

L'étude des relations trophiques permet de caractériser le fonctionnement et la dynamique d'un écosystème : dans tout écosystème, la matière constituant les êtres vivants est constamment transférée et recyclée.

Stocks de matière, flux et cycles biogéochimiques

On appelle **biomasse** la masse d'êtres vivants dans un écosystème : on peut quantifier la masse d'une espèce, d'un groupe plus vaste ou encore d'un niveau trophique. On peut également estimer la biomasse totale de la biocénose d'un écosystème.

La biomasse est une description statique de la biocénose, elle définit des **stocks** de matière. Or, les différents compartiments d'un écosystème ne sont pas indépendants les uns des autres mais échangent de la matière et de l'énergie et sont donc liés par des **flux**.

L'étude des flux de matière entre les compartiments, comme par exemple le carbone, l'eau ou l'azote, permet d'établir des **bilans d'entrée et de sortie** de la matière.

Ainsi, le **cycle du carbone** dans un écosystème comprend les flux de matières organiques circulant d'un niveau trophique à l'autre.

L'entrée du carbone dans l'écosystème est due à l'assimilation du CO_2 par les végétaux, grâce à la photosynthèse. Le carbone ressort de l'écosystème sous forme de CO_2 , du fait de la respiration des êtres vivants et des processus de décomposition de la biomasse morte.

Pour un élément donné, le bilan entre entrée et sortie de l'écosystème détermine si cet écosystème est un **puits** ou une **source**. Grâce à l'importance de la fonction photosynthétique, les forêts, mêmes âgées, sont des puits importants de CO_2 .

Les écosystèmes forestiers participent aussi activement au cycle de l'eau, du fait notamment de l'importance de la transpiration foliaire.

3

Développement de la forêt, perturbation et résilience

Les écosystèmes ne sont pas des entités stables et figées mais au contraire des ensembles très **dynamiques**. La mise en place d'une forêt se fait à travers une succession de stades que l'on appelle **succession écologique**. Le stade final, appelé **climax**, est supposé être un stade d'équilibre optimal. En réalité, il s'agit plutôt d'un concept théorique permettant de comprendre l'évolution de l'écosystème. En effet, aucun stade n'est stable : à tout moment, les êtres vivants présents modifient les conditions de vie et donc les conditions d'installation et de développement d'autres êtres vivants. En forêt, les arbres jouent un rôle fondamental dans cette dynamique.

Une **perturbation** est un événement qui modifie la composition, la structure et le fonctionnement d'un écosystème. Les perturbations peuvent être d'origine naturelle (tempêtes, maladies, incendies...) ou provoquées par les actions humaines (exploitation, pollution, incendies criminels...). Elles peuvent modifier légèrement l'écosystème (chute d'un arbre) ou de manière beaucoup plus importante (disparition d'une partie de la forêt suite à une tempête ou à un incendie).

La **résilience** d'un écosystème désigne sa capacité à revenir naturellement à son état initial après une perturbation. Des études récentes montrent que la complexité du réseau d'interactions, la diversité génétique et la diversité fonctionnelle d'un écosystème favorisent sa résilience. Les forêts sont des écosystèmes particulièrement riches et complexes qui montrent donc une résilience importante. Certaines perturbations sont cependant irréversibles : trop fortes ou trop répétées, elles provoquent des modifications trop importantes pour que l'écosystème puisse se régénérer. Un autre écosystème le remplace alors. C'est par exemple ce qu'il se passe lors du processus de désertification.

Un écosystème se caractérise donc par un équilibre dynamique, sans cesse bousculé par des facteurs internes et externes, mais le plus souvent capable de résilience.



Pic noir et écureuils roux, Parc Naturel Régional des Vosges du Nord classé réserve mondiale de l'UNESCO.

À retenir



► L'écosystème : un ensemble structuré entre les êtres vivants et leur milieu

Un **écosystème**, une forêt par exemple, est un ensemble formé par une communauté d'êtres vivants, la **biocénose**, et le milieu dans lequel ils vivent, le **biotope**. Les **paramètres abiotiques** (conditions physiques et chimiques) et les **facteurs biotiques** (dus aux êtres vivants) influencent la **biodiversité** et la répartition des êtres vivants au sein de l'écosystème.

► Des interactions entre les êtres vivants

Les êtres vivants d'un écosystème sont en **interaction**. Ces interactions peuvent s'analyser en termes de **compétition** (pour la lumière, l'eau, les aliments...), d'**exploitation** (prédation, parasitisme) ou encore de **coopération** (symbiose). Ces interactions déterminent l'organisation de l'écosystème, son fonctionnement et sa dynamique.

► Stocks et flux de matière au sein d'un écosystème

Au sein d'un écosystème, les êtres vivants constituent un stock de matière vivante : c'est la **biomasse**. Les êtres vivants génèrent des flux de matières qui circulent d'un niveau à un autre du **réseau trophique**. La **photosynthèse** réalisée par les végétaux chlorophylliens produit des matières organiques, sources de nourriture pour les autres êtres vivants. La **respiration** des êtres vivants et la **décomposition** de la matière organique assurent un recyclage de cette matière.

► L'effet des écosystèmes sur les cycles biogéochimiques

Pour un écosystème, on peut établir un **bilan d'entrée et de sortie de la matière**. Ce bilan détermine l'effet global de l'écosystème : par exemple, concernant le cycle du carbone, les forêts jouent le **rôle de puits**, car l'ensemble de l'écosystème forestier absorbe plus de CO₂ qu'il n'en rejette.

► Développement, perturbation et résilience des écosystèmes

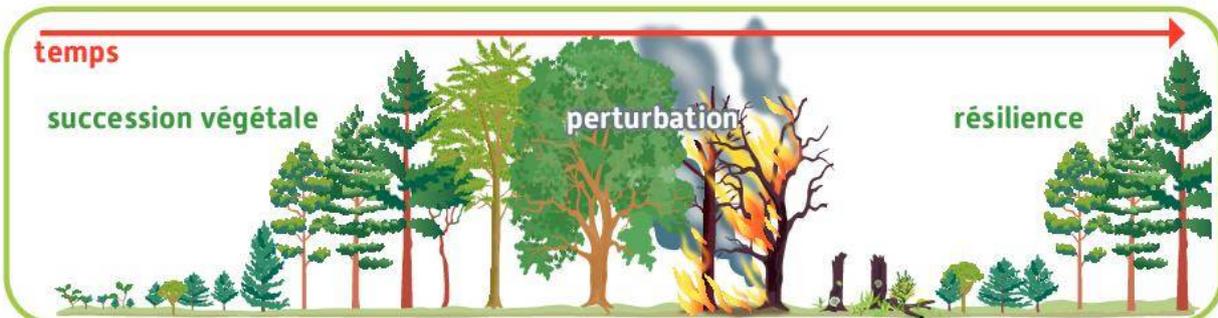
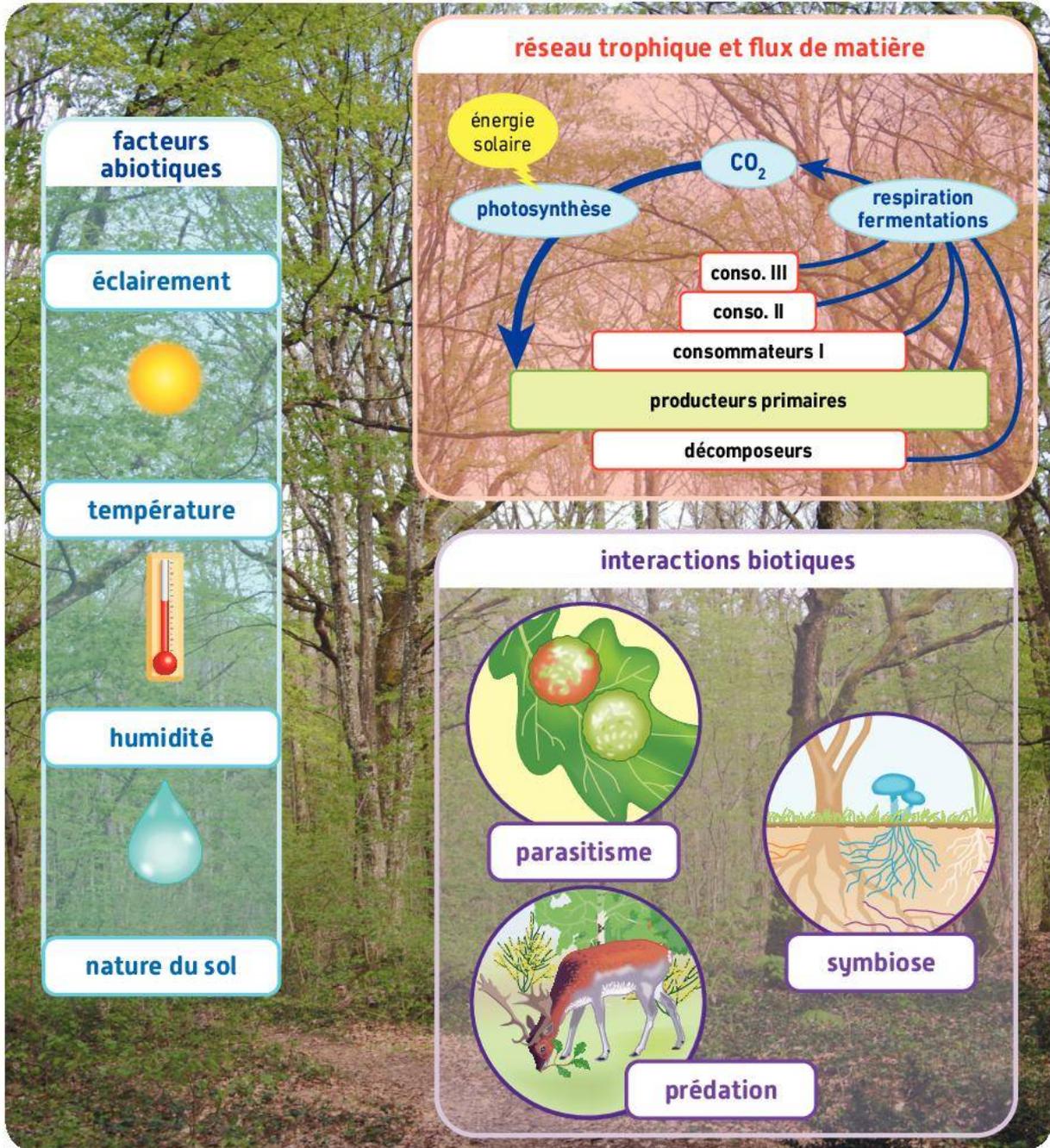
Les écosystèmes sont des ensembles en **équilibre dynamique** qui évoluent : on peut déterminer, pour un écosystème naturel, différents stades constituant une **succession écologique**. Cet équilibre peut être perturbé à tout moment par des facteurs internes et externes (catastrophes naturelles ou non, incendies, maladies...), mais les écosystèmes ont souvent une capacité de **résilience** leur permettant de rétablir leur équilibre. Les écosystèmes ont néanmoins une certaine fragilité et peuvent être perturbés de façon irréversible.

Mots-clés

Biotope ● Biocénose ● Consommateurs ● Cycle biogéochimique ● Décomposeurs ● Dynamique d'un écosystème ● Écosystème ● Flux de matière ● Parasitisme ● Perturbation ● Prédation ● Producteurs primaires ● Réseau trophique ● Résilience ● Stock de matière ● Succession écologique ● Symbiose

Schéma bilan

La dynamique des écosystèmes



Les services rendus par les écosystèmes



Les sociétés humaines ont, pour la plupart d'entre elles, cherché depuis des siècles à dominer la nature, sans comprendre que l'humanité n'est qu'une espèce en interaction avec d'autres au sein d'écosystèmes très variés. Ainsi, nos actions ont déjà profondément altéré 75 % des écosystèmes à la surface des continents. Une prise de conscience est en train de se produire, et permet déjà la mise en place progressive d'une gestion écosystémique plus durable. L'exemple des écosystèmes forestiers, qui couvrent plus d'un tiers des continents, permet de comprendre les menaces et les enjeux de gestion dont ils sont l'objet.

1

Des écosystèmes forestiers modifiés par les actions humaines

► L'exploitation des forêts tempérées françaises

En sylviculture, l'organisation d'une forêt reflète son mode d'exploitation.

Les **futaies** sont des forêts composées de grands arbres, feuillus et/ou résineux. Elles représentent plus de la moitié de ces surfaces forestières. En revanche, les **taillis** sont des peuplements de feuillus constitués de tiges issues de rejets de souches. Une organisation mixte, mélange de futaies et taillis, existe sur un quart de la surface occupée par les forêts.

Quand les arbres sont tous coupés en une fois sur l'ensemble de la parcelle, futaie ou taillis, on parle de **coupe rase**. Dans ce mode d'exploitation, les forêts sont traitées comme des ressources immédiatement disponibles. En France, même si ce type de coupe est suivi d'un semis naturel ou artificiel, cette méthode est mal perçue par le grand public. Outre l'aspect visuel désastreux, les sols sont fortement érodés. La destruction des habitats provoque une perte de biodiversité.

► L'exploitation des forêts tropicales humides

Elles couvrent plus du tiers de la surface forestière mondiale. Cet écosystème se rencontre notamment en Indonésie, au Congo et sur une grande partie de l'Amazonie. Les plantes dominantes sont de très grands arbres, de 30 à 60 mètres de haut, possédant des troncs élancés et des branches sommitales très ramifiées dont l'ensemble forme la canopée. Ces forêts abritent une **biodiversité remarquable**, dont 16 000 espèces d'arbres !

La **déforestation**, suivie d'une reconversion en terres agricoles, constitue la **plus grande menace**. Après des coupes rases, les terres libérées sont exploitées pour

2

Les services écosystémiques

Les ressources gratuitement fournies par les écosystèmes sont variées. On les qualifie de **services écosystémiques**. Ces derniers sont définis comme l'ensemble des caractéristiques de l'écosystème procurant des ressources aux humains ou déterminant la qualité de leur milieu de vie. Outre les processus écologiques à la base de tous les écosystèmes (voir chapitre 1), on distingue trois catégories de services.

► Les services d'approvisionnement

Ils désignent les éléments des écosystèmes utilisés comme **ressources** par les humains. Le bois en est l'exemple le plus évident, omniprésent dans notre quotidien. Matériau naturel renouvelable, il offre, outre le chauffage, des débouchés variés : construction de charpentes, réalisation de meubles et de parquets, production de papier... Nourriture (champignons, fruits, graines, gibier), eau, molécules d'intérêt pour la santé, réserve de variétés génétiques potentiellement utiles, constituent d'autres exemples de services d'approvisionnement.

► Les services de régulation

Ces services correspondent aux **processus déterminant la qualité de notre environnement**. Ainsi, en absorbant du dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂), les forêts contribuent à limiter l'effet de serre exercé par ce gaz, ce qui modère le réchauffement climatique. Les forêts fixent plus de CO₂ qu'elles n'en libèrent : ce sont de véritables « puits de carbone ».

Il existe d'autres exemples importants de services de régulation : disponibilité et qualité de l'eau, limitation de l'érosion, de l'importance des inondations, de la propagation de certaines maladies, succès de la pollinisation.

► Les services culturels

Les forêts sont des environnements où l'on peut pratiquer des **loisirs variés** comme les randonnées pédestres ou cyclistes ou encore des parcours acrobatiques dans

les arbres. Elles permettent également d'éduquer et de sensibiliser les jeunes générations et le grand public à la découverte de la biodiversité et à sa protection.



Comme beaucoup d'écosystèmes, les forêts sont considérées comme des lieux de bien-être, ce qu'ont traduit nombre de peintres ou de poètes.

► La valeur monétaire des services rendus

Quelle que soit la nature des services écosystémiques rendus à la société, ces derniers sont gratuits. Néanmoins, il est possible de leur attribuer une **valeur monétaire**, de façon plus ou moins complexe et précise. Cette monétarisation constitue un argument pouvant protéger les écosystèmes lorsque des décisions d'aménagement du territoire doivent être prises. Elle fait l'objet d'un débat quant à la fiabilité des valeurs attribuées ou encore la possibilité d'acquiescer des « droits à polluer ».

3

Vers une gestion rationnelle des ressources exploitables

Maintenir, voire améliorer la qualité des services écosystémiques pour les générations futures est une nécessité. Parallèlement, l'activité économique associée à leur exploitation doit être assurée. Afin d'atteindre ce double objectif, une gestion durable basée sur la connaissance scientifique des écosystèmes s'impose.

► Gérer durablement les écosystèmes forestiers

Le concept de **gestion durable**, notamment des forêts, a été défini lors de la conférence de Rio (Brésil) en 1992. Cette gestion durable fait appel à la sylviculture, c'est-à-dire à l'entretien et à l'exploitation rationnelle des forêts. La **sylviculture traditionnelle** consiste à favoriser la régénération, naturelle ou non, en pratiquant des coupes d'éclaircie. Ces dernières réduisent la densité du peuplement et permettent ainsi d'améliorer la croissance des plus beaux arbres. L'objectif majeur est d'obtenir une production élevée de bois. Pour cela, des futaies régulières composées d'une seule essence d'arbres de même âge fournissent d'importantes productions de biomasse,

donc des rendements économiques élevés. La forêt de pin maritime des Landes constitue un exemple de ce mode d'exploitation. Inconvénient, des coupes rases d'une parcelle entière sont pratiquées au bout de 40 ans lorsque les pins sont à maturité, mettant à nu transitoirement le sol forestier.

La **sylviculture écologique** associe diverses essences forestières adaptées aux conditions locales et d'âges variés sur une même parcelle. Bien que souvent moins productives, ces forêts résistent mieux aux maladies, aux aléas climatiques et garantissent le maintien de la biodiversité locale. Les prélèvements réguliers permettent une production continue de bois avec des traces apparentes réduites dans le paysage forestier. Cette gestion en futaies irrégulières « jardinées » permet ainsi de garder un couvert forestier permanent et de maintenir non seulement le service d'approvisionnement mais aussi les autres services écosystémiques.

► Maintenir et réparer les écosystèmes : l'ingénierie écologique

Tous les milieux naturels, dont les forêts, sont ponctuellement très endommagés voire détruits par des catastrophes naturelles ou d'origine humaine. Quelles que soient leurs capacités de résilience, ces milieux peuvent nécessiter une aide afin de réparer les perturbations engendrées. L'ensemble des techniques qui permettent de réparer les écosystèmes, d'optimiser leur gestion voire de les recréer afin d'en tirer durablement des bénéfices forment l'**ingénierie écologique**. C'est une ingénierie centrée sur l'emploi du vivant envisagé comme outil et sur la résilience des écosystèmes.

Selon les cas on distingue :

- La **restauration** : l'écosystème dégradé est traité (élimination des espèces invasives et réintroduction des espèces d'origine).
- La **réhabilitation** : biotope et biocénose de l'écosystème disparu sont rétablis en intégralité.
- La **réaffectation** : l'écosystème d'origine est remplacé par un autre.

Les moyens financiers nécessaires peuvent provenir de fonds de **compensation**, c'est-à-dire de l'argent versé par diverses entreprises ou collectivités responsables de la dégradation des écosystèmes. Dans ce cas les montants découlent de la valeur monétaire des services écosystémiques perdus.

Outre ces aspects techniques, l'ingénierie écologique comporte une **dimension éthique très forte** : elle renvoie à des écosystèmes durables intégrant la société humaine dans son environnement naturel, au bénéfice des deux.

À retenir

Des écosystèmes forestiers modifiés par les actions humaines

L'être humain exploite les écosystèmes de la planète afin de subvenir à ses besoins en nourriture, en matériaux et énergie. Cette **exploitation des écosystèmes** perturbe leur bon fonctionnement en modifiant leur biotope à une échelle locale (érosion des sols par exemple) et à une échelle globale (cycle du CO₂).

Dans les cas les plus graves, comme la déforestation, on constate une forte dégradation voire une destruction complète des écosystèmes. Les conséquences sont nombreuses : **déclin de la biodiversité**, baisse de la production et de l'activité économique, **pollution** des eaux, du sol et de l'air, **développement de certaines maladies** qui affectent notre santé.

Les services écosystémiques

La nature fournit **gratuitement** à l'humanité de nombreux services. Outre les processus écologiques à la base de tout écosystème, on distingue trois types de services écosystémiques. Les services **écosystémiques d'approvisionnement** correspondent aux produits issus de l'exploitation des écosystèmes : biomasse, eau, molécules d'intérêt médical...

Les écosystèmes favorisent la dépollution de l'eau (nitrates), limitent le réchauffement climatique (absorption du dioxyde de carbone) et la propagation de maladies, conservent la fertilité des sols. Ce sont les **services écosystémiques de régulation**.

Enfin, les écosystèmes constituent des ressources patrimoniales et récréatives importantes : ce sont les **services écosystémiques culturels**.

Ces services font l'objet d'une **monétarisation** : il s'agit de leur attribuer une valeur financière. Ce principe de monétarisation fait l'objet de débats d'ordres éthique et technique.

Vers une gestion durable des ressources exploitables

Le **maintien** des services écosystémiques impose une **gestion raisonnée** des écosystèmes basée sur une **connaissance scientifique** poussée de leur fonctionnement. Ainsi, la **sylviculture écologique** permet de fournir continuellement du bois tout en maintenant l'organisation forestière : activité économique et préservation des services écosystémiques demeurent durablement associées.

Quand les écosystèmes sont endommagés, des techniques d'**ingénierie écologique** s'appuyant sur le vivant peuvent être mises en œuvre, rétablissant partiellement (restauration) ou totalement (réhabilitation) les services écosystémiques dégradés. Dans certains cas, un écosystème détruit peut être remplacé par un autre (réaffectation).



Mots-clés

Compensation • Conservation biologique • Gestion durable • Ingénierie écologique • Réhabilitation • Services écosystémiques d'approvisionnement, de régulation et culturels.

Les services rendus par les écosystèmes



Déforestation et conversion en agrosystème

Exemple : soja

- Appauvrissement et érosion des sols
- Déclin de la biodiversité
- Pollution de l'eau et de l'air
- Émergences de maladies
- Changement climatique

Sylviculture traditionnelle

Exemple : futaie régulière

Sylviculture écologique

Exemple : futaie irrégulière jardinée

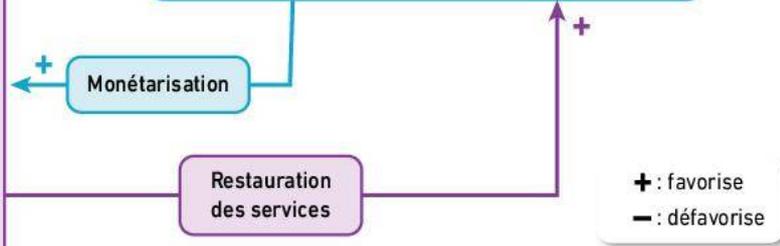
Ingénierie écologique

Compensation

Restoration
Réhabilitation
Réaffectation

Exemple : création d'une ripisylve

Conservation biologique



Rappels du programme de Terminale - ENS

Tiré du livre de Terminale Edition Bordas

1 Une atmosphère primitive différente de l'actuelle

● L'origine de l'atmosphère est intimement liée à celle de la Terre

Comme toutes les planètes du Système solaire, la Terre s'est formée par accréation de divers objets cosmiques, il y a 4,57 Ga. La jeune planète s'est peu à peu structurée par migration des éléments les plus lourds vers le centre et des plus légers en périphérie. Des enveloppes concentriques se sont ainsi mises en place, l'**atmosphère primitive** composée d'éléments légers étant la plus externe (Fig. 1).

● La composition de l'atmosphère primitive

L'analyse du dégazage de météorites de type chondrite, roche similaire aux matériaux impliqués dans l'accréation, est un bon indicateur de sa composition. Ainsi, l'atmosphère initiale était très riche en eau (80 %) et comportait du dioxyde de carbone (12 %) et du diazote (5 %). En revanche, elle était dépourvue de dioxygène.

● La liquéfaction de l'eau atmosphérique

L'existence du zircon, âgé de 4,4 Ga, minéral se formant dans des magmas riches en eau, atteste d'une liquéfaction très précoce dans l'histoire de notre planète puis de la formation des océans (Fig. 2).

En se refroidissant, la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère de la jeune planète s'est liquéfiée, permettant la formation de l'hydrosphère.

2 L'atmosphère et la vie ont évolué conjointement

Une fois l'hydrosphère formée, la vie s'est développée, modifiant progressivement la composition de l'atmosphère.

● Les premières traces de vie ont au moins 3,5 Ga

Des fossiles très anciens, les stromatolithes, suggèrent que vers – 3,5 Ga, des êtres vivants unicellulaires, proches des cyanobactéries actuelles, étaient présents sur Terre. Capables de réaliser la photosynthèse, ces cyanobactéries fossiles sont les premiers producteurs de dioxygène connus.

● Le dioxygène produit reste dans l'hydrosphère

Le dioxygène libéré dans les océans primitifs s'est combiné avec le fer présent dans ces derniers, formant de l'hydroxyde ferrique (Fig. 3). En précipitant, ce fer a contribué à donner naissance à des roches siliceuses riches en fer, les fers rubanés. Ces roches sédimentaires marines se sont formées entre – 2,5 et – 1,9 Ga. Ainsi, bien que formé dès – 3,5 Ga, le dioxygène était encore absent de l'atmosphère terrestre à cette période.

● Une oxygénation tardive de l'atmosphère

Suite à la précipitation du fer des océans, le dioxygène s'est libéré dans l'atmosphère. Des paléosols, les « red beds » attestent de cette présence. Vers – 2,2 Ga, l'atmosphère réductrice (sans dioxygène) est devenue oxydante (avec dioxygène).

● Un enrichissement progressif en dioxygène

Le dioxygène s'est progressivement accumulé jusqu'à atteindre la concentration atmosphérique actuelle vers – 0,5 Ga. De nos jours, la photosynthèse constitue

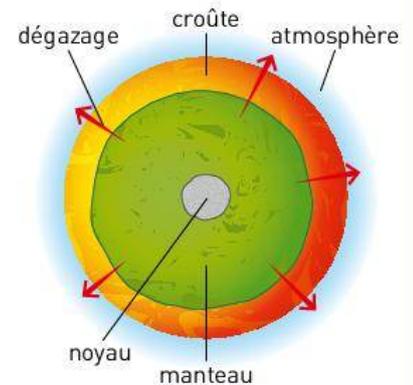


Fig. 1 : L'atmosphère primitive résulte d'un dégazage précoce de la planète.



Fig. 2 : L'eau des océans actuels provient de la vapeur d'eau de l'atmosphère primitive.

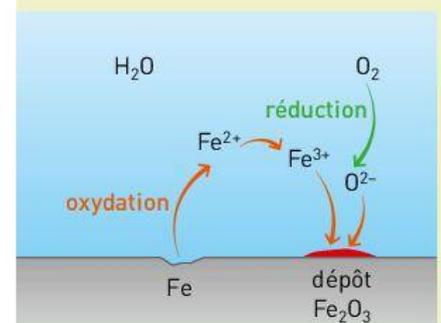


Fig. 3 : Dans les océans, les ions Fe^{2+} s'oxydent en Fe^{3+} qui précipitent sous forme de Fe_2O_3 .

la principale **source de dioxygène** atmosphérique tandis que la respiration et les combustions sont les principaux **puits de dioxygène**.

La composition de l'atmosphère actuelle, largement influencée par la vie, est d'environ 78 % de diazote (N_2) et 21 % de dioxygène (O_2), avec des traces d'autres gaz comme l'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O).

3 La couche d'ozone protège le vivant

● Une formation incessante

L'ozone se forme à partir du dioxygène dans la stratosphère, entre 15 et 50 km d'altitude. Sous l'action des rayons ultraviolets (UV), les molécules de dioxygène se dissocient. Les atomes d'oxygène ainsi libérés se recombinaient avec d'autres molécules de dioxygène afin de former l'ozone (O_3). Ce phénomène est maximal vers 25 km d'altitude et est à l'origine de la formation de la **couche d'ozone**.

● La couche d'ozone absorbe les UV

La couche d'ozone absorbe la totalité des UVC et une grande partie des UVB (Fig. 4).

Ainsi, la couche d'ozone protège l'ADN des êtres vivants des effets mutagènes délétères des UV. Cette protection a permis l'épanouissement de la vie hors de l'eau, il y a 360 millions d'années.

4 Le cycle biogéochimique du carbone sur Terre

● Un stockage dans plusieurs réservoirs

L'élément carbone est présent dans différents réservoirs (atmosphère, océans, sols, biosphère, roches) qui s'échangent principalement le carbone sous forme de CO_2 . Ces échanges constituent le **cycle biogéochimique du carbone** sur Terre. À l'échelle de quelques décennies, les quantités de carbone dans les réservoirs sont constantes lorsque les flux sont équilibrés.

● Les activités humaines déséquilibrent le cycle naturel du carbone

En utilisant des combustibles fossiles, les activités humaines augmentent le rejet de CO_2 dans l'atmosphère. Or, la formation de pétrole, gaz naturel et charbon, requiert des millions d'années. Ainsi, l'Homme restitue très rapidement dans l'atmosphère le CO_2 que la nature avait lentement piégé (Fig. 5).

Les réservoirs que sont les roches carbonées ne se renouvellent pas suffisamment vite : ces ressources sont dites non renouvelables.

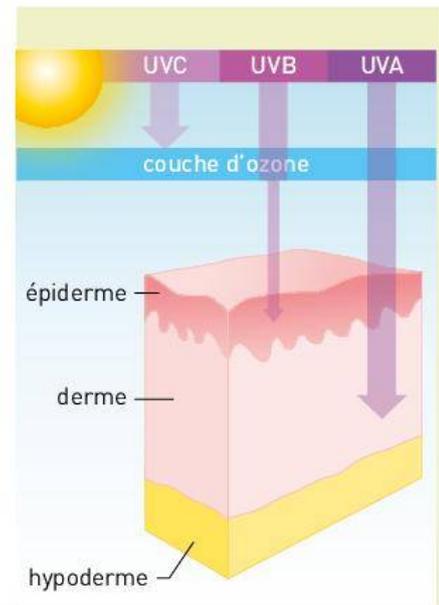


Fig. 4 : Le rôle protecteur de la couche d'ozone.

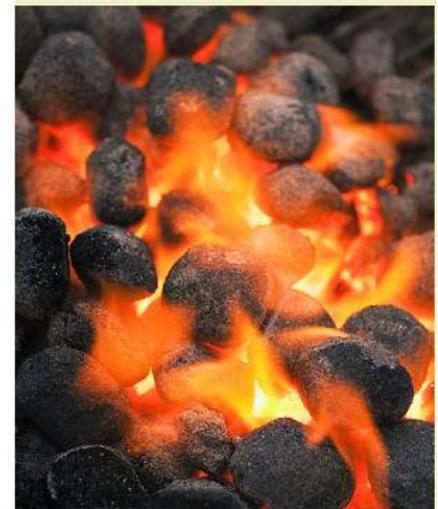


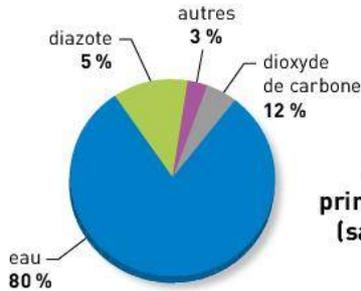
Fig. 5 : Le charbon est le combustible fossile qui, en brûlant, restitue le plus de CO_2 dans l'atmosphère. Actuellement, l'atmosphère contient un taux de 415 ppm de CO_2 , un record depuis 3 Ma !

Le vocabulaire à retenir

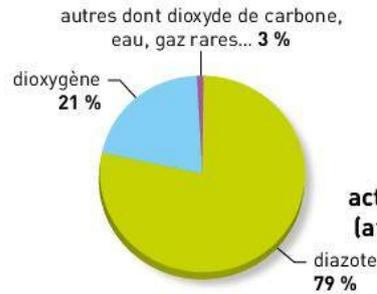


- **Atmosphère primitive** : première couche de gaz formée autour de la Terre.
- **Puits et source de dioxygène** : réservoir/mécanisme respectivement consommateur et producteur de ce gaz.
- **Couche d'ozone** : zone de la stratosphère riche en molécules de ce gaz (O_3).
- **Cycle biogéochimique du carbone** : circulation de l'élément carbone (C) entre ses différents réservoirs.

1 Une atmosphère primitive très différente de l'atmosphère actuelle

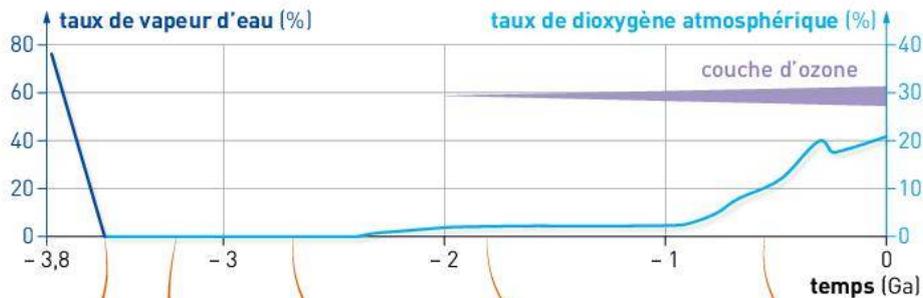


Atmosphère primitive réductrice (sans dioxygène)



Atmosphère actuelle oxydante (avec dioxygène)

2 Évolution de la composition de l'atmosphère depuis sa formation à nos jours

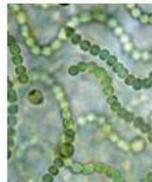


condensation de la vapeur d'eau



Le refroidissement entraîne la liquéfaction de l'eau.

photosynthèse



Des cyanobactéries libèrent du dioxygène.

piégeage du dioxygène



Les fers rubanés sont formés par l'oxydation du fer dans les océans.

dioxygène atmosphérique



Les *redbeds* sont des paléosols témoins d'une atmosphère oxydante.

couche d'ozone



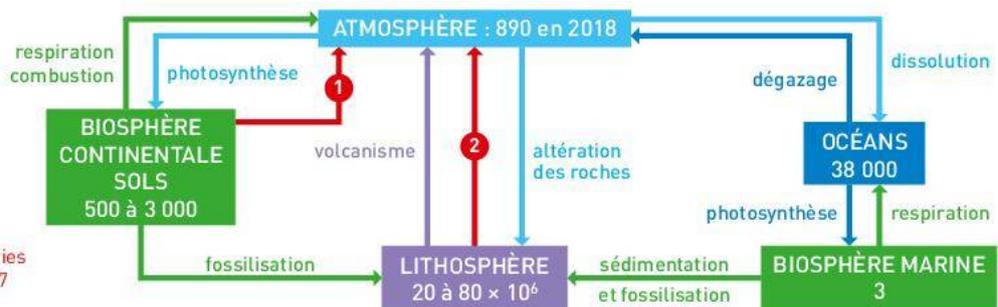
Des fossiles sont témoins d'une vie aérienne permise par la couche d'ozone.

3 Un cycle du carbone naturellement équilibré, mais perturbé par les activités humaines

Les valeurs numériques sont exprimées en Gt de C par an.

rejets anthropiques

- 1 déforestation : 1 Gt en 2017
- 2 combustion des énergies fossiles : 11 Gt en 2017



1 Vers une définition du climat

Caractériser le **climat** d'une région de la Terre revient à déterminer, pendant une période donnée, les valeurs moyennes de plusieurs grandeurs atmosphériques. Ces dernières sont principalement la température, la pluviométrie, la pression, l'hygrométrie, la nébulosité, la vitesse et la direction des vents. Il faut également prendre en compte la fréquence des épisodes de canicule, de sécheresse, de grand froid, le volume océanique, l'étendue des banquises et des glaciers continentaux... Autrement dit, tous les caractères statistiques météorologiques (moyennes et écarts à la moyenne) définissent le climat d'une région de la planète.

L'étude du climat global terrestre est basée principalement sur les variations de la **température moyenne globale**. Celle-ci est calculée à partir de mesures en différents points du globe et de données satellites.

La climatologie s'intéresse donc aux mêmes phénomènes atmosphériques que la météorologie mais s'en distingue par deux points. Les études météorologiques se font sur un court terme (jours et semaines) dans un but prévisionnel, alors que les études climatologiques concernent les variations à moyen ou long terme (années, siècles, millénaires...) (Fig. 1).



Fig. 1 : Le climat nous indique quels vêtements acheter pour l'année, la météo quels vêtements porter la journée.

2 La variabilité naturelle du climat

Le climat terrestre présente une variabilité naturelle observable sur plusieurs échelles de temps. Ces variations peuvent être identifiées grâce à différents indicateurs.

• Une variabilité à l'échelle des siècles et millénaires

Les relevés de la date des vendanges en France depuis plus d'un siècle indiquent une période de réchauffement climatique au cours des 50 dernières années (Fig. 2).

L'analyse des pollens conservés dans les sédiments lacustres permet de reconstituer les environnements végétaux passés et les climats dont ils dépendent.

Exemple : Une abondance de pollens de graminées et une diminution de pollens d'arbres témoignent d'un refroidissement comme ce fut le cas au Dryas récent en Europe entre - 12 700 et - 11 700 ans.

• Une variabilité à l'échelle du million d'années

La composition isotopique des atomes des molécules d'eau des glaces polaires et la composition gazeuse des bulles d'air fossiles qu'elles contiennent montrent que depuis 800 000 ans, la Terre a périodiquement subi des changements climatiques majeurs. Des périodes froides (glaciaires) ont alterné avec des périodes chaudes (interglaciaires), un cycle de 100 000 ans rythmant les maxima glaciaires (Fig. 3). Une corrélation existe entre la température et le taux de CO₂ atmosphérique : les périodes chaudes s'accompagnent d'une augmentation nette de la teneur en CO₂ et inversement pour les périodes glaciaires.

Au cours de ces 800 000 dernières années, la température a connu des variations naturelles mais jamais aussi rapides qu'au cours du réchauffement climatique global observé depuis le début de l'ère industrielle (environ + 1 °C depuis le début du siècle dernier). Parallèlement, jamais la concentration atmosphérique en CO₂ n'a augmenté aussi rapidement qu'actuellement ; ainsi, le seuil des 400 ppm a été dépassé en 2014 pour la première fois depuis 800 000 ans.

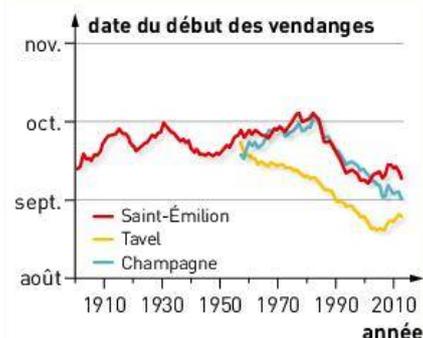


Fig. 2 : Évolution de la date des vendanges dans trois vignobles français.

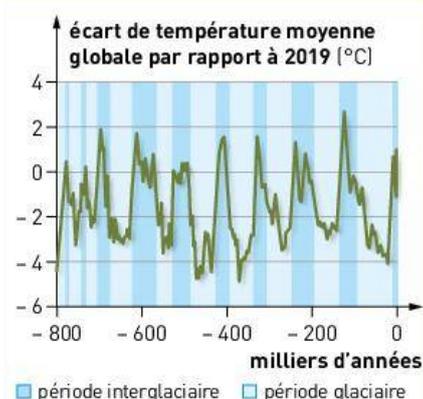


Fig. 3 : Alternance des périodes glaciaires et interglaciaires depuis les derniers 800 000 ans.

3 Un bilan radiatif déséquilibré

Le bilan radiatif terrestre est la différence entre la puissance reçue par la planète et celle réfléchie (albédo) à laquelle s'ajoute celle réémise vers l'espace sous forme d'infrarouge. Si le bilan radiatif est équilibré, la température moyenne de la Terre est stable. Or, le réchauffement climatique global récent traduit un bilan radiatif déséquilibré et positif (Fig. 4).

Ce phénomène est provoqué par l'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, en partie d'origine anthropique. Quatre gaz principaux (H_2O , CO_2 , CH_4 et N_2O) piègent une plus grande fraction du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre. En retour, ils émettent un rayonnement infrarouge vers le sol entraînant un réchauffement de la température de surface.

Un bilan radiatif positif est provoqué par l'intensification de l'effet de serre correspondant à un forçage radiatif positif à l'origine du réchauffement climatique.

4 Un réchauffement inéluctable ?

Un emballement du système climatique

Même en cas de réduction importante des émissions de GES, la température moyenne augmentera d'environ $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ en 2050 par rapport à 1850. En effet, l'élévation initiale de la température est à l'origine de différents mécanismes amplificateurs qui entraînent des **rétroactions positives** sur ce réchauffement (Fig. 5).

Parmi ces mécanismes, on peut citer :

- l'augmentation de la teneur en vapeur d'eau atmosphérique (par évaporation) ;
- une baisse de l'albédo terrestre, du fait de la diminution des surfaces glacées ;
- le dégel du **pergélisol** provoquant une libération de GES (CO_2 et CH_4).

Néanmoins, l'accroissement de la végétalisation conduit à un stockage du CO_2 sous forme de carbone organique, ce qui est un exemple de rétroaction négative.

Le rôle particulier des océans

Les océans accumulent dans leurs couches superficielles 95 % du surplus d'énergie lié au forçage radiatif. Ceci a pour conséquence une **dilatation thermique** élevant le niveau de la mer, phénomène accentué par la fonte des glaces continentales. Sur une courte échelle de temps (quelques décennies), les océans exercent un rôle amortisseur sur l'augmentation de la température moyenne globale car ils se réchauffent moins vite que l'atmosphère.

Sur une longue échelle de temps (plusieurs siècles), la chaleur océanique accumulée retournera dans l'atmosphère rendant ainsi le réchauffement irréversible.

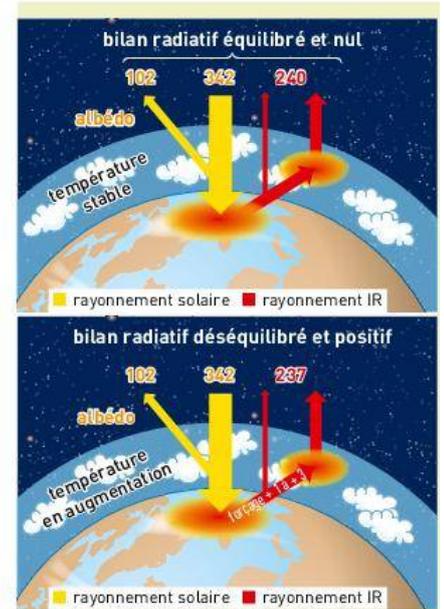


Fig. 4 : Bilan radiatif équilibré (en haut) et déséquilibré (en bas) dû à l'accroissement de l'effet de serre. Les valeurs sont en $W \cdot m^{-2}$.

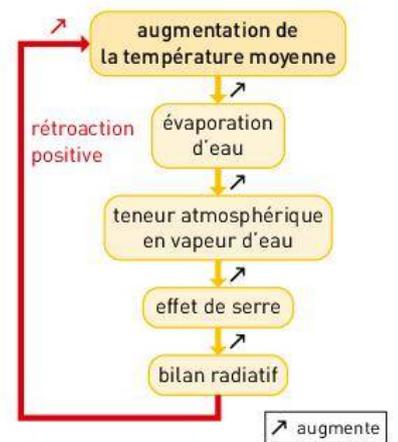


Fig. 5 : Un exemple de rétroaction positive.

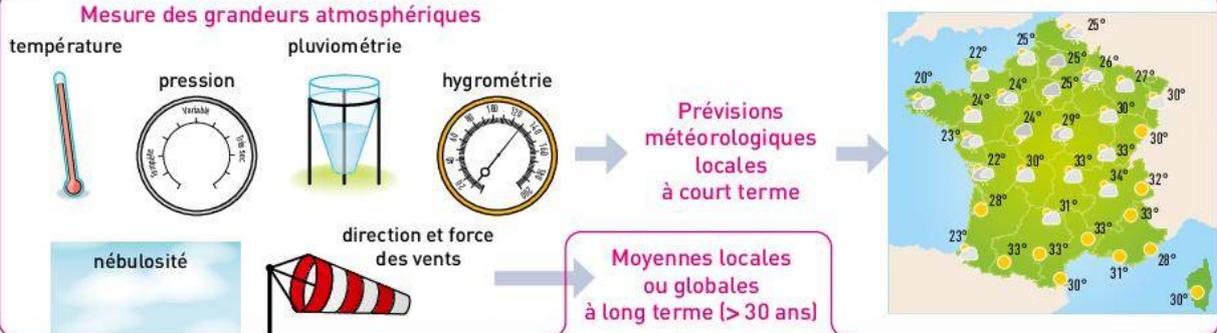
Le vocabulaire à retenir

- **Climat** : description des moyennes des conditions atmosphériques (températures, précipitations, pressions...) observées localement ou globalement sur une période minimale d'un an.
- **Dilatation thermique** : augmentation du volume d'un corps due à l'élévation de sa propre température.
- **Température moyenne globale** : valeur moyenne des multiples relevés de température à la surface de la Terre.
- **Pergélisol** : partie du sol gelée en permanence pendant au moins deux années consécutives.
- **Rétroaction positive** : action amplifiante d'un système sur le processus qui l'a initialement modifié.
- **Forçage radiatif** : déséquilibre du bilan radiatif conduisant à un changement de température, il est provoqué par une variation de l'albédo, de l'effet de serre ou de la puissance solaire reçue.

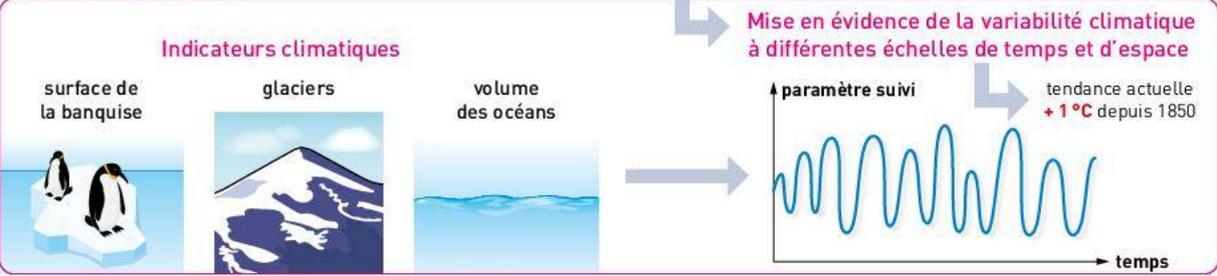


1 La variabilité climatique

MÉTÉOROLOGIE

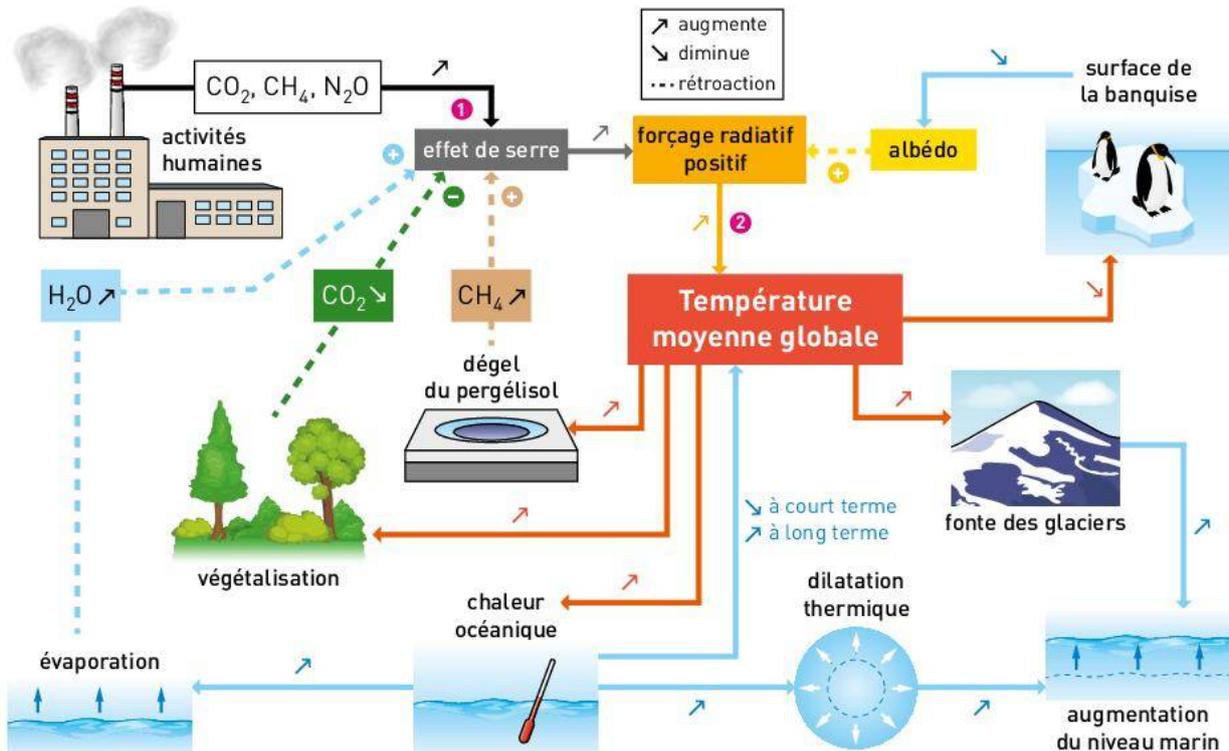


CLIMATOLOGIE



2 Un réchauffement irréversible ?

Les activités humaines accentuent l'effet de serre (①), provoquant une augmentation de la température moyenne globale (②) qui s'autoamplifie par rétroactions positives (⊕) plus importantes que les rétroactions négatives (⊖).



1 Modéliser le système climatique

Le climat mis en équation

Puissances solaires reçue et absorbée, albédo, humidité de l'air, température, pression atmosphérique, activité biologique, teneurs en gaz à effet de serre (GES)... sont autant de paramètres dont les interactions au cours du temps permettent de décrire mathématiquement le fonctionnement du système climatique.

Les lois de la physique, de la chimie et les lois empiriques issues des observations fournissent les équations dont l'encodage informatique permet la construction de **modèles** numériques du fonctionnement du climat terrestre.

Ces modèles représentent une Terre virtuelle dont la surface et l'atmosphère sont découpées en différentes zones. Ce maillage territorial simplifie la représentation du système climatique et allège les calculs nécessaires.

Ainsi, les modèles climatiques régionaux font appel à des résolutions spatiale et temporelle plus hautes que les modèles climatiques globaux (Fig. 1).

Les modèles climatiques étant des représentations simplifiées de la réalité, les résultats qu'ils fournissent sont toujours à interpréter avec précaution.

L'évaluation des modèles climatiques passe par la comparaison des simulations qu'ils produisent avec les observations réelles de terrain ou satellitale des dernières décennies mais aussi des climats plus anciens (paléoclimats).

En cas d'écart avec la réalité, les équations ou les valeurs initiales sont corrigées jusqu'à ce que le modèle décrive la réalité de façon fiable.

Les objectifs des modèles climatiques

Les modèles climatiques améliorent la compréhension du système climatique terrestre actuel et passé à différentes échelles de temps (de la centaine au milliard d'années) et son impact sur l'histoire de la vie et de l'humanité.

L'objectif principal des modèles climatiques est la réalisation de **prévisions climatiques globales et locales** sur quelques décennies ou siècles afin d'anticiper les risques associés au changement du climat.

2 L'être humain est responsable du réchauffement climatique

Activités humaines et émissions de GES

Les principaux GES émis par les activités humaines (Fig. 2) sont :

- le dioxyde de carbone (CO_2) issu de la consommation des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), de la déforestation et de la production de ciment ;
- le méthane (CH_4) qui provient de l'exploitation du gaz naturel dont il est le constituant majoritaire (à 95 %), de l'agriculture (élevages bovins, rizières...) et des décharges ;
- le protoxyde d'azote (N_2O) venant de la dégradation des déchets organiques et des engrais minéraux utilisés par le secteur agricole.

En 2017, les activités humaines ont rejeté dans l'atmosphère plus de 40 milliards de tonnes de CO_2 dont environ la moitié sera absorbée par l'environnement.

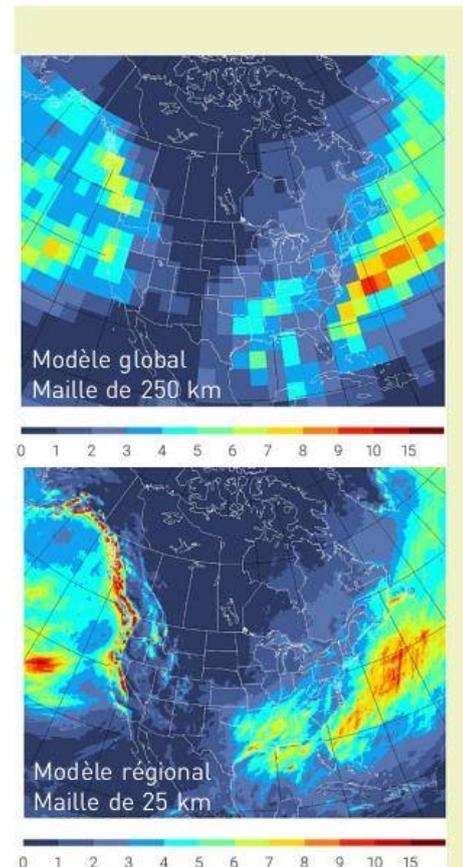


Fig. 1 : Simulation des précipitations en Amérique du Nord pour deux résolutions différentes (en mm/jour).

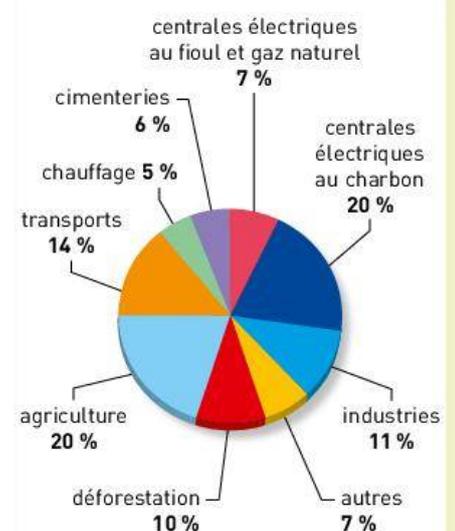


Fig. 2 : Répartition des émissions de GES par secteur d'activité en 2017.

● Corrélation avec le réchauffement climatique

La vitesse de l'augmentation des teneurs atmosphériques de GES et les valeurs atteintes sont inédites dans l'histoire du climat depuis au moins 800 000 ans. Cette tendance débute au moment de la révolution industrielle dès la fin du XVIII^e s.

Ces observations suggèrent que l'être humain est en grande partie responsable d'une augmentation de la teneur atmosphérique de CO₂ (passant de 277 ppm en 1750 à 410 ppm en 2019) et, par voie de conséquence, du réchauffement actuel.

L'utilisation des modèles climatiques comparant l'évolution de la température moyenne de la Terre avec et sans activités humaines permet d'établir un lien de cause à effet entre les émissions anthropiques et le changement du climat.

L'augmentation de la température moyenne de 1,3 °C observée depuis le début de l'ère industrielle est liée aux activités humaines avec une certitude de 95 %.

3 Le climat de demain

● Les projections climatiques

Le groupe intergouvernemental d'experts du climat (GIEC), créé en 1988 par l'ONU, intègre aux modèles climatiques un ensemble de paramètres sociologiques, politiques, démographiques et technologiques, sous la forme de 4 scénarios RCP pour réaliser des **projections climatiques** (Fig. 3).

Les projections climatiques ont pour objectif de prévoir l'évolution du climat en fonction des futures émissions anthropiques de GES et des politiques menées ou non pour les réduire.

● Des modifications globales

Tous les modèles prévoient, d'ici la fin du siècle, avec une forte probabilité :

- une augmentation de la température atmosphérique moyenne de 1,5 à 5 °C ;
- une élévation du niveau moyen des océans pouvant atteindre 1 mètre ;
- une augmentation de la température et une acidification des océans ;
- une modification de la répartition et de l'intensité des précipitations ;
- des changements dans la fréquence et l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes (sécheresse, vagues de chaleur ou de froid, ouragans et tempêtes...).

L'ensemble des modifications des conditions environnementales sont à même de perturber gravement le fonctionnement des écosystèmes terrestres et marins, d'aggraver la disparition des espèces et de menacer les activités humaines.

Selon le GIEC, il est impératif de limiter d'ici 2100 l'écart de température à + 2 °C par rapport à 1880 pour éviter un changement irréversible de notre environnement.

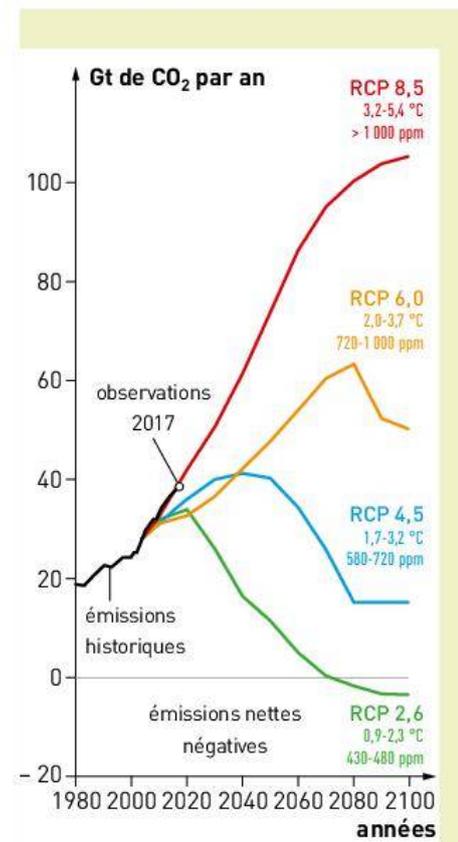


Fig. 3 : Émissions annuelles nettes de CO₂ réelles (quantités restantes dans l'atmosphère après réabsorption par l'Homme) et projections RCP. Les écarts de température sont indiqués par rapport à la moyenne de la période 1850-1900.

▶ VIDÉO BONUS Le changement climatique



Le vocabulaire à retenir

- **Modèle climatique** : représentation numérique simplifiée du système climatique terrestre permettant d'en améliorer la compréhension et de réaliser des prévisions et projections climatiques.
- **Prévision climatique** : estimation de l'évolution future du climat ne s'appuyant que sur la connaissance scientifique du système climatique.
- **Projection climatique** : estimation de l'évolution future du climat basée sur les prévisions climatiques et sur différents scénarios de l'évolution des sociétés humaines.
- **Scénario RCP (Representative Concentration Pathway)** : estimation de l'évolution future des rejets anthropiques de gaz à effet de serre tenant compte de différentes possibilités de l'évolution des sociétés humaines.



1 Modéliser le système climatique

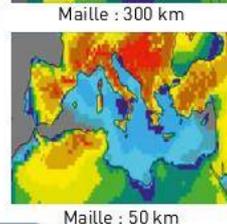
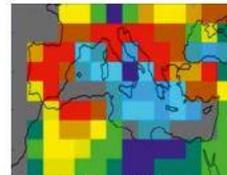
Observation du **système climatique** et mesures de température, d'humidité, d'ensoleillement, de pression...



Mises en équation du système climatique pour différentes **résolutions** spatiales et temporelles



Réalisation de **prévisions climatiques**

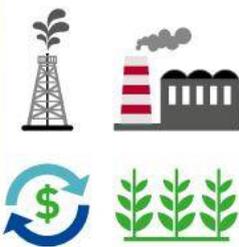


	Taille de la maille	
	↗	↘
Résolution temporelle et spatiale	↘	↗
Précision	↘	↗

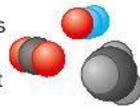
Comparaison à la réalité actuelle ou passée pour validation ou correction des modèles

2 L'être humain est responsable du réchauffement climatique

Activités humaines émettrices de GES



Concentrations en GES anormalement élevées



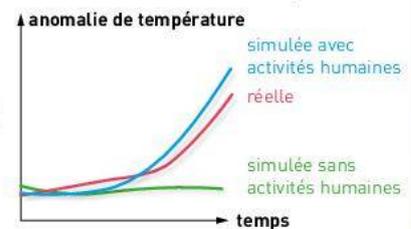
Augmentation de la température moyenne globale



Corrélations entre observations

Hypothèse d'une responsabilité humaine

Expérimentation via les modèles climatiques



Responsabilité humaine confirmée

3 Le climat de demain dépend des choix d'aujourd'hui

Prise en compte de scénarios...

politique



économique



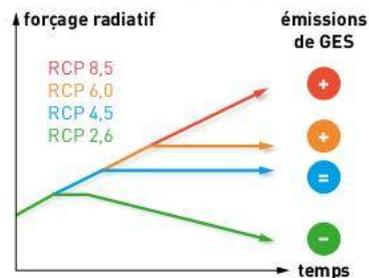
technologique



démographique



Réalisation de **projections climatiques**



D'aujourd'hui à 2100, des conséquences d'amplitudes variables :

- température : + 1,5 à + 5 °C
- niveau marin : + 1 m environ
- diminution du pH des océans
- modifications en fréquence et intensité des phénomènes climatiques extrêmes et des précipitations
- diminution de la biodiversité marine et continentale

1 Des outils pour quantifier la biodiversité

D'une grande diversité, les écosystèmes abritent des millions d'espèces différentes. Cette biodiversité est souvent impossible à étudier de façon exhaustive. Aussi, les scientifiques limitent leur étude à une fraction de la population appelée **échantillon**.

Les individus échantillonnés peuvent être identifiés directement ou *via* des séquences ADN qui leur sont spécifiques.

Cette approche permet d'estimer :

- la **richesse spécifique** de l'écosystème, c'est-à-dire le nombre d'espèces différentes qui le composent. Dans certains cas, la richesse spécifique est si grande qu'il est préférable de mesurer la biodiversité en étudiant des groupes d'espèces apparentées ou taxons (Fig. 1) ;
- l'**abondance** (ou effectif) d'une population (méthode de capture-marquage-recapture) ;
- la fréquence d'un caractère au sein d'une population.

Exemple : un recensement a été effectué dans une population de damans (Fig. 2). 25 individus ont été capturés, marqués puis relâchés. Plus tard, 30 individus ont été recapturés, parmi lesquels 5 étaient marqués. On peut estimer l'effectif de la population à $N = 30 \times 25 \div 5 = 150$ individus.

Cependant, les résultats obtenus ne seront jamais assortis d'un niveau de confiance de 100 %. On appelle **intervalle de confiance** l'intervalle de valeurs contenant cette estimation pour un niveau de confiance donné. Cet intervalle est d'autant plus réduit que l'effectif de l'échantillon est grand. Il peut se calculer, pour un niveau de confiance de 95 %, à partir de l'effectif n de l'échantillon, et de la fréquence f du caractère dans celui-ci, par la formule suivante :

$$\left[f - \frac{1}{\sqrt{n}} ; f + \frac{1}{\sqrt{n}} \right]$$

Exemple : une étude réalisée sur une partie des ruches d'un rucher montre que sur les 214 abeilles observées, 76 sont parasitées par un acarien, le varroa. En utilisant la formule précédente on obtient l'intervalle de confiance suivant : [0,29 ; 0,43]. On peut donc, avec un niveau de confiance de 95 %, estimer qu'entre 29 % et 43 % des abeilles du rucher sont parasitées par le varroa.

L'évaluation de la biodiversité repose principalement sur l'échantillonnage, qui permet de généraliser des mesures réalisées sur une fraction de la population.

2 Des populations dont la structure génétique évolue

Un modèle de référence

Afin de suivre l'évolution des populations, les scientifiques ont recours à une situation de référence. Le modèle de Hardy-Weinberg prédit que dans une population fermée, d'effectif infini, ne subissant ni mutation ni sélection et dans laquelle les individus se reproduisent au hasard, la **structure génétique** est stable d'une génération à l'autre : c'est l'**équilibre de Hardy-Weinberg** (Fig. 3).

Des forces évolutives à l'œuvre

Tout écart à l'équilibre du modèle de Hardy-Weinberg témoigne de l'action de forces évolutives. Par exemple, les mutations font apparaître de nouveaux allèles dans la population et modifient cet équilibre. Cependant, du fait de leur rareté, leur impact reste modeste.

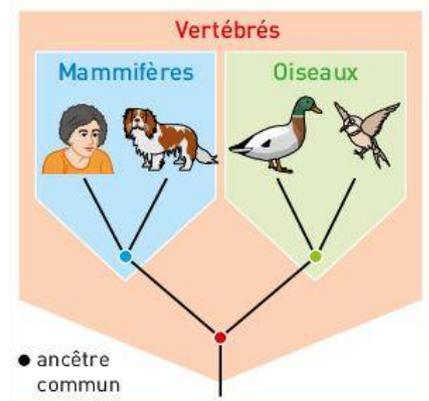


Fig. 1 : On appelle taxon un groupe d'organismes issus d'un même ancêtre commun. Ici, Mammifères, Oiseaux et Vertébrés sont trois exemples de taxons.



Fig. 2 : Afin de suivre l'évolution de l'effectif des populations de damans au Cap, cet individu a été capturé, marqué à l'aide d'un collier, puis relâché.

Génotypes	Fréquences
A1//A1	p^2
A1//A2	$2pq$
A2//A2	q^2

Fig. 3 : Structure génétique d'une population conforme au modèle de Hardy-Weinberg (p et q étant les fréquences des allèles A1 et A2).

◆ Quand la sélection s'en mêle

Si un caractère héréditaire confère un avantage reproductif, la fréquence de l'allèle qui le détermine augmente avec le temps dans la population : c'est la sélection naturelle*. Si l'avantage concerne l'accès au partenaire sexuel, on parle de sélection sexuelle.

◆ La dérive génétique

La plupart des populations réelles ne sont pas de taille infinie. La fréquence des caractères peut alors varier de génération en génération sous l'effet du hasard : c'est la dérive génétique. À terme, un allèle finit soit par disparaître soit par s'imposer : la dérive conduit à l'appauvrissement génétique d'une population. Plus l'effectif d'une population est faible, plus la dérive y est marquée.

Ainsi, lorsqu'une population voit son effectif diminuer, par exemple du fait de la **fragmentation** de son habitat (Fig. 4), l'appauvrissement génétique lié à la dérive génétique peut la rendre plus vulnérable et provoquer son déclin voire sa disparition.

En théorie, une population d'effectif infini et ne subissant aucune force évolutive présente une structure génétique stable. Si la population est l'objet de forces évolutives (mutation, sélection, dérive génétique, migration), sa structure génétique évolue dans le temps.



Fig. 4 : Les orangs-outans, tout comme de nombreuses autres espèces, sont victimes de la production d'huile de palme qui fragmente leur habitat.

3 Une biodiversité à protéger

Actuellement, le nombre d'espèces et les effectifs de populations diminuent à une vitesse alarmante (Fig. 5).

Ce déclin est essentiellement lié aux activités humaines :

- l'utilisation des sols (agriculture, urbanisation...) conduisant à une destruction et une fragmentation des habitats naturels ;
- la pollution (pesticides, résidus de combustions...);
- l'utilisation des combustibles fossiles à l'origine du dérèglement climatique ;
- la surexploitation des espèces et des milieux ;
- les échanges internationaux favorisant les espèces invasives...

La connaissance du fonctionnement d'un écosystème permet d'adopter différentes mesures permettant d'y préserver la biodiversité.

Exemples :

- Des réintroductions bien contrôlées dans une population appauvrie génétiquement peuvent permettre de diminuer le risque d'extinction de cette population.
- L'établissement de corridors écologiques (ponts au-dessus des routes, crapauducs...) permet de limiter les effets de la fragmentation.

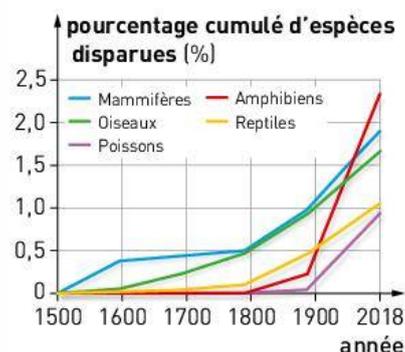


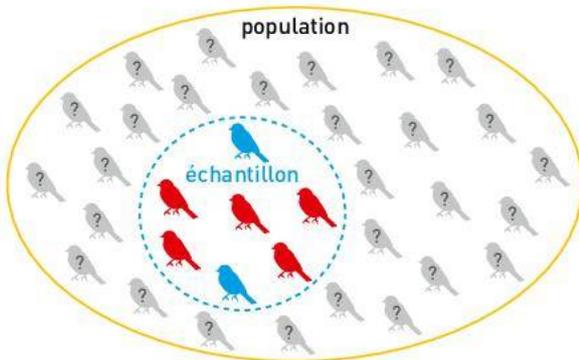
Fig. 5 : Taux d'extinction d'espèces dans différentes familles depuis 1500. D'après l'UICN.

Le vocabulaire à retenir

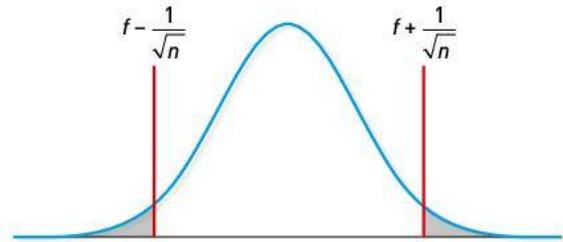
- **Abondance** : nombre d'individus d'une population donnée.
- **Richesse spécifique** : nombre d'espèces différentes dans un écosystème.
- **Échantillon** : groupe d'individus représentatifs de l'ensemble d'une population.
- **Structure génétique** : fréquences des allèles et des génotypes au sein d'une population.
- **Fragmentation** : séparation d'un territoire et de ses populations en plusieurs unités de plus petite taille.
- **Intervalle de confiance** : intervalle de valeurs contenant la fréquence ou la proportion recherchée, pour un niveau de confiance donnée.
- **Équilibre de Hardy-Weinberg** : équilibre théorique de la structure génétique d'une population de taille infinie où tous les individus se reproduisent aléatoirement et qui ne subit aucune force évolutive.



1 L'échantillonnage des écosystèmes

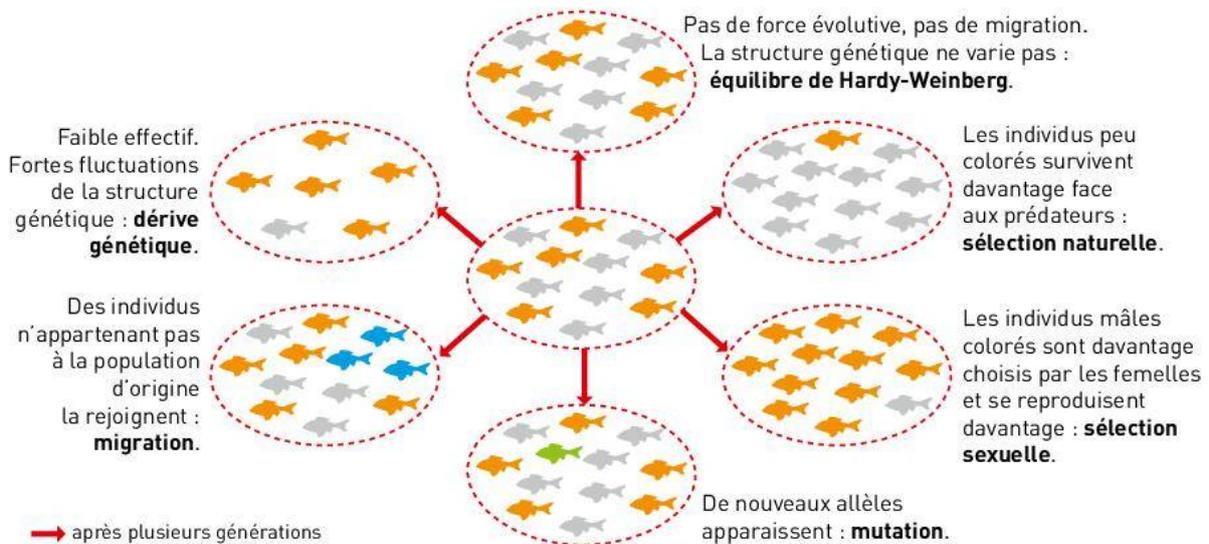


L'échantillonnage permet d'estimer l'effectif d'une population ou la fréquence d'un caractère au sein de celle-ci.

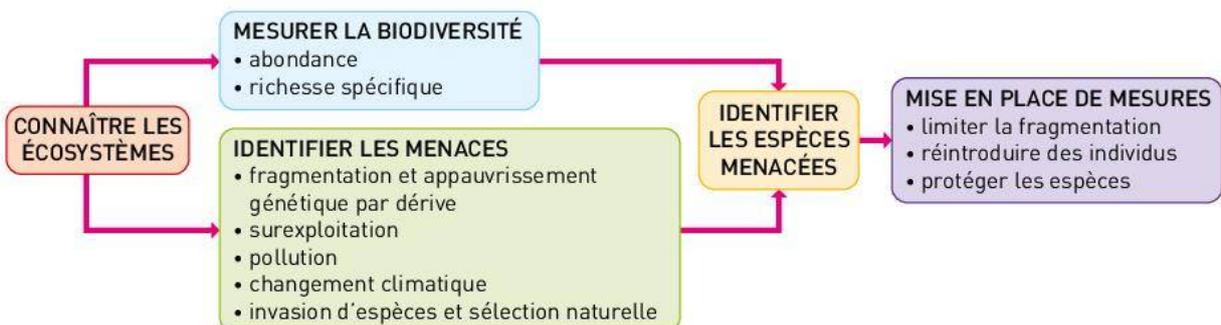


Il y a 95 % de chances que la fréquence du caractère étudié (f) soit compris dans cet **intervalle de confiance** (n étant l'effectif de l'échantillon).

2 L'évolution génétique des populations



3 La protection de la biodiversité



Rappels du programme de Term spécialité SVT

Tiré du livre de SVT Edition Bordas (pour ceux qui ont suivi cette Spécialité)

Cela sera repris en remédiation pour les élèves n'ayant pas suivi cette spécialité en Terminale

L'origine du génotype des individus

Préparez
le Grand oral
p. 519



1 Stabilité génétique et évolution clonale

Des mutations dans le clone cellulaire qui constitue un individu

Un individu est constitué de cellules qui résultent de mitoses à partir d'une cellule-œuf initiale. Ce processus de multiplication permet d'obtenir un ensemble de cellules en théorie génétiquement identiques, c'est-à-dire un **clone**, puisque la mitose est précédée d'un mécanisme efficace de copie de l'information génétique, la réplication de l'ADN. Cependant, cette copie de l'ADN n'est pas totalement fiable : on estime que le taux d'erreur est de 1 pour 10^9 nucléotides copiés, à l'origine des **mutations**. En prenant en compte la taille du génome humain ($6,4 \times 10^9$ paires de nucléotides) ainsi que le nombre de divisions qui ont lieu au cours d'une vie humaine (estimé à 10^{17}), une diversité génétique existe chez les cellules constituant un individu.

Un individu : une mosaïque de sous-clones génétiquement différents

Chaque individu est donc constitué d'une mosaïque de clones présentant de faibles variations génétiques liées à ces mutations accumulées. Ces clones sont constitués de cellules séparées (cas des cellules sanguines) ou de cellules restant associées. Les mutations et autres accidents génétiques affectant une cellule deviennent pérennes pour toute la lignée cellulaire qui dérive du mutant, formant ainsi un sous-clone particulier.

2 Le brassage des génomes assuré par la reproduction sexuée

Une réunion de deux génomes lors de la fécondation

La **fécondation** est la fusion de deux gamètes apportant chacun un lot **haploïde** (n) de chromosomes. La **cellule-œuf** qui en résulte est donc **diploïde** ($2n$).

Les deux génomes qui participent à la fécondation sont d'origine indépendante et apportent chacun un allèle de chaque gène. Des paires d'allèles sont ainsi constituées : si les deux allèles sont identiques, l'organisme est dit **homozygote** pour ce gène, il est **hétérozygote** si les deux allèles sont différents.

Dans une cellule diploïde, il y a donc deux allèles pour chaque gène : si le phénotype résulte de l'expression d'un seul des deux allèles, on parle de **dominance**. Au

contraire, le phénotype alternatif, qui nécessite que les deux allèles soient identiques pour être exprimé, est qualifié de **récessif**. Dans les cas où les deux allèles interviennent à part égale dans la réalisation du phénotype, on parle de **codominance**.

Le brassage génétique résultant de la méiose

La méiose permet d'obtenir des cellules haploïdes à partir de cellules diploïdes : en première division, les chromosomes homologues se séparent l'un de l'autre (anaphase), de manière indépendante pour chacune des paires. En fin de méiose, chaque cellule produite reçoit, avec une probabilité équivalente, l'un ou l'autre des chromosomes de chaque paire. On parle alors de **brassage génétique interchromosomique**. Le nombre de combinaisons chromosomiques différentes qu'il est possible d'obtenir par ce mécanisme augmente avec le nombre de paires de chromosomes : pour n paires de chromosomes, un individu peut former 2^n gamètes différenciant par leur assortiment de chromosomes.

La méiose modifie également la répartition des allèles sur les chromosomes. Au cours de la prophase de la première division, les chromosomes homologues étroitement accolés voient leurs chromatides entrer en contact en certains points nommés **chiasm**. Les chromatides se cassent et se ressoudent, conduisant ainsi à un échange d'une portion de chromosome. Ce mécanisme, appelé **crossing-over**, est aléatoire quant à sa localisation et permet l'échange d'allèles entre deux chromosomes homologues. On parle de **brassage intrachromosomique**. Ce n'est pas une anomalie : il se produit fréquemment et contribue de manière très importante à la diversité génétique des individus.

La méiose est donc à l'origine d'un double brassage génétique : pour chaque gène à l'état hétérozygote, chaque cellule issue de la méiose recevra au hasard un seul des deux allèles présents, les **combinaisons d'allèles** pouvant être obtenues étant d'autant plus nombreuses que le nombre de gènes à l'état hétérozygote est élevé. Si l'on envisage le cas de deux paires d'allèles, deux situations sont possibles, selon la localisation chromosomique des gènes impliqués :

– Si les gènes sont **indépendants**, c'est-à-dire localisés sur des **chromosomes différents**, quatre combinaisons différentes sont possibles et équiprobables. Ces probabilités ne résultent que de la distribution aléatoire et indépendante des allèles de chaque gène :



– Si au contraire les gènes sont **liés**, c'est-à-dire localisés sur une **même paire de chromosomes**, le brassage intrachromosomique modifie la distribution des allèles portés par les chromosomes homologues, avant que ceux-ci ne soient distribués au hasard. Si la recombinaison intrachromosomique ne se produit pas entre les locus des deux gènes étudiés, les deux allèles situés sur un même chromosome sont hérités en même temps. Si la recombinaison se produit entre les locus des deux gènes, elle crée deux nouvelles combinaisons d'allèles. La probabilité de ce second cas est variable, et d'autant plus faible que les locus des gènes étudiés sont proches sur le chromosome. Les quatre combinaisons d'allèles ne sont alors pas équiprobables (les phénotypes recombinés sont minoritaires, les phénotypes parentaux sont majoritaires) :

Pas de crossing-over entre les locus des deux gènes



2 combinaisons majoritaires équiprobables entre elles

Crossing-over entre les locus des deux gènes



2 combinaisons minoritaires équiprobables entre elles

3

Principes de base de l'analyse génétique

La réalisation de croisements et l'interprétation des résultats

L'analyse statistique de résultats de croisements d'individus qui ne diffèrent que par quelques caractères permet de comprendre le brassage génétique réalisé par la méiose et la fécondation qui sont à l'origine des descendants.

Les études reposent le plus souvent sur un croisement initial entre des individus de **lignées pures**, c'est à dire homozygotes pour leurs gènes. Ces lignées parentales sont obtenues en laboratoire à l'issue de longues séries de croisements.

Les individus issus de ces croisements initiaux constituent la première génération, nommée F1. Leurs parents étant homozygotes, ces descendants sont nécessairement **hétérozygotes** pour les gènes étudiés. L'observation de leur phénotype permet de déterminer la **dominance** ou la **récessivité** des allèles présents.

L'étude se poursuit par un **croisement-test** : un individu hétérozygote de la génération F1 est croisé à son tour avec un individu porteur des allèles récessifs à l'état homozygote. Ce dernier produit des gamètes qui ont tous le même génotype, et qui n'apportent que des allèles récessifs. La descendance obtenue ne devra sa diversité qu'à celle des gamètes produits par l'individu F1. Dans le cas où deux gènes sont impliqués :

– si les deux gènes sont **indépendants** la descendance contiendra autant d'individus à phénotypes parentaux

(phénotypiquement semblables à leurs parents) que recombinés (possédant un caractère de chacun de leurs parents), car seul le brassage interchromosomique aura été impliqué dans l'obtention des gamètes de F1 ;

– si les deux gènes sont **liés**, les phénotypes parentaux seront en nombre plus important que les phénotypes recombinés, ces derniers étant alors le fruit du brassage intrachromosomique, leur proportion dépendant de la distance entre les deux gènes.

Le cas des gènes situés sur les **chromosomes sexuels** obéit à une logique particulière : chez de nombreuses espèces, les femelles possèdent deux chromosomes homologues (et donc deux allèles pour chaque gène). Les mâles, qui ont deux chromosomes sexuels différents, possèdent alors certains allèles qui ne sont présents qu'en un seul exemplaire.

Mener une analyse génétique dans l'espèce humaine

Dans l'espèce humaine, le faible nombre de descendants par couple interdit toute analyse statistique basée sur une seule famille. Néanmoins, l'analyse d'un **arbre généalogique** permet d'apporter des informations :

- si le caractère étudié apparaît chez un enfant alors qu'il est absent chez ses parents, l'allèle responsable est **récessif**, tandis que s'il est présent dans toutes les générations cet allèle est dominant. Cependant, il faut aussi considérer la probabilité d'une **mutation nouvelle**, apparue chez l'enfant alors que les parents ne la possèdent pas ;
- si le caractère étudié est récessif mais concerne de façon beaucoup plus importante les hommes que les femmes, cela signifie que le gène est localisé sur le **chromosome X**. En effet, il suffit d'un allèle muté pour qu'un homme exprime le phénotype correspondant alors qu'il faudra la réunion des deux allèles mutés pour que la femme exprime le caractère.

La détermination du mode de transmission d'un allèle permet, par exemple dans le cas d'une maladie d'origine génétique, de procéder à une **évaluation du risque**.

Les progrès dans le domaine de la **génétique moléculaire** (techniques de séquençage de l'ADN, PCR) permettent un accès de plus en plus rapide et de moins en moins coûteux aux données génétiques individuelles. Il est ainsi possible, grâce à des tests rapides, de déterminer dans une famille où un risque de maladie génétique existe quels allèles sont présents chez les parents et leurs enfants. La **bio-informatique** permet aujourd'hui d'accéder à des bases de données provenant de milliers de personnes dans le monde. Les chercheurs peuvent, en exploitant ces masses d'informations, relier certains phénotypes observés à des mutations précises, faisant avancer la recherche génétique et la prise en charge médicale des patients.

À retenir



- **Stabilité génétique et évolution clonale**

Même si elles dérivent toutes d'une cellule-œuf initiale multipliée par mitoses, les cellules d'un individu ne sont pas parfaitement identiques sur le plan génétique. Lors de la réplication de l'ADN qui précède chaque mitose, des **mutations** ont lieu et sont présentes dans tout le sous-clone dérivant de la première cellule mutée. Chaque individu est donc une **mosaïque de clones** dont les cellules ont accumulé des mutations tout au long de la vie.

- **Le brassage des génomes à chaque génération**

La **fécondation** produit une cellule-œuf diploïde en réunissant les génomes de deux cellules haploïdes, chacune apportant un lot d'allèles. Chaque gène est présent sous deux formes alléliques identiques (homozygotie) ou non (hétérozygotie).

La **méiose** produit des cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde, chaque cellule recevant au hasard l'un des deux allèles de chaque paire. Pour deux gènes hétérozygotes, quatre combinaisons alléliques différentes sont possibles. Elles sont équiprobables si les deux gènes sont indépendants (**brassage interchromosomique**), non équiprobables s'ils sont liés (**brassage intrachromosomique résultant de crossing-over**). Plus le nombre de gènes à l'état hétérozygote est grand, plus la méiose génère une grande diversité de combinaisons génétiques.

- **Les principes de base de l'analyse génétique**

Les brassages génétiques liés à la méiose et à la fécondation sont à l'origine de la diversité phénotypique des individus. L'étude de la transmission de caractères de génération en génération reflète donc la transmission des allèles.

L'analyse génétique est généralement une étude statistique de **croisements** entre individus à partir de lignées pures qui ne diffèrent que par quelques caractères. Le phénotype des hétérozygotes de la génération F1 permet de déterminer la **dominance** ou la **récessivité** des allèles. Un croisement-test révèle si les **gènes** étudiés sont **liés** ou **indépendants**.

Dans l'espèce humaine, l'analyse génétique se fait par une **étude généalogique** : l'observation des phénotypes des membres d'une famille permet de déterminer le **mode de transmission d'un allèle** (dominant ou récessif, localisation sur un chromosome sexuel ou non) et d'évaluer un **risque génétique**.

Les techniques de **séquençage de l'ADN** révèlent directement le génotype d'un individu. La **bio-informatique** constitue et exploite des bases de données génétiques pour identifier l'association entre certains gènes mutés et certains phénotypes.

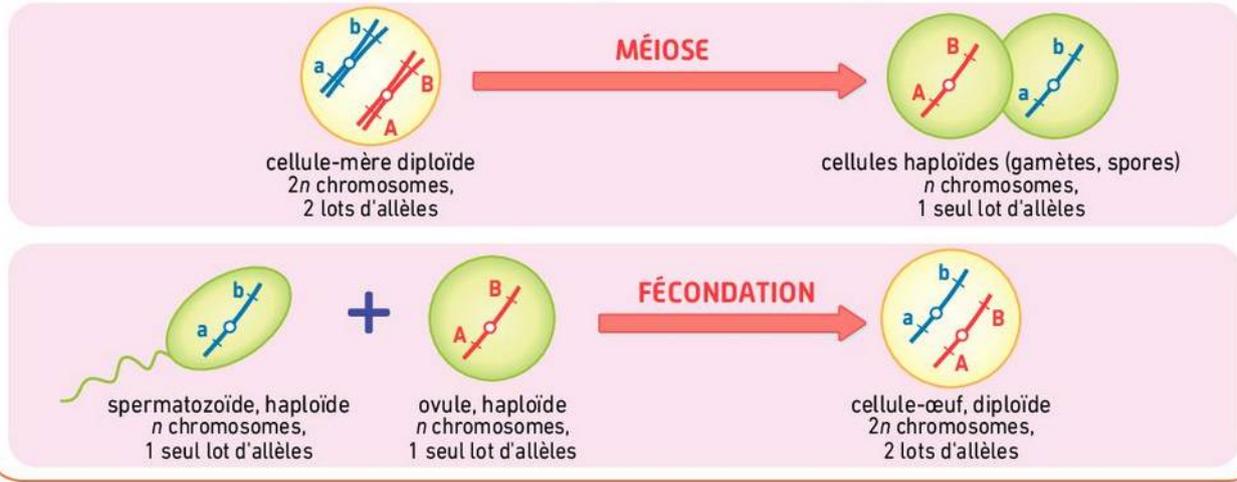
Mots-clés

Brassage interchromosomique ● Brassage intrachromosomique ● Clone ● Combinaison d'allèles ● Croisement-test
● Chromosomes homologues ● Crossing-over ● Diversité des gamètes ● Dominance ● Fécondation
● Gènes indépendants ● Gènes liés ● Hétérozygote ● Homozygote ● Méiose ● Récessivité

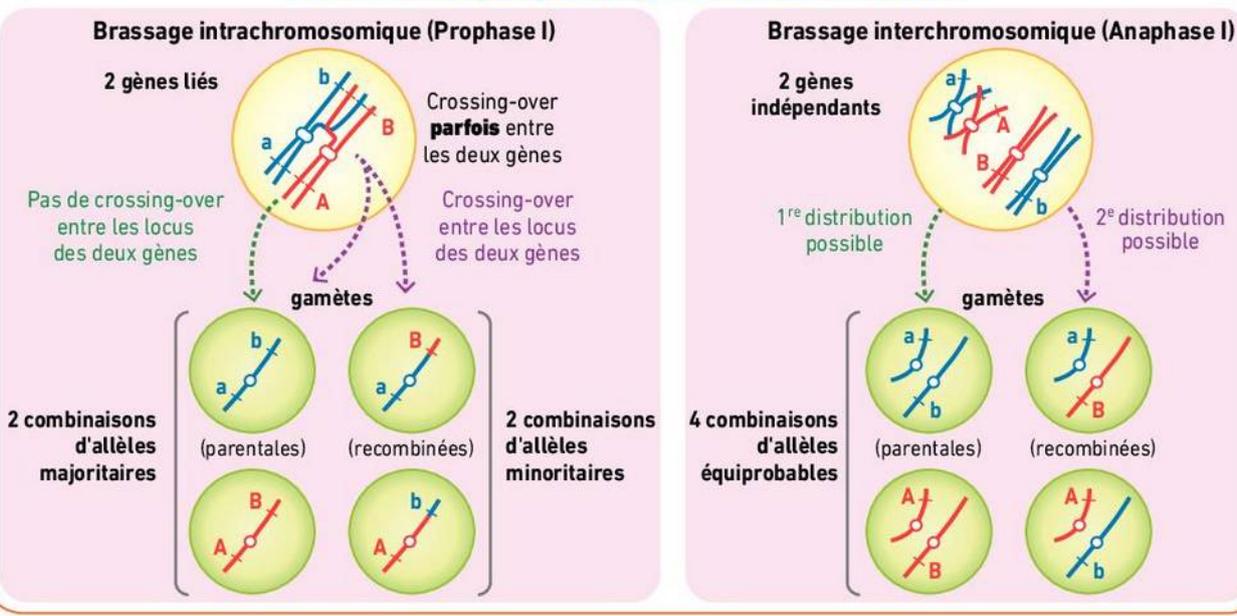
Schéma bilan

L'origine du génotype des individus

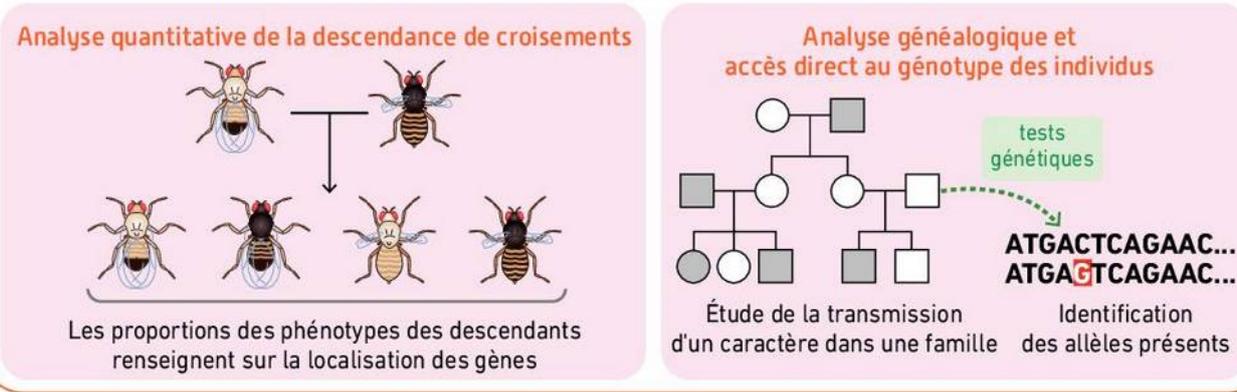
Méiose et fécondation, deux phénomènes complémentaires



Deux brassages génétiques lors de la méiose



Deux méthodes d'étude de la transmission des allèles



Accidents génétiques de la méiose et diversification des génomes

Préparez le Grand oral p. 519



DYS

1 Des modifications du caryotype

La méiose, à l'origine d'anomalies chromosomiques

Des accidents chromosomiques peuvent survenir au cours de la méiose. Une **migration anormale** d'un chromosome en anaphase (I ou II) se traduit par la formation de gamètes ayant un chromosome supplémentaire ou au contraire un chromosome en moins. Après fécondation, la cellule-œuf sera **trisomique** (possédant pour l'un de ses chromosomes trois exemplaires au lieu de deux) ou **monosomique** (possédant pour l'un de ses chromosomes un seul exemplaire au lieu de deux).

Les chromosomes peuvent subir d'autres types d'anomalies :

- fission : scission d'un chromosome en deux chromosomes distincts ;
- fusion : soudure de deux chromosomes non homologues ;
- inversion : cassure d'un chromosome, retournement puis soudure ;
- translocation : cassure de deux chromosomes non homologues et soudure après échange réciproque d'une partie de chromosome.

Ces anomalies ont des **conséquences importantes** pour l'individu qui en hérite. Très souvent, les anomalies chromosomiques sont incompatibles avec la vie et conduisent à des avortements spontanés en début de grossesse (« fausses couches »). Dans l'espèce humaine, certaines anomalies sont cependant viables comme par exemple la trisomie 21 (la plus fréquente) ou la monosomie X.

Une source de diversification génomique

On constate que des espèces étroitement apparentées (les primates hominoïdes par exemple) ont des caryotypes présentant de fortes similitudes. La comparaison de leurs caryotypes montre une variation du nombre de chromosomes due à des **fusions** ou des **inversions**.

Ainsi, aussi paradoxal que cela puisse paraître, on observe que des anomalies chromosomiques dues à des méioses anormales sont une source de **diversification des caryotypes** et jouent un rôle important dans l'évolution des espèces. En effet, des configurations différentes du caryotype constituent des **barrières entre populations**, conduisant à un isolement reproducteur, prélude d'un événement de spéciation.

2 Un enrichissement du génome

La méiose, à l'origine de la duplication des gènes

Lors d'un crossing-over en prophase I de méiose, les chromosomes homologues appariés sont habituellement parfaitement alignés, de telle sorte qu'un chiasma se situe au même niveau sur chaque chromosome : il en résulte un simple échange d'allèles entre les deux chromosomes, sans gain ni perte de gène.

Mais il peut arriver que l'appariement des chromosomes homologues soit décalé, le chiasma ne se situant pas au même niveau sur les deux chromosomes. Les portions de chromatides échangées n'étant pas de même longueur, un chromosome se retrouve porteur d'une portion en double exemplaire, alors qu'elle a été perdue par son homologue. Un tel **crossing-over inégal** constitue une anomalie. Ce phénomène est qualifié de **duplication génique**.

D'importantes conséquences pour l'évolution des espèces

L'**enrichissement du génome** par duplication génique est un événement qui n'est pas rare dans l'histoire de l'évolution des êtres vivants : chez les mammifères par exemple, il apparaît que de nombreuses espèces possèdent plusieurs copies du gène codant pour l'amylase salivaire, permettant une meilleure adaptation à leur régime alimentaire. Au sein même de l'espèce humaine, il existe une diversité du nombre de gènes codant pour cette enzyme.

Cependant, les exemplaires dupliqués d'un même gène peuvent subir des **mutations** aléatoires, rendant ces gènes de plus en plus différents avec le temps. Cela peut aboutir à la fabrication de diverses protéines, procurant de nouvelles fonctions aux cellules qui expriment ces gènes. C'est ainsi que se constitue ce qu'on appelle une **famille multigénique** : des duplications suivies de mutations produisent un ensemble de gènes différents mais présentant des ressemblances de séquences dues à leur origine commune.

Il est possible de reconstituer l'histoire d'une famille multigénique en comparant deux à deux les gènes qui en font partie (ou les protéines qu'ils codent), et en considérant que plus leurs ressemblances sont grandes, plus la duplication génique qui leur a donné naissance est récente.

Dans le génome humain, on a pu identifier de nombreuses familles multigéniques (familles des globines, des hormones hypophysaires, des opsines...). Ainsi, il apparaît qu'une part importante de la **diversité des génomes** résulte de duplications accidentelles suivies de mutations.

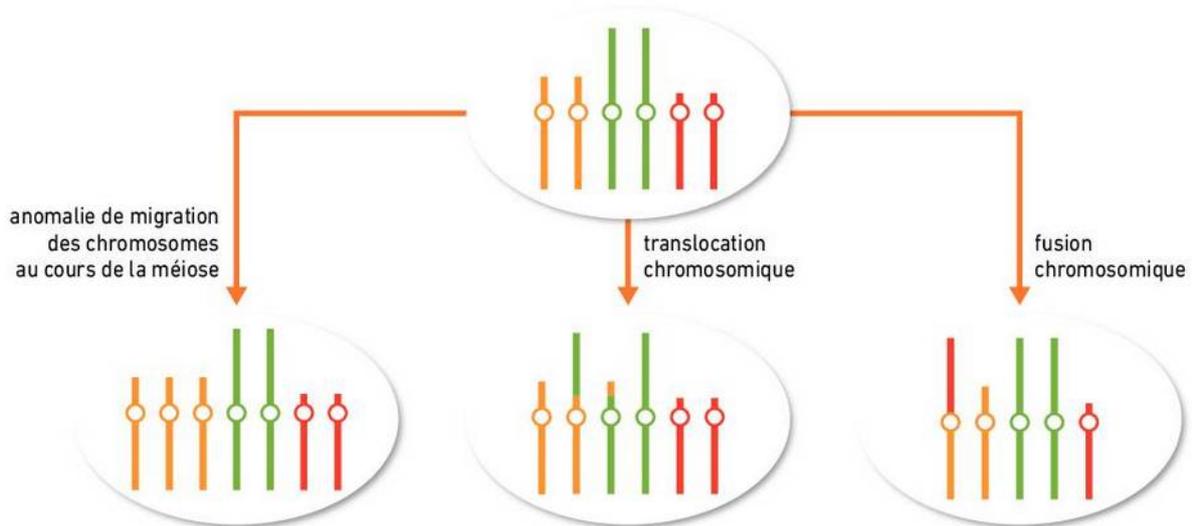
Mots-clés

Anomalie chromosomique • Barrière entre populations • Crossing-over inégal • Diversification génomique • Duplication génique • Famille multigénique • Translocation • Transposition

Schéma bilan

Accidents génétiques de la méiose et diversification des génomes

Des accidents générateurs d'une diversification du caryotype

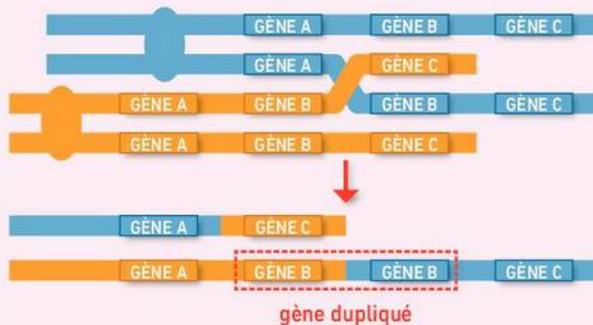


- ▶ anomalies **souvent létales** avant la naissance
- ▶ peuvent néanmoins **diversifier le caryotype**
- ▶ mise en place d'une **barrière de reproduction** entre populations

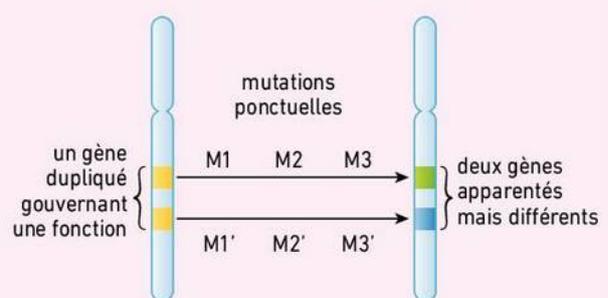
Des mécanismes génétiques qui enrichissent les génomes

Un mécanisme qui multiplie les gènes

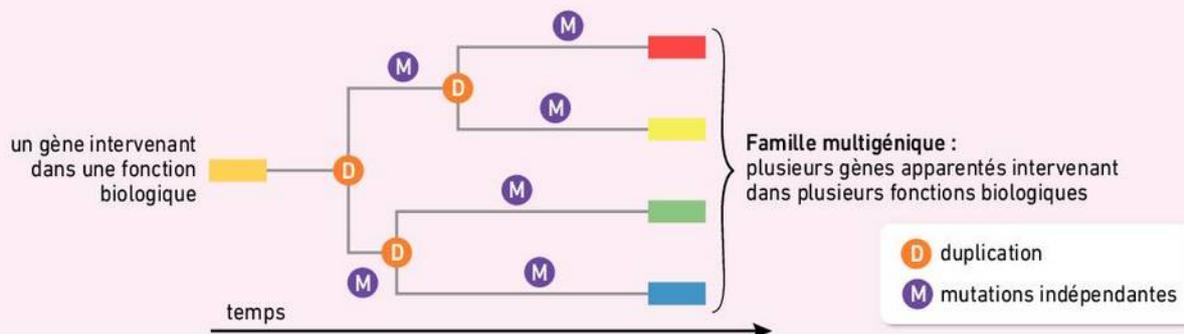
crossing-over inégal



Des gènes apparentés qui se différencient au cours du temps



De nouveaux gènes qui confèrent de nouvelles fonctions



Transferts horizontaux de gènes et endosymbioses

Préparez
le Grand oral
p. 519



Les mutations, les modifications accidentelles des génomes et le brassage génétique réalisé par la reproduction sexuée assurent à chaque génération l'émergence de nouveaux génomes individuels. Il existe encore d'autres processus de diversification et de complexification des génomes.

1

Les transferts horizontaux de gènes

Des expériences historiques

Les pneumocoques de souche S sont des bactéries virulentes (responsables de pneumonies) car, dotées d'une capsule, elles ne sont pas détruites par le système immunitaire. Les pneumocoques de la souche R, dépourvues de capsule, ne sont pas pathogènes. En 1928, le microbiologiste anglais F. Griffith fait une découverte surprenante : l'injection simultanée à des souris de bactéries R vivantes et de bactéries S tuées se révèle mortelle. Les souris meurent et de nombreux pneumocoques pourvus de capsules, donc de souche S, sont identifiés chez les souris. Il y a eu transfert d'un caractère héréditaire des bactéries S mortes aux bactéries R vivantes. En 1944, les expériences d'Avery, McLeod et McCarty ont démontré que c'est de l'ADN qui est transféré des bactéries S aux bactéries R. Les bactéries R ont subi une « transformation » par intégration à leur génome d'un fragment d'ADN provenant des bactéries S. La transformation s'est faite grâce à un **transfert horizontal de gènes**, c'est-à-dire un transfert d'un organisme à un autre **non lié à la reproduction**.

Des transferts par divers processus

Quand des bactéries sont détruites, elles libèrent des quantités considérables d'ADN dans leur environnement. Dans certaines conditions, ces fragments d'ADN libres, pouvant contenir plusieurs gènes, sont intégrés par des bactéries. Ce processus, appelé **transformation**, s'observe toutefois chez un nombre limité d'espèces, présentes notamment dans le sol et les écosystèmes aquatiques. Les bactéries possèdent de petites molécules d'ADN généralement circulaires, appelées **plasmides**. Ces plasmides sont très facilement transférés entre bactéries de la même espèce ou d'espèces différentes, grâce à l'établissement de « ponts cytoplasmiques » : ce phénomène est appelé **conjugaison**. Les plasmides bactériens peuvent aussi être transférés à des cellules eucaryotes. Les **virus** constituent les **vecteurs de gènes** les plus abondants de la planète. En parasitant des cellules (bactéries ou cellules eucaryotes), ils y transfèrent leurs gènes, qui peuvent parfois s'intégrer au génome de la cellule hôte.

Les particules virales fabriquées par les cellules parasitées peuvent également incorporer des gènes appartenant aux cellules hôtes. Ces gènes pourront être transférés à d'autres cellules au cours d'une infection ultérieure.

Un rôle majeur dans l'évolution

La comparaison de séquences d'ADN d'espèces différentes permet de construire des arbres de parenté ou **arbres phylogénétiques** : en effet, des similitudes génétiques traduisent généralement un héritage commun plus ou moins récent, transmis ensuite de générations en générations. On parle dans ce cas de transferts verticaux des gènes.

Mais il arrive que l'on identifie pour un gène particulier une similitude étonnante entre espèces éloignées. Dans ce cas, la proximité génétique ainsi révélée ne traduit pas une filiation entre les espèces concernées, mais résulte d'un transfert horizontal de gène.

En effet, du fait de l'**universalité de l'ADN**, des transferts horizontaux de gènes sont possibles entre espèces parfois très éloignées dans l'arbre du vivant (animaux, bactéries, archées, protistes, plantes, champignons...). Ainsi, il a été établi que l'ADN humain contient près de 10 % de gènes d'origine virale. Les transferts horizontaux de gènes constituent une **source de diversification** des êtres vivants, permettant une adaptation rapide aux variations de l'environnement. Ils ont joué un rôle important dans l'évolution des populations et des espèces.

Si l'on fait figurer sur un arbre phylogénétique les transferts horizontaux, on obtient un « **réseau phylogénétique** » qui traduit la complexité de l'histoire évolutive du vivant.

Transferts horizontaux de gènes et santé humaine

Au sein des populations bactériennes, les transferts horizontaux par le biais des plasmides constituent le principal mécanisme de la propagation rapide de gènes de virulence et de gènes de **résistance aux antibiotiques**. Ces transferts sont favorisés par l'abondance des bactéries dans notre environnement proche, notamment au sein des microbiotes. Leur fréquence pose de graves problèmes de santé, dus à l'apparition et à la sélection de bactéries résistantes, voire multirésistantes, à un antibiotique.

Des **applications biotechnologiques** résultent de la connaissance des mécanismes de transferts horizontaux de gènes. L'intégration et l'expression de gènes humains dans des microorganismes à forte capacité de multiplication (bactéries et levures) permet la production massive de **molécules d'intérêt** utiles à la santé humaine (insuline par exemple).

2 Les endosymbioses, une diversification par fusion entre organismes

► L'endosymbiose, une association étroite entre êtres vivants

La symbiose est une association durable à bénéfices réciproques entre organismes d'espèces différentes. Cette association peut être particulièrement étroite si l'un des partenaires vit à l'intérieur des cellules ou des tissus de l'autre (zooxanthelles dans les tissus des polypes constructeurs de coraux, bactéries *Buchnera* chez les pucerons du pois) : on parle alors d'**endosymbiose**. Au sein des cellules de l'hôte, l'endosymbiote est internalisé dans une vésicule cytoplasmique et subit souvent une régression de certains de ses caractères (perte de paroi, de flagelle).

Dans la plupart des cas, l'endosymbiote apporte à son hôte des avantages d'ordre nutritionnel (molécules organiques issues de la photosynthèse, vitamines, acides aminés essentiels...) Réciproquement, l'organisme hôte procure à l'endosymbiote un milieu stable et protégé, et parfois certains nutriments. Il y a ainsi, pour les deux organismes, acquisition de nouvelles potentialités permettant une meilleure adaptation aux ressources et contraintes du milieu.

L'association impose cependant des contraintes aux deux partenaires, nécessaires pour conserver leurs propriétés spécifiques. Par exemple, la récupération de l'énergie lumineuse par l'algue contraint le polype à vivre dans des eaux claires à faible profondeur et à produire des molécules antioxydantes pour se protéger du dioxygène rejeté en excès par la photosynthèse.

L'endosymbiose associe les génomes des deux partenaires au sein d'une même cellule. Souvent, celui de l'endosymbiote régresse, cette régression s'accompagnant d'un transfert de gènes vers le noyau de la cellule hôte, facilité par l'extrême proximité des partenaires. Ce transfert contribue à la complexification du génome de la cellule hôte qui se trouve enrichi de nouvelles potentialités.

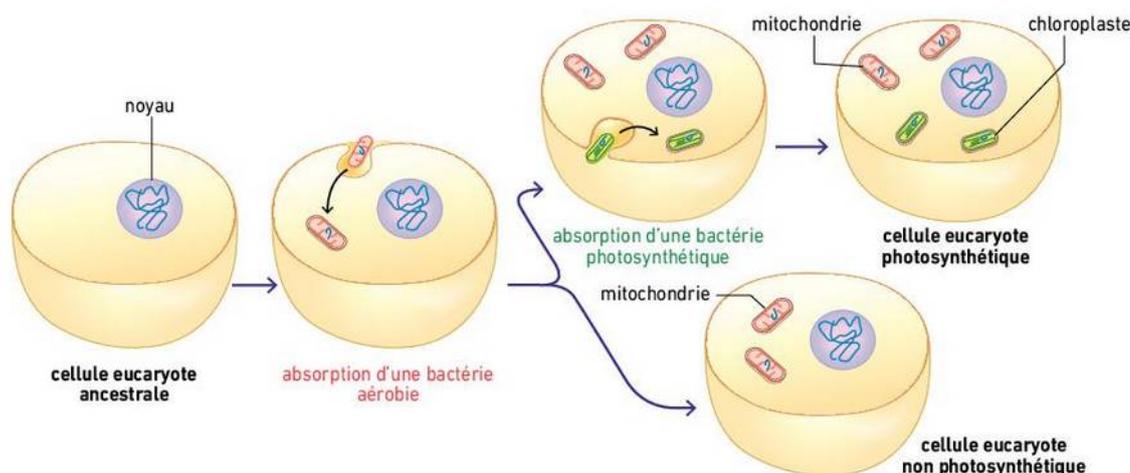
► L'origine endosymbiotique des organites

À partir de la fin du XIX^e siècle, des botanistes ont suggéré l'idée que les chloroplastes et les mitochondries des **cellules eucaryotes** provenaient de l'endosymbiose de bactéries. Largement ignorée jusqu'aux années 1960, cette idée a été reprise et défendue sous le nom de « théorie endosymbiotique » par Lynn Margulis.

Cette hypothèse a d'abord été étayée par de nombreuses ressemblances entre les organites et les bactéries :

- La taille des mitochondries et des chloroplastes est comparable à celle des bactéries (quelques μm).
- Ces deux organites sont dotés d'une double membrane. Une membrane externe analogue à la membrane plasmique (résultat de l'endocytose) et une membrane interne présentant des analogies avec la membrane bactérienne. Le système de membrane interne des cyanobactéries renferme, tout comme les thylakoïdes des chloroplastes, des pigments chlorophylliens assurant la capture d'énergie lumineuse et la réalisation de la photosynthèse.
- Mitochondries et chloroplastes renferment de petites molécules d'ADN nu, comme chez les bactéries. Cet ADN se réplique indépendamment de l'ADN nucléaire, et commande la synthèse de protéines fabriquées dans les organites grâce à des ribosomes de type bactérien.
- Chloroplastes et mitochondries se divisent par étranglement médian après avoir dupliqué leur ADN, comme le font les bactéries.

La comparaison des génomes a confirmé l'hypothèse de l'origine endosymbiotique des organites : l'ADN mitochondrial et chloroplastique est en effet plus étroitement apparenté à celui des bactéries et des cyanobactéries qu'à celui de l'ADN nucléaire des cellules eucaryotes. Il y a environ 1,5 à 2 milliards d'années, des cellules eucaryotes primitives ont donc absorbé par endocytose des bactéries aérobies pratiquant la respiration, qui sont devenues des **mitochondries**. Ce phénomène s'est également produit à plusieurs reprises avec l'absorption de cyanobactéries photosynthétiques, à l'origine des **chloroplastes**. Capables de divisions autonomes, les mitochondries et chloroplastes, dotés de leur propre information génétique, sont transmises aux cellules filles : on parle d'**hérédité cytoplasmique**.



■ Le modèle endosymbiotique de l'origine des mitochondries et des chloroplastes.

À retenir

► Transferts verticaux et horizontaux de matériel génétique

À côté des transferts verticaux de gènes, assurés de génération en génération par la reproduction sexuée, il existe des **transferts horizontaux** entre organismes parfois non étroitement apparentés. Ces transferts horizontaux se font par divers mécanismes : incorporation d'**ADN libre** par des bactéries, **conjugaison** bactérienne, **transmission par des virus** jouant le rôle de vecteurs de gènes.

► Une source de complexification et de diversification du vivant

Du fait de l'**universalité de l'ADN**, de sa structure et des modalités de son expression (code génétique), les gènes transférés horizontalement peuvent **enrichir les génomes**. L'analyse de l'ADN d'une espèce montre qu'une fraction non négligeable de son génome résulte de transferts horizontaux de gènes ayant joué un **rôle important dans son histoire évolutive**.

► Transferts horizontaux de gènes et santé humaine

Les transferts horizontaux de matériel génétique ont un impact dans le domaine de la santé humaine : c'est en effet le plus souvent par transfert horizontal que les bactéries deviennent **résistantes aux antibiotiques**.

L'Homme sait mettre à profit ces mécanismes pour réaliser artificiellement des transferts de gènes et faire produire par des bactéries ou des levures des **molécules d'intérêt thérapeutique**.

► Endosymbioses et diversification du vivant

Certains organismes incorporent au sein même de leurs cellules des organismes unicellulaires microscopiques. Une telle association, si elle est bénéfique pour les deux partenaires, constitue une **endosymbiose**. Souvent, le génome de la cellule intégrée régresse, mais certains de ses gènes sont transférés au génome de la cellule hôte. De telles endosymbioses sont fréquentes dans le monde vivant. En dotant les organismes qui en bénéficient de nouvelles propriétés, elles permettent une **meilleure adaptation à l'environnement** et jouent un rôle important dans leur évolution.

► L'origine des mitochondries et des chloroplastes

De nombreuses données, en particulier l'analyse de l'ADN, confirment que les mitochondries et les chloroplastes que l'on trouve dans les cellules eucaryotes **résultent d'endosymbioses de bactéries et cyanobactéries**. Ces organites, qui contiennent de l'ADN, sont transmis au cours des divisions cellulaires indépendamment de l'ADN nucléaire : c'est ce qu'on appelle l'**hérédité cytoplasmique**.

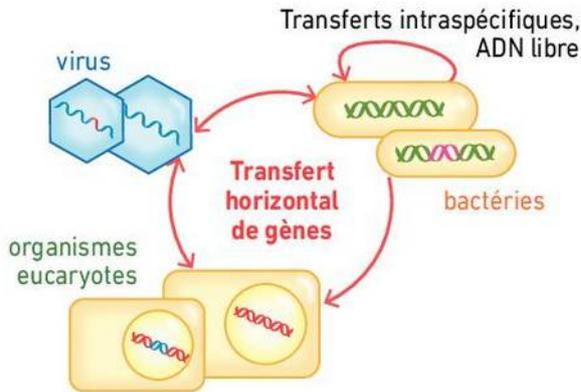
Mots-clés

Chloroplastes ● Complexification des génomes ● Endosymbiose ● Hérédité cytoplasmique ● Mitochondries ● Molécules d'intérêt ● Phylogénie ● Résistance aux antibiotiques ● Transferts horizontaux de gènes ● Universalité de l'ADN.

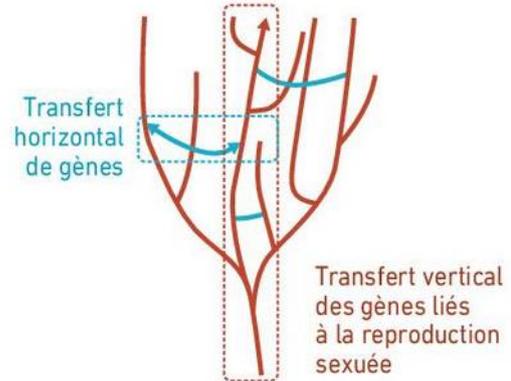
Transferts horizontaux de gènes et endosymbioses

Les échanges de gènes par transfert horizontal

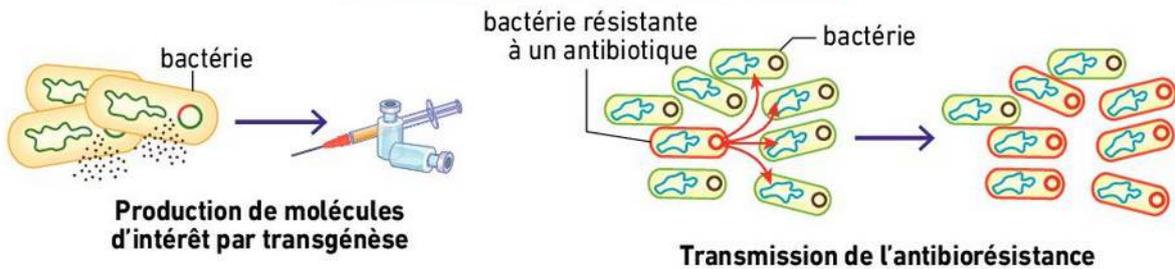
Des mécanismes non liés à la reproduction sexuée



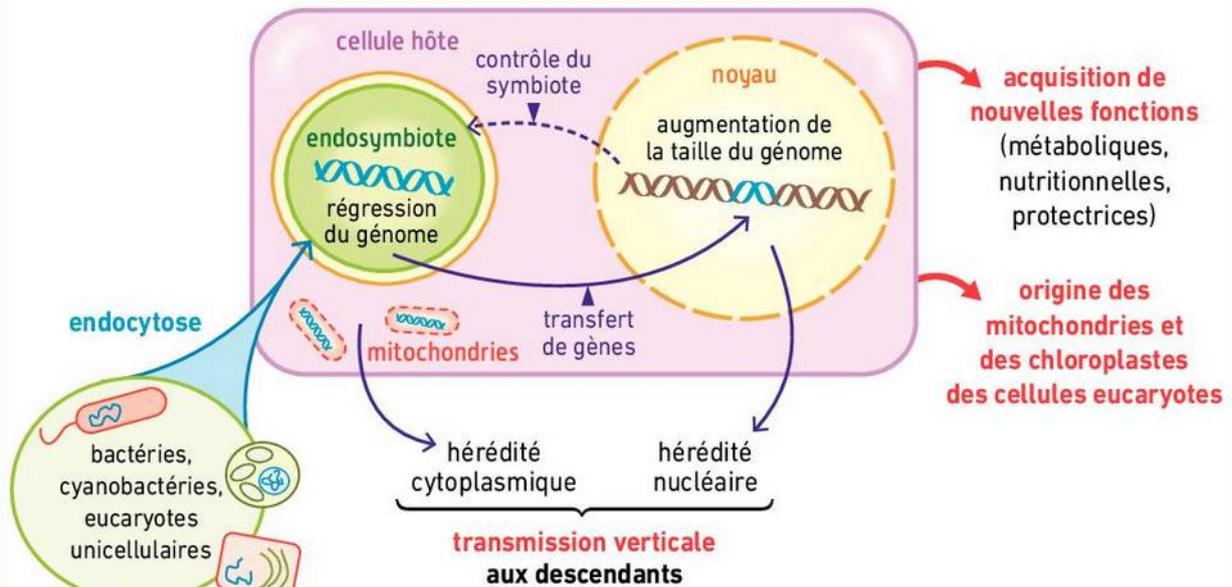
Un rôle important dans l'évolution



Des conséquences sur la santé humaine



L'enrichissement des génomes par endosymbiose



L'inéluctable évolution des génomes au sein des populations

Préparez
le Grand oral
p. 519



1 L'équilibre théorique de Hardy-Weinberg

Au début du ^{xx}e siècle, biologistes et mathématiciens élaborent les premiers modèles de génétique des populations. Il s'agit d'un domaine de la biologie qui étudie la **structure génétique d'une population**, c'est-à-dire la **fréquence des allèles** présents et son évolution au cours du temps.

Le premier de ces modèles, établi par G. H. **Hardy** et W. **Weinberg**, s'appuie sur une **population théorique** d'organismes diploïdes ayant recours à la reproduction sexuée, et sur plusieurs hypothèses simplificatrices :

- l'effectif de la population est infini ;
- la population est fermée (elle n'est pas l'objet de migrations) ;
- ni la sélection naturelle, ni la sélection sexuelle ne s'y exercent ;
- les mutations ne sont pas prises en compte.

Si toutes ces hypothèses sont respectées, ce modèle théorique prévoit que les fréquences des allèles portés par les organismes de cette population sont **stables** de génération en génération.

2 Les forces évolutives à l'œuvre

Dans les **conditions réelles**, cet équilibre théorique n'est **jamais atteint** car les hypothèses sur lesquelles repose le modèle de Hardy-Weinberg ne sont pratiquement jamais vérifiées. Quatre **forces évolutives** font varier les fréquences alléliques au cours du temps.

Les mutations

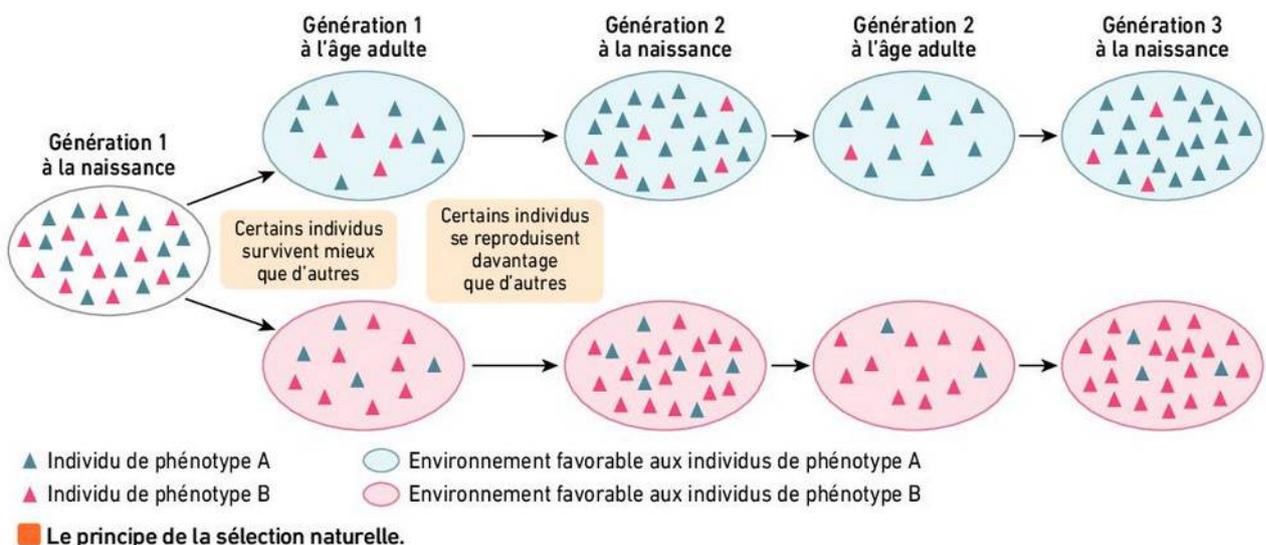
Certaines **mutations**, touchant les cellules sexuelles, peuvent introduire de nouveaux allèles dans la population, modifiant ainsi leurs fréquences relatives. Ces mutations sont cependant **rares** (de l'ordre de 0,0001 % pour un gène donné), ce qui fait que leur impact est très limité sur l'évolution des fréquences alléliques dans les populations, surtout si ces dernières présentent un effectif important.

Sélections naturelle et sexuelle

Dans la plupart des populations, la fréquence des allèles varie au cours du temps sous l'effet de différents facteurs de l'environnement : c'est la **sélection**.

Dans un environnement donné, certains allèles confèrent un **avantage sélectif** aux individus qui les possèdent en augmentant leur **succès reproducteur**, c'est-à-dire le nombre de descendants viables et fertiles qu'ils laissent à la génération suivante : ce sont des **allèles favorables**. Si l'environnement reste stable, la fréquence de ces allèles a tendance à augmenter de génération en génération, ce qui explique l'**adaptation** des populations à leur environnement. À l'inverse, certains allèles sont défavorables et leur fréquence a tendance à diminuer et ces allèles peuvent même disparaître.

Le **succès reproducteur** dépend de deux composantes : la **probabilité de survie de l'individu** jusqu'à l'âge adulte (donc l'adaptation de l'individu à son environnement) et sa **fécondité** (sa capacité à se reproduire et le nombre de descendants qu'il produit). Chez certaines espèces, l'accès à la reproduction dépend de caractères identifiables par les individus de sexe opposé : c'est la **sélection sexuelle**. Mais certains de ces caractères peuvent parfois diminuer les chances de survie de leur porteur. La sélection sexuelle résulte alors d'un **compromis** entre l'avantage que procure un caractère



pour l'accès aux partenaires sexuels, et l'inconvénient qu'ils entraînent pour la survie. Les **préférences sexuelles** sont également à l'origine d'écarts à l'équilibre de Hardy-Weinberg dans les populations réelles.

● La dérive génétique

Les populations réelles ne sont pas de taille infinie. Même en l'absence de sélection, la fréquence des allèles dans une population varie **sous l'effet du hasard** : c'est la **dérive génétique**. Celle-ci s'exerce sur les traits neutres c'est-à-dire qui ne confèrent aucun avantage ou désavantage sélectif, mais aussi sur les traits non neutres.

La dérive conduit à terme à la **fixation** ou à la **disparition** d'un allèle et donc à un **appauvrissement génétique** de la population. Elle est d'autant plus marquée que les **populations sont de petite taille**. Dans les petites populations isolées (du fait d'un **effet fondateur** à partir d'un petit groupe de migrants, ou à cause d'un événement diminuant drastiquement l'effectif d'une population) la dérive génétique peut jouer un rôle prépondérant dans l'évolution, parfois même à l'encontre de la sélection.

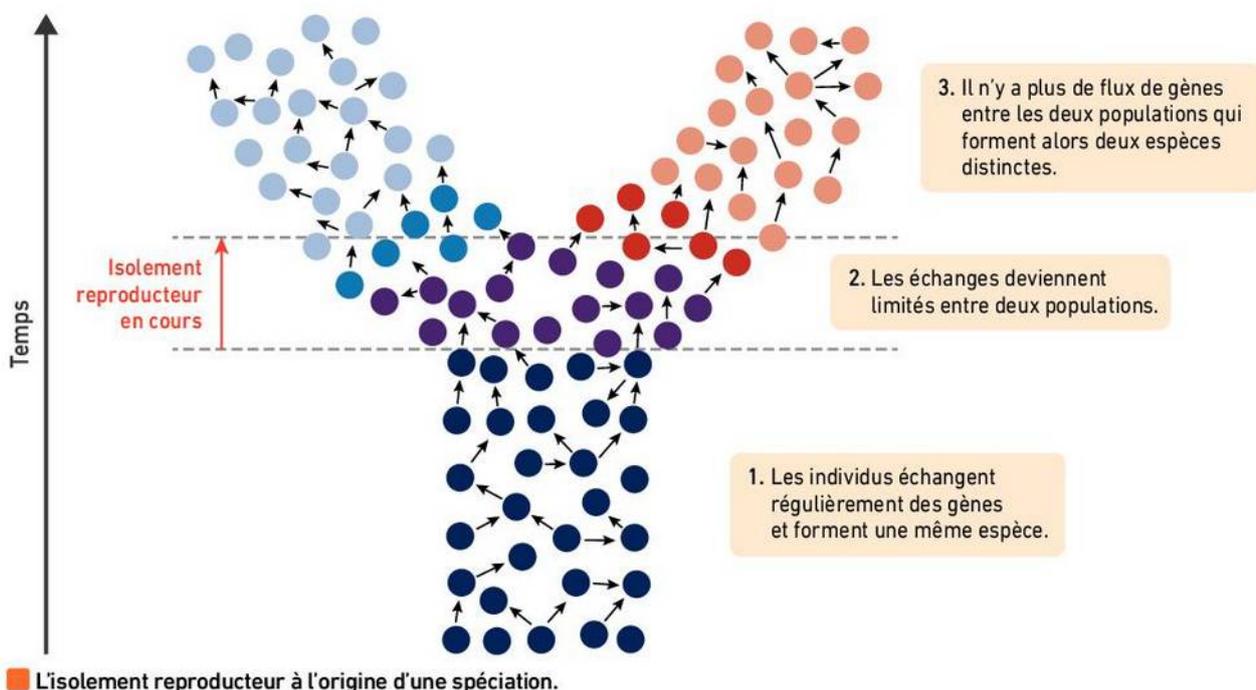
● Les migrations

L'équilibre de Hardy-Weinberg suppose une population fermée sur elle-même, sans arrivée ni départ d'individus. Or, dans la plupart des situations réelles, la migration d'individus peut faire entrer de **nouveaux allèles** au sein d'une population, de façon bien plus significative que les mutations. Ces **migrations** constituent des **flux de gènes** entre les différentes populations et tendent à **homogénéiser** leurs fréquences alléliques, donc à limiter leur différenciation. Les migrations peuvent parfois aller à l'encontre de la sélection en diminuant l'adaptation d'une population à son environnement. Mais elles permettent en revanche de limiter les effets délétères de la **consanguinité** dans des petites populations, phénomène qui peut mettre en péril une population à long terme.

3 Un nouveau regard sur la notion d'espèce

Dans sa définition la plus courante, l'**espèce** est un groupe d'individus interféconds capables de donner naissance à une descendance fertile dans des conditions naturelles. Cette définition s'appuie sur l'**isolement reproducteur** : deux populations constituent deux espèces différentes lorsqu'elles n'échangent plus ou très peu de gènes (spéciation). Cet isolement peut être géographique (éloignement, apparition d'une barrière empêchant la reproduction), comportemental (sélection sexuelle), écologique (sélection naturelle) ou lié à une survie faible voire nulle des hybrides issus d'une fécondation entre des individus de deux groupes éloignés.

Depuis quelques dizaines d'années, la baisse importante du coût du **séquençage génétique** permet de mesurer avec plus de précision les **flux de gènes** entre différentes populations. Dans certains cas, le séquençage remet en cause des conceptions pourtant bien ancrées. Par exemple, certaines populations que les scientifiques pensaient homogènes sont en réalité constituées de sous-populations isolées depuis plusieurs centaines de milliers d'années, et ne constituent donc pas une mais plusieurs espèces (ainsi, on sait désormais qu'il existe deux espèces distinctes d'éléphants d'Afrique). Au contraire, les analyses génétiques révèlent parfois des **hybridations** plus fréquentes entre des individus appartenant à des groupes considérés comme des espèces différentes. Ainsi, les flux de gènes entre les populations humaines de Néandertaliens et de Sapiens montrent que les limites entre deux espèces sont difficiles à définir et sont finalement assez arbitraires. Les analyses génétiques sont donc une avancée majeure pour mieux comprendre l'histoire des populations et leur évolution.



L'inéluctable évolution des génomes au sein des populations

À retenir

Un équilibre théorique

Le **modèle théorique de Hardy-Weinberg** postule que, dans une population d'organismes diploïdes ayant recours à la reproduction sexuée, la **fréquence des allèles** est stable d'une génération à la suivante, sous certaines conditions : population isolée d'effectif infini, absence de sélection naturelle ou sexuelle, pas de mutations.

L'impact limité des mutations

Dans les conditions réelles, cet équilibre théorique n'est jamais parfaitement atteint, du fait entre autres des **mutations**, à l'origine de nouveaux allèles. Cependant, du fait de leur rareté, leur impact sur l'évolution des fréquences alléliques est modeste.

Sélections naturelle et sexuelle

La fréquence des allèles dans une population varie au cours du temps sous l'effet des facteurs de l'environnement : c'est la **sélection**. Les allèles qui confèrent un **avantage** reproducteur dans un environnement donné **ont tendance à se répandre** dans une population, tandis que les allèles défavorables ont tendance à se raréfier.

L'impact de la taille des populations

La **dérive génétique** correspond à une variation aléatoire de la fréquence des allèles dans une population. Elle est particulièrement marquée dans les **populations de petite taille**.

Les migrations

Les populations ne sont pas toujours isolées : les migrations apportent de nouveaux allèles et permettent des **échanges d'allèles** entre populations, ce qui a tendance à les rendre plus homogènes.

Un nouveau regard sur la notion d'espèce

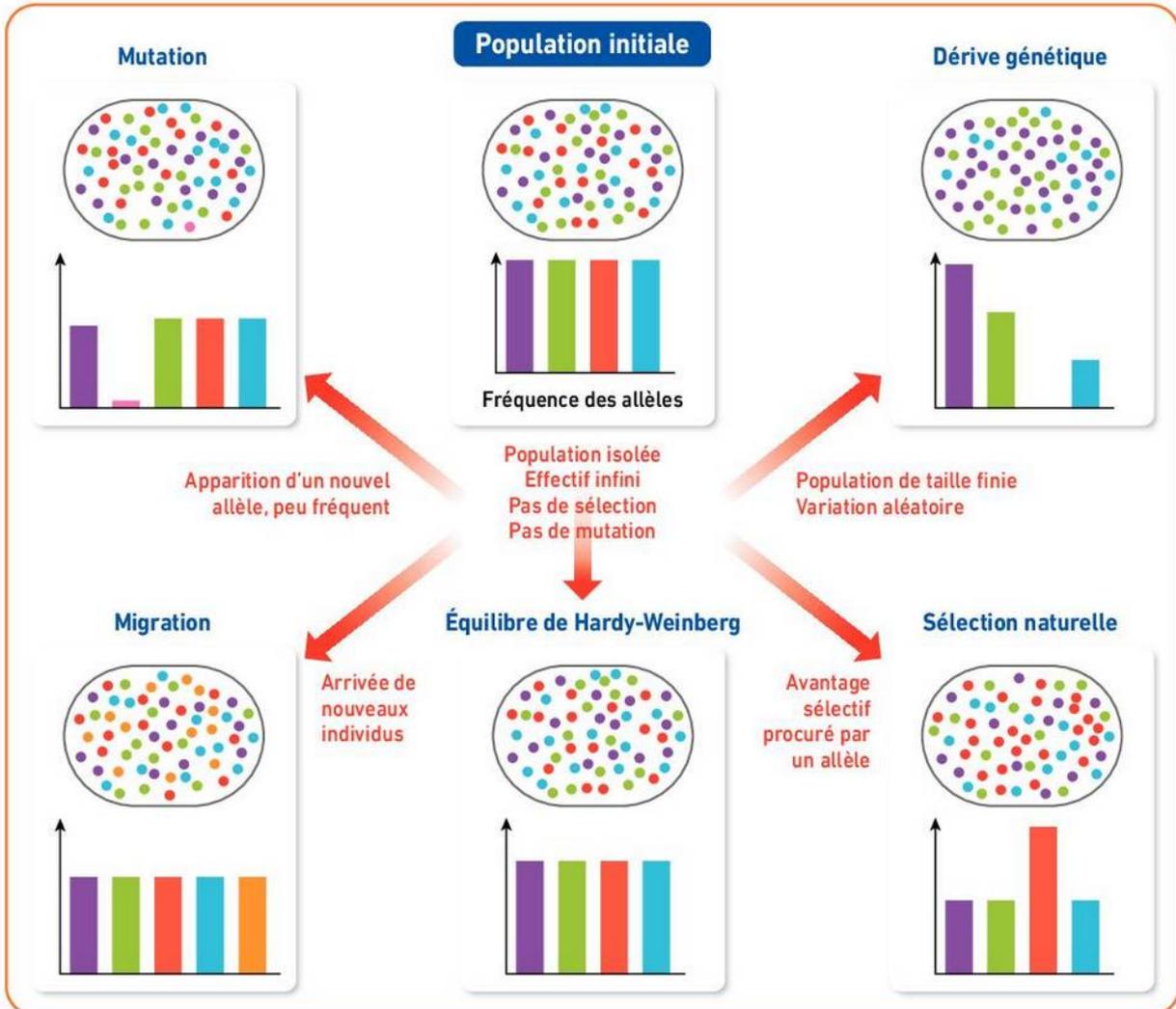
Les **analyses génétiques**, permises par les progrès du séquençage de l'ADN, permettent de mesurer directement les **flux de gènes** entre des populations et de préciser l'histoire évolutive de ces populations. Ceci conduit parfois à remettre en cause des classifications précédemment établies.



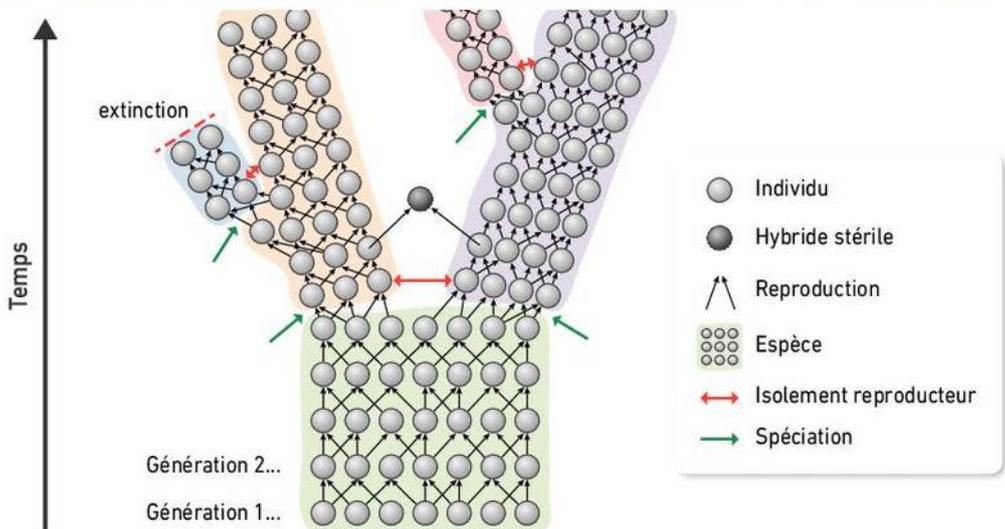
Mots-clés

Dérive génétique ● Espèce ● évolution ● Fréquence allélique ● Isolement reproducteur ● Modèle de Hardy-Weinberg ● Migration ● Mutation ● Population ● Sélection naturelle ● Sélection sexuelle

L'inéluctable évolution des génomes au sein des populations



Une espèce est une entité temporaire qui évolue continuellement dans le temps



D'autres mécanismes contribuent à la diversité du vivant

Préparez
le Grand oral
p. 519



1 Des associations non héréditaires

Les symbioses, sources de diversité

Les **symbioses** entre espèces différentes apportent des avantages aux deux partenaires, augmentant leur capacité de survie. Dans le cas des endosymbioses transmises entre générations (voir chapitre 3), des interactions s'établissent et modifient le génome des partenaires. Il existe cependant beaucoup d'associations symbiotiques non héréditaires, sans modification des génomes.

Dans le cas des lichens, l'association entre un champignon et une algue aboutit à une nouvelle forme de vie possédant son propre phénotype, qui n'est pas la simple addition de celui des deux partenaires. Par exemple, certaines activités métaboliques comme la synthèse de parietine, pigment protégeant du rayonnement ultraviolet, n'existent que chez le lichen. De telles innovations favorisent la colonisation par les lichens de milieux de vie hostiles aux organismes non symbiotiques.

Un autre exemple de symbiose est le **microbiote** intestinal : les bactéries vivant dans l'intestin facilitent la digestion et renforcent les défenses immunitaires de leur hôte. Le microbiote intestinal d'un individu est **acquis** par contact lors de l'accouchement puis de l'allaitement, et continue à se diversifier au cours de la vie.

Les relations entre pathogènes et hôtes

Les êtres vivants sont fréquemment parasités par des organismes **pathogènes** (champignons, bactéries, virus...) qui vivent à leurs dépens. Le plus souvent, cette relation n'est pas fatale pour l'hôte qui en est la cible, mais elle contribue à modifier son phénotype. C'est par exemple le cas de la coccinelle maculée, dont le comportement est profondément modifié par une guêpe qui pond dans son abdomen un œuf porteur de virus.



Feuille d'eucalyptus parasitée par un insecte.

2 Le phénotype étendu

Le concept de **phénotype étendu** a été défini par le généticien Richard Dawkins. Selon lui, l'expression des gènes s'étend au-delà de l'organisme lui-même. Elle se manifeste par exemple par ses constructions (toiles des araignées, nids des oiseaux, fourreaux des phryganes, termitières) ou par certains de ses comportements. Lorsqu'un parasite modifie le comportement de son hôte (exemple de la guêpe et de la coccinelle maculée), le comportement de l'hôte peut alors être considéré comme faisant partie du phénotype étendu du parasite.

Les **constructions** réalisées par les organismes vivants résultent souvent de comportements innés, contrôlés génétiquement. En **mobilisant des composants inertes du milieu**, ces espèces animales augmentent leurs chances de survie ou de reproduction et donc favorisent la transmission de leurs gènes à leur descendance.

Les parures et parades que manifestent certains animaux pour se défendre ou se reproduire sont également des exemples de phénotype étendu.



Cet oiseau, le jardinier satiné, décore sa hutte nuptiale d'objets bleus pour attirer les femelles.

3 La transmission des comportements acquis

Contrairement aux comportements innés, les comportements acquis sont le produit des expériences et des apprentissages individuels. L'apparition de comportements nouveaux peut ainsi être source de diversification du vivant si ceux-ci se transmettent au sein d'une population.

La transmission horizontale des comportements au sein d'une population

Un comportement peut se transmettre entre membres d'une même population par imitation entre individus d'une même génération. Cette **transmission horizontale**

se rencontre chez les baleines à bosse, chez lesquelles une nouvelle technique de chasse performante s'est répandue au sein de la population en quelques années seulement.

Un autre exemple bien connu est le cas des mésanges « voleuses de lait ». En Angleterre, certains de ces oiseaux ont développé la capacité de se nourrir en perçant avec le bec l'opercule des bouteilles de lait déposées devant les maisons par le laitier. Rapidement, ce nouveau comportement s'est répandu chez les mésanges, animaux sociaux, par imitation des congénères. Cette transmission nécessite un échange d'information entre les individus. Ainsi, si des cas isolés d'ouverture d'opercule de bouteille de lait ont été observés chez le rouge-gorge, oiseau solitaire, le comportement ne s'est pas répandu dans les populations de cette espèce.



■ Mésange ayant appris à ouvrir une bouteille de lait.

► La transmission verticale des comportements au sein d'une population

Les individus adultes peuvent transmettre un comportement acquis aux individus plus jeunes. Cette **transmission verticale** nécessite alors un apprentissage. Il en est ainsi du chant des oiseaux : si la capacité d'émettre des sons est présente dès la naissance, l'apprentissage du chant typique de l'espèce, parfois même de la population, s'effectue le plus souvent dès le plus jeune âge par imitation du chant des adultes.

La transmission verticale des comportements s'observe souvent chez les animaux ayant une **vie sociale** élaborée : c'est le cas des primates comme les chimpanzés, où l'on observe de nombreuses pratiques transmises d'une génération à l'autre. Lorsque ces pratiques sont propres à chaque population, on peut parler d'une véritable **culture** : une culture est en effet définie comme un ensemble de savoirs et de pratiques qui se partagent et se transmettent socialement au sein d'un groupe donné, sans héritage génétique.

4 Évolution culturelle et évolution biologique

► Les mécanismes d'une évolution culturelle

L'**innovation** est l'apparition de nouvelles pratiques au sein d'une population. Si ces pratiques se révèlent avantageuses pour les individus qui les mettent en

œuvre, elles peuvent être sélectionnées positivement et se répandre au sein de la population. C'est le phénomène de **sélection culturelle**.

À l'image de l'apparition de l'agriculture chez l'Homme, ce phénomène peut se produire indépendamment en plusieurs foyers d'innovation, sous le double effet du hasard et de la pression sélective.

La **diffusion** d'une innovation culturelle peut être très rapide, particulièrement lors d'une transmission horizontale. La vitesse de la diffusion dépend de plusieurs facteurs : elle est ralentie par les barrières géographiques ou de communication entre populations et est accélérée par les migrations et les liens sociaux entre individus. Ainsi, chez l'Homme, l'évolution culturelle voit sa vitesse augmenter exponentiellement à mesure que se développent les moyens d'échanges et de communication.

Une innovation culturelle peut être abandonnée lorsqu'elle ne présente plus d'avantage dans des conditions de vie nouvelles : c'est une **contre-sélection**. Ainsi, l'introduction sur les bouteilles de lait de bouchons résistants aux coups de bec a entraîné l'abandon du comportement des mésanges « voleuses de lait ».

Une innovation peut également se perdre par **dérive**. Un exemple connu chez les humains concerne les aborigènes de Tasmanie. Ceux-ci, initialement reliés aux aborigènes australiens, ont formé un petit groupe qui s'est isolé il y a environ 10 000 ans. Lors de leur rencontre avec les premiers explorateurs, on a constaté qu'ils avaient perdu de nombreuses techniques pourtant présentes chez leurs ancêtres (outils en os, utilisation de filets de pêche, lances). Cette **perte culturelle** est le résultat d'un simple hasard : du fait du faible effectif, certains comportements n'ont pas été suffisamment transmis à la descendance.

► Des liens entre évolution culturelle et évolution biologique

De nombreux points communs peuvent être établis entre les mécanismes de l'**évolution biologique** et ceux de l'**évolution culturelle** :

- innovations génétiques (mutations) ou innovations culturelles (inventions) ;
- sélection naturelle ou culturelle des innovations avantageuses ;
- transmission verticale, par hérédité génétique ou par apprentissage ;
- transmission horizontale, par transfert de gènes ou par imitation ;
- dérive génétique ou perte culturelle ;
- rôle des migrations et des barrières géographiques dans la transmission.

L'hérédité n'est donc pas seulement fondée sur l'ADN. Il existe d'autres mécanismes qui contribuent à la diversification des êtres vivants au cours du temps et des générations : l'évolution résulte des interactions entre évolution biologique et évolution culturelle.

D'autres mécanismes contribuent à la diversité du vivant

À retenir

● Associations non héréditaires et diversification du vivant

Des associations entre espèces, non transmises de manière héréditaire, peuvent participer à la diversification du vivant. Les **symbioses**, associations à bénéfice réciproque, peuvent se traduire par de nouvelles formes de vie.

Les relations entre les **pathogènes** et leurs hôtes contribuent également à une diversification du phénotype.

● Le phénotype étendu

Le phénotype d'un individu ne se limite pas à l'ensemble des caractéristiques de son organisme, mais s'étend aux modifications de son environnement dues à ses comportements : c'est ce qu'on appelle le **phénotype étendu**. On peut ainsi inclure dans le phénotype étendu des animaux leurs **constructions** à partir de composants inertes du milieu, leurs éléments de parure, certains de leurs **comportements**.

● La transmission des comportements acquis

Un comportement est acquis lorsqu'il est le fruit de l'expérience individuelle ou de l'apprentissage. La transmission d'un comportement acquis au sein d'une population peut s'effectuer par **transmission horizontale** entre individus d'une même génération ou **verticale**, entre générations. L'apparition de nouveaux comportements et la différenciation des comportements transmis au sein des populations est une source de diversification. Il existe donc une hérédité non fondée sur l'ADN.

● Évolution culturelle et évolution biologique

Le partage et la transmission de pratiques et de savoirs au sein d'une population constituent une culture. L'**évolution culturelle** est la transformation dans le temps de la culture d'une population. Elle fait intervenir des **innovations** pouvant être sélectionnées si elles sont avantageuses, contre-sélectionnées quand elles deviennent inopérantes, ou perdues par hasard. L'évolution de la biodiversité résulte des interactions entre évolution biologique et évolution culturelle.

Mots-clés

Apprentissage ● Associations non héréditaires ● Association symbiotique ● Comportements acquis ● Comportements innés ● Culture ● Évolution culturelle ● Hérédité non fondée sur l'ADN ● Phénotype étendu ● Transmission horizontale ● Transmission verticale

Schéma bilan

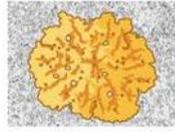
D'autres mécanismes contribuent à la diversité du vivant

Relations et associations entre les êtres vivants

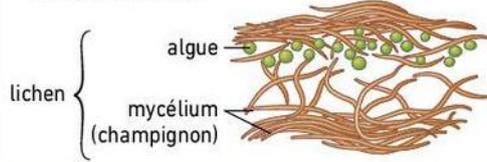
► Symbiose

Association entre des espèces différentes :

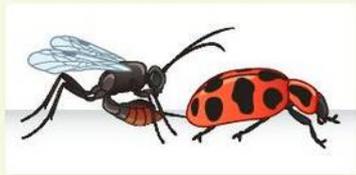
- production de nouvelles substances ;
- propriétés nouvelles ;
- colonisation de nouveaux milieux.



lichen → pariétine (protection contre les UV)



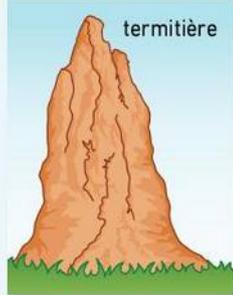
► Relations hôtes/parasites



Une des espèces vit aux dépens d'une autre :

- production de nouvelles substances ;
- modification du comportement de l'hôte.

Utilisation d'éléments inertes



Constructions, utilisation de matériaux...

Recrutement de composants inertes

Associations non héréditaires

Phénotype étendu

Transmission culturelle des comportements acquis



Adultes

Transmission verticale (entre générations)

Jeunes

Utilisation d'outils chez les chimpanzés

Transmission horizontale (au sein d'une génération)

Individus initiés

Individus non initiés



Comportement de chasse des baleines

Évolution culturelle

DIVERSIFICATION DU VIVANT



La datation des événements géologiques a commencé historiquement par une lecture des traces observables dans les roches (couches, plis, failles, restes d'organismes fossilisés...). Les géologues ont pu ainsi reconstituer un ordre de succession en datant les événements les uns par rapport aux autres. Ce n'est que beaucoup plus récemment que cette **datation relative** a pu être calibrée dans le temps par une **datation absolue**.

1

La chronologie relative

La chronologie relative consiste à établir une succession d'événements géologiques. La méthode de reconstitution fait appel à des principes basés sur les relations géométriques entre les formations géologiques, ainsi qu'à l'observation des fossiles inclus dans les roches sédimentaires.

Les principes de la datation relative

Le **principe de superposition** concerne les structures géologiques qui se forment par dépôts successifs : roches sédimentaires ou produits volcaniques (coulées de laves et projections). Dans une telle série, une **couche est plus récente** que celle qu'elle recouvre et **plus ancienne** que la couche située au-dessus d'elle.

Ce principe est plus difficile à appliquer dans une région où les terrains ont subi des déformations tectoniques importantes : celles-ci peuvent même inverser l'ordre normal de la superposition.

Le **principe de continuité** : dans les roches formant des strates (couches sédimentaires, dépôts volcaniques), **une même strate a le même âge en tous points**. Deux couches observées à distance l'une de l'autre peuvent aussi être considérées de même âge si elles présentent suffisamment d'indices en ce sens. Il peut s'agir par exemple de niveaux repères, situés en dessous et au-dessus de la couche. Cependant, ce principe doit être utilisé avec précaution, car les apparences peuvent être trompeuses : à une époque donnée, les conditions de sédimentation peuvent différer d'un endroit à l'autre, donnant à une même couche des aspects différents selon les affleurements. Inversement, des dépôts très ressemblants peuvent s'être formés à des époques différentes. Selon le **principe de recoupement toute structure qui en recoupe une autre lui est postérieure**. Il peut s'agir de formations géologiques telles qu'un filon volcanique ou un massif intrusif de granite recoupant un encaissant rocheux, d'événements tectoniques (failles,

plissements) ou de surfaces d'érosion qui recoupent d'autres structures.

L'utilisation combinée de ces principes permet de reconstituer les étapes d'une histoire géologique locale : par exemple, l'observation d'une **discordance angulaire** entre des strates horizontales et des couches déformées par un événement tectonique situées en dessous indique qu'a eu lieu une première phase de sédimentation, interrompue par l'événement tectonique à l'origine des déformations. Les sédiments déformés ont ensuite été érodés, avant une reprise des dépôts sédimentaires. L'application des principes de superposition et de recoupement permet de dater cette discordance : elle est postérieure à la dernière couche affectée par l'événement tectonique et antérieure à la strate non déformée située au-dessus.

Le **principe d'inclusion** stipule que **tout objet (roche, minéral) inclus dans un autre lui est antérieur**. Il est possible en effet d'observer des inclusions de cristaux plus anciens dans une matrice plus récente ; c'est le cas par exemple des enclaves de péridotite dans les roches volcaniques, ou des inclusions de zircon dans des biotites.

Le **principe d'identité paléontologique** : certaines espèces fossiles ont vécu pendant des périodes relativement brèves et dans des zones très étendues géographiquement : ce sont de bons **fossiles stratigraphiques**. Ils permettent de comparer les âges de couches éventuellement très distantes, de façon beaucoup plus fiable qu'à l'aide du principe de continuité. Selon le **principe d'identité paléontologique, deux couches de terrains qui renferment la même association de fossiles stratigraphiques ont le même âge**.

La construction de l'échelle stratigraphique

L'apparition et la disparition de groupes fossiles permet d'établir des coupures dans les strates, et donc dans l'histoire géologique de la Terre.

Sur la base de ces critères paléontologiques, les reconstitutions stratigraphiques locales ont peu à peu été mises en relation à l'échelle mondiale. Cela a permis aux géologues de construire une **échelle stratigraphique**, calendrier de référence couvrant l'ensemble de l'histoire de notre planète. Au sein de l'échelle stratigraphique, le temps est découpé en ères, comportant plusieurs périodes, elles-mêmes subdivisées en **étages**. Chaque étage est défini à partir de son contenu paléontologique, étalonné grâce à un affleurement de référence : le **stratotype**. L'étage constitue l'unité de base du calendrier qui a, dans ses grandes lignes, été établi bien avant que

l'on sache quelles durées représentaient les différents intervalles de temps ainsi définis.

2

La chronologie absolue

La chronologie absolue permet de caler l'échelle stratigraphique dans le temps, en déterminant l'âge des roches en milliers, en millions, voire en milliards d'années.

Principes de la chronologie absolue

La **décroissance radioactive** : de nombreux éléments chimiques possèdent des isotopes naturels radioactifs qui se désintègrent régulièrement et irréversiblement au cours du temps.

L'isotope radioactif d'origine correspond à l'**élément père**. Il se transforme en un isotope radiogénique : l'**élément fils**. La vitesse de ce processus est caractéristique de chaque élément radioactif : la **demi-vie** (ou période) correspond à la durée nécessaire pour que la quantité d'isotope radioactif initiale diminue de moitié.

Les éléments père et fils n'ont pas la même masse. Il est donc possible de les séparer et de les doser à l'aide d'un **spectromètre de masse**. Cette mesure des proportions d'élément père restant et d'élément fils produit permet de calculer depuis combien de temps se déroule la désintégration au sein de l'échantillon.

Pour effectuer une datation absolue, les géologues disposent de plusieurs couples d'isotopes, qui diffèrent les uns des autres par la période de leur élément père. Cette période permet de savoir dans quel domaine de datation chacun des chronomètres est fiable. Afin de **choisir le chronomètre le mieux adapté** à l'objet que l'on souhaite dater, on s'efforce d'évaluer son âge, grâce notamment à la datation relative.

La datation peut être effectuée sur **des échantillons de diverses natures** : il peut s'agir de roches, ou de minéraux isolés les uns des autres. Il faut bien entendu que la roche ou le minéral utilisé contienne l'élément correspondant au chronomètre utilisé. La datation des roches sédimentaires est délicate, car bien souvent elles contiennent des particules détritiques plus anciennes que le dépôt. De plus, la diagenèse conduisant du sédiment à la roche est un processus long et progressif. C'est pourquoi la datation absolue s'appuie davantage sur des roches métamorphiques et magmatiques.

Quelle que soit la nature de l'échantillon, le calcul de son âge est basé sur le dosage des éléments père et fils qu'il contient. Le résultat ne sera fiable que s'ils n'ont pu ni entrer ni sortir de l'échantillon après sa formation. On dit alors que l'échantillon constitue un **système fermé**. Pour les roches magmatiques, la **fermeture du système correspond à la cristallisation du magma**. Cependant, tant que la température de la roche reste élevée, certains éléments chimiques diffusent encore entre les minéraux. De plus, la **température de fermeture** est

spécifique à la fois de l'isotope considéré et de chaque type de minéral. C'est pourquoi des mesures réalisées sur différents minéraux d'une même roche peuvent fournir des âges différents.

Quelques méthodes de datation

L'utilisation du **chronomètre potassium/argon** : la datation « Potassium/Argon » permet de dater des roches volcaniques ou métamorphiques anciennes, car le ^{40}K se désintègre en donnant l' ^{40}Ar avec une période de 1,31 Ga (milliard d'années).

La quantité initiale de l'élément père dans l'échantillon est inconnue, mais on sait qu'au moment de la fermeture du système, celle de l'élément fils est nulle : en effet, l'argon étant un gaz, il s'échappe du magma. L'âge peut être alors déduit à partir des concentrations d'élément père et d'élément fils mesurées dans l'échantillon.

L'abondance du potassium dans les roches confère à cette méthode une grande universalité.

L'utilisation du **chronomètre rubidium/strontium** : ce chronomètre convient pour les âges les plus anciens : ^{87}Rb se désintègre en ^{87}Sr avec une demi-vie de 50 Ga. C'est l'une des méthodes les plus utilisées en raison de sa fiabilité. On la réserve cependant à des roches anciennes, car la désintégration du ^{87}Rb est si lente que le système doit être fermé depuis près de 100 Ma pour que la décroissance de sa concentration puisse être convenablement mesurée.

Les quantités initiales des éléments père et fils étant inconnues, la détermination de l'âge passe par une résolution graphique. Une **droite isochrone** est réalisée à partir de plusieurs minéraux ou échantillons de la roche à dater. La pente de cette droite dépend du temps écoulé depuis la fermeture du système. Un calcul simple permet d'en déduire l'âge de l'échantillon.

3

Le couplage des deux méthodes de datation

Les deux types de datation, relative et absolue, se révèlent complémentaires. Les méthodes de datation absolue permettent de situer dans le temps les différentes coupures de l'échelle stratigraphique, obtenues grâce à la datation relative. Inversement, celle-ci est souvent utilisée en amont des travaux de datation absolue, pour guider le choix du chronomètre le plus pertinent. Lorsqu'il est impossible de pratiquer une datation absolue sur un objet géologique (une strate, un fossile, une surface d'érosion...), les deux méthodes appliquées conjointement (principe de superposition et datation absolue de strates situées de part et d'autre de l'objet) permettent d'estimer son âge.

À retenir

● La chronologie relative

La **chronologie relative** permet de dater des structures ou événements géologiques les uns par rapport aux autres. Elle repose sur des principes simples.

- **Principe de superposition** : une strate est plus récente que celle qui est située en dessous.
- **Principe de continuité** : l'âge d'une strate est le même sur toute son étendue.
- **Principe de recoupement** : toute structure qui en recoupe une autre est plus récente.
- **Principe d'inclusion** : tout objet (roche ou minéral) inclus dans un autre est plus ancien.
- **Principe d'identité paléontologique** : deux strates contenant les mêmes **fossiles stratigraphiques** sont de même âge. Ces fossiles doivent être abondants, avoir une brève extension dans le temps et une large distribution géographique.

Ces principes de chronologie relative ont permis de découper les temps géologiques, principalement sur des critères paléontologiques : les apparitions ou les disparitions de groupes fossiles constituent des repères temporels fiables. La superposition des intervalles de temps, limités par des coupures d'ordres différents (ères, périodes, âges), aboutit à l'**échelle stratigraphique**.

● La chronologie absolue

De nombreux éléments chimiques possèdent des **isotopes radioactifs** qui se désintègrent régulièrement et irréversiblement au cours du temps. La vitesse de ce processus est caractérisée par la **période radioactive** (ou demi-vie) de chaque élément radioactif.

La mesure des proportions d'élément père restant et d'élément fils produit permet de calculer depuis combien de temps se déroule la désintégration au sein de l'échantillon (roche totale ou minéraux isolés), et donc de connaître son âge.

Le **chronomètre géologique** choisi doit avoir une période compatible avec l'estimation que l'on peut faire de l'âge de l'objet à dater. Les chronomètres $^{40}\text{K} / ^{40}\text{Ar}$ et $^{87}\text{Rb} / ^{87}\text{Sr}$ permettent de dater des roches très anciennes.

Les méthodes de datation absolue et de datation relative se révèlent très complémentaires.

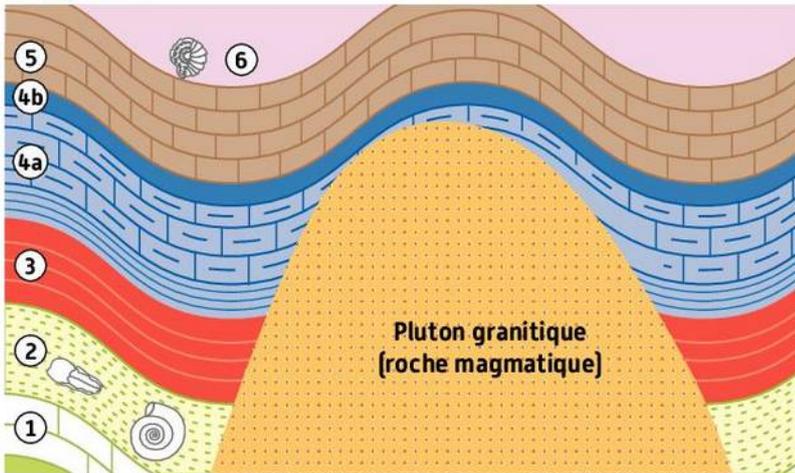
Mots-clés

Chronologie absolue ● Chronologie relative ● Chronomètre géologique ● Échelle stratigraphique ● Fossile stratigraphique
 ● Principe de continuité ● Principe d'identité paléontologique ● Principe d'inclusion ● Principe de recoupement
 ● Principe de superposition ● Système fermé

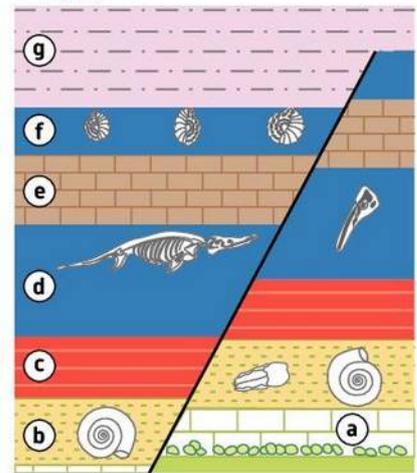


CHRONOLOGIE RELATIVE

Région 1



Région 2



Chronologie régionale

- Principe de superposition**
les strates ① à ⑥ se sont déposées successivement.
- Principe de recouplement**
Le plissement recoupe les strates : il s'est produit après le dépôt.
- Principe de recouplement**
Le pluton granitique recoupe les plis : il s'est mis en place après le plissement.

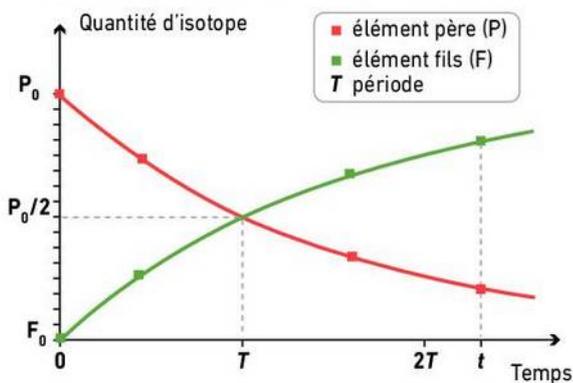
Principe de recouplement
La faille recoupe les strates de ① à ⑥ mais pas la strate ⑦. Elle a fonctionné entre le dépôt de ⑥ et celui de ⑦.

Principe d'inclusion
Les galets sont inclus dans la strate ① : ils existaient avant son dépôt.

Principe d'identité paléontologique
Les strates ② et ③ contiennent les mêmes fossiles stratigraphiques : elles ont le même âge. De même pour les strates ⑥ et ⑦.

CHRONOLOGIE ABSOLUE

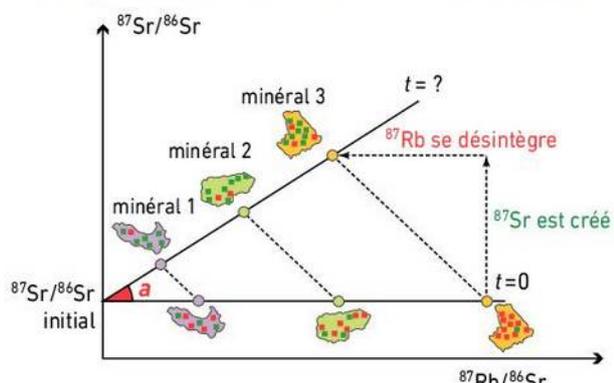
Désintégration d'un isotope radioactif



$$t = \frac{\ln\left(\frac{P_0}{P_t}\right)}{\lambda}$$

Mesure de F_t et/ou de P_t
 ↓
 Calcul de t , âge de la roche

Si P_0 inconnu : méthode de la droite isochrone



Détermination du coefficient directeur de la droite (a)
 $t = \frac{\ln(a+1)}{\lambda}$
 ↓
 Calcul de t , âge de la roche

Les traces du passé mouvementé de la Terre

Préparez le Grand oral p. 519



1 Des traces du passé de la Terre

Des domaines continentaux d'âges variés

Alors que l'âge de la lithosphère océanique ne dépasse pas 200 Ma, les roches affleurant à la surface des continents présentent des âges variés pouvant atteindre plus de 4 milliards d'années (Ga). Les roches les plus anciennes, datées par radiochronologie, sont des roches de la ceinture Nuvvuagittuq au Canada. Leur âge, 4,28 Ga, approche celui de la Terre (4,55 Ga).

Ces âges considérables s'expliquent par la faible densité de la lithosphère continentale, qui demeure principalement en surface malgré les nombreuses déformations qu'elle subit.

La recherche des ceintures orogéniques

L'orogénèse est la formation de chaînes de montagnes résultant de la convergence de plaques lithosphériques. La plupart des chaînes se forment lors de la **collision entre deux masses continentales**. Cependant, certaines chaînes comme la cordillère des Andes peuvent résulter de déformations de la croûte continentale au niveau d'une zone de subduction océanique.

Les chaînes de montagnes formées au cours d'une même orogénèse dessinent un alignement appelé **ceinture orogénique**. Par exemple, la ceinture alpine comprend les Alpes, mais aussi l'Atlas, les Balkans, le Caucase et l'Himalaya. Cet ensemble de chaînes s'est formé au cours de l'ère Tertiaire (depuis -65 Ma) suite à la fermeture d'un vaste océan aujourd'hui disparu : la Téthys.

Les ceintures orogéniques récentes, comme la ceinture alpine, sont facilement visibles en surface par leurs reliefs très marqués. Mais il est possible de reconstituer les ceintures orogéniques anciennes, malgré l'érosion de leurs reliefs, grâce à certains indices géologiques : présence en surface de roches métamorphiques issues des déformations liées aux forces de compression, de roches magmatiques mises en place dans les profondeurs de la chaîne de montagnes, puis exhumées par l'érosion, présence de failles inverses, de chevauchements.

À l'échelle mondiale, la reconstitution des ceintures orogéniques anciennes permet d'établir une chronologie des cycles orogéniques subis par les continents depuis plusieurs milliards d'années. Un **cycle orogénique** correspond à l'ensemble des mécanismes de formation, puis de disparition d'une chaîne de montagnes (érosion).

En France, les deux principales orogénèses repérables sur la carte géologique sont l'orogénèse alpine (ère Tertiaire) visible dans les Alpes et les Pyrénées et l'orogénèse hercynienne (fin de l'ère Primaire) surtout visible dans le Massif central, le Massif armoricain et les Vosges. Des traces d'orogénèses encore plus âgées sont décelables dans les massifs anciens.

2 La recherche des océans disparus

Les ophiolites

Les **ophiolites** sont des fragments de la lithosphère océanique observables à la surface d'un continent. Elles forment en général des assemblages ordonnés de roches lithosphériques : à la base, se trouvent des péridotites du manteau. Elles sont surmontées par des gabbros, puis des basaltes, présentant au sommet un aspect de laves en coussins comparable aux pillow-lavas visibles dans l'axe des dorsales océaniques. Ce complexe rocheux peut être surmonté de sédiments océaniques.

Souvent, comme dans le massif alpin du Chenaillet, les roches des ophiolites présentent un métamorphisme lié à l'hydrothermalisme de dorsale (refroidissement et hydratation). Ainsi, les péridotites sont serpentinisées (présence d'un minéral typique, la serpentine) et les gabbros présentent un faciès amphibolites (présence de l'amphibole hornblende) ou un faciès schistes verts (présence de chlorite et d'actinote).

Les ophiolites sont donc interprétées comme des fragments d'un ancien océan, aujourd'hui refermé. Ces morceaux de lithosphère océanique ont été « coincés » entre les deux continents en convergence. Elles forment donc une zone de **suture** entre les blocs continentaux, véritable cicatrice témoignant de la collision de deux plaques lithosphériques.

Le passé tumultueux des ophiolites

Certaines ophiolites, comme celles de Bou Azzer au Maroc, sont les restes d'une lithosphère océanique qui a été charriée sur la lithosphère continentale avant la collision, échappant ainsi à la subduction : on parle alors d'**obduction**.

Dans d'autres cas, comme pour les ophiolites du Mont Viso dans les Alpes, des fragments de lithosphère océanique ayant subi la **subduction** ont pu être exhumés lors de la collision continentale. Dans ce cas, les roches du complexe ophiolitique ont subi lors de la subduction une forte augmentation de pression ainsi qu'une faible augmentation de température.

Dans les métagabbros se sont alors formés des minéraux caractéristiques du faciès schistes bleus (glaucophane) ou écloïtes (grenat).

3 Fragmentation des continents et océanisation

Les rifts continentaux, lieux de la fragmentation continentale

La **fragmentation** d'un continent à l'origine d'un nouvel océan est observable actuellement en Afrique de l'Est. Les **rifts continentaux** de cette région du globe présentent des caractéristiques qui témoignent d'une déchirure de la lithosphère continentale.

La partie axiale d'un rift continental est structurée par de nombreuses **failles normales** parallèles qui délimitent un fossé d'effondrement en marches d'escalier. Cela révèle une tectonique en distension, provoquant l'étirement et l'amincissement de la lithosphère continentale. Ces failles normales sont particulières ; elles ont un profil légèrement courbe qui découpe la lithosphère en blocs ayant tendance à basculer.

Dans le fossé d'effondrement se forment des roches sédimentaires typiquement continentales :

- des roches détritiques issues de l'érosion des flancs du rift (conglomérats) ;
- des évaporites, roches issues de la précipitation chimique de sels minéraux lors de l'évaporation des eaux de ruissellement et d'infiltration (gypse, sel).

L'amincissement de la lithosphère s'accompagne d'une remontée de l'asthénosphère à l'origine d'un soulèvement des bords du rift et du magmatisme qui marque sa zone axiale. Le magma remonte le long des failles et provoque un volcanisme en surface, avec des coulées basaltiques. De nombreux séismes superficiels sont la conséquence à la fois des mouvements le long des failles normales et de la déformation des chambres magmatiques.

Du rift au domaine océanique

Si l'étirement et l'amincissement de la croûte continentale se poursuivent, celle-ci finit par se rompre. Dans la déchirure se forme alors une nouvelle dorsale. Le nouveau plancher océanique en expansion éloigne peu à peu les deux moitiés de l'ancien rift continental. Chaque demi-rift continental constitue alors une zone de transition entre domaine océanique et domaine continental au sein d'une même plaque lithosphérique. Devenues presque inactives du point de vue sismique et magmatique, ces marges continentales sont qualifiées de **marges passives**.

L'étude de la marge passive d'un domaine océanique actuel (golfe du Lion en Méditerranée par exemple) confirme ce modèle. La sismique réflexion dévoile en effet des structures en **blocs basculés** le long de failles normales courbes, correspondant à la moitié d'un rift continental. On y retrouve des sédiments syn-rifts,

contemporains de la formation du rift continental (sédiments continentaux, évaporites), piégés dans les bassins liés à l'effondrement des blocs, et des sédiments post-rifts caractéristiques des fonds océaniques (argilites) venant recouvrir l'ensemble.

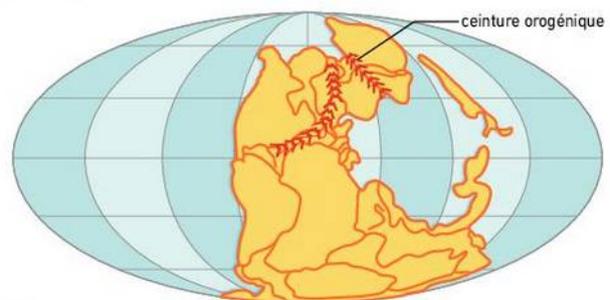
4 Le visage changeant de la Terre

Paléogéographie et déplacement des masses continentales

La **paléogéographie** a pour objet d'étude la reconstitution de la géographie passée de la Terre, au cours de sa longue histoire. Elle permet de produire des cartes représentant la position des masses continentales et des ceintures orogéniques à différentes époques géologiques.

On a pu ainsi montrer l'alternance, au cours de l'histoire de la Terre, de phases de réunion des blocs continentaux et de phases de fragmentation des continents. Lors d'une phase de réunion, la subduction provoque la fermeture de certains océans, le rapprochement des masses continentales, puis leur collision à l'origine d'une nouvelle orogénèse. Les phases de réunion des blocs continentaux peuvent aboutir à la formation d'un supercontinent unique regroupant l'ensemble des masses continentales, comme la Pangée il y a 300 millions d'années.

À l'opposé, certaines époques des temps géologiques, comme l'ère Secondaire, sont des phases de dislocation des masses continentales par fragmentation (rifts continentaux) et expansion de nouveaux domaines océaniques. Ainsi, les déplacements des continents sont une conséquence directe de la dynamique des plaques lithosphériques.



■ Un supercontinent : la Pangée, il y a 300 millions d'années.

Des cycles de supercontinents ?

À partir des reconstitutions paléogéographiques, le géologue John Tuzo Wilson a proposé un modèle d'évolution cyclique du visage de la Terre, alternant des phases de regroupement des masses continentales en un supercontinent et des phases de dislocation de ce supercontinent. L'origine de ces cycles serait à rechercher dans les mouvements convectifs affectant le manteau terrestre. Les données dont disposent les scientifiques pour ces périodes anciennes étant très partielles, le mécanisme de ces cycles et leur périodicité sont encore l'objet de recherches.

À retenir

● La surface des continents porte les traces du passé de la Terre

La surface des continents révèle des roches d'âges variés couvrant pratiquement les 4,55 milliards d'années de l'histoire de la Terre. On peut y déceler les traces de chaînes de montagnes parfois très anciennes formées par la convergence des plaques lithosphériques. On peut ainsi reconstituer des **ceintures orogéniques**, formées lors de **cycles orogéniques** successifs.

● Les ophiolites, fragments des océans disparus

Les **ophiolites** sont des fragments de lithosphère océanique se trouvant à la surface des continents. Elles sont formées de péridotites, gabbros et basaltes. Ces restes de domaines océaniques disparus ont été amenés en altitude par la fermeture de l'océan. Suite à la collision des blocs continentaux, ils occupent une position de **suture** au sein des chaînes de montagnes. Les ophiolites ont pu subir un charriage sur le continent par **obduction**, ou un enfoncement dans l'asthénosphère par **subduction**, avant d'être exhumées lors de la **collision** continentale.

● La fragmentation des continents et la naissance des océans

Les **rifts continentaux** sont le stade initial de la fragmentation des masses continentales par étirement et amincissement de la lithosphère dans un contexte de dynamique en distension. Ils sont le siège d'une importante sédimentation. Suite à cette **fragmentation continentale** peut se mettre en place un nouveau domaine océanique. Les **marges passives** bordant un océan sont les vestiges de l'ancien rift continental. Elles portent des marques de la distension : **failles normales** et **blocs basculés**.

● La reconstitution paléogéographique de l'histoire de la Terre

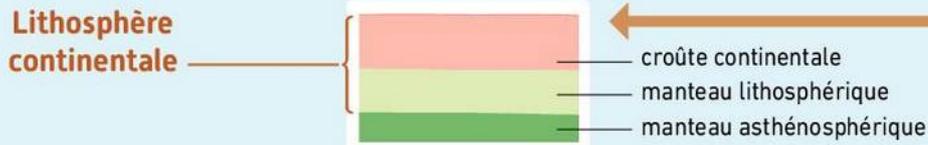
La reconstitution de la géographie des continents au cours des temps géologiques, ou **paléogéographie**, montre l'alternance de périodes de réunion, puis de fragmentation des continents. Lors des **phases de réunion**, les masses continentales se rapprochent les unes des autres au cours de la fermeture des domaines océaniques, puis entrent en collision orogénique, formant de nouvelles chaînes de montagnes. Lors des **phases de fragmentation** des masses continentales, la tectonique en distension forme des rifts conduisant à la mise en place de nouvelles dorsales océaniques au niveau desquelles se produit l'accrétion de lithosphère océanique. Ces phénomènes résultent de la dynamique de la lithosphère par convergence (phases de réunion) ou divergence (phases de fragmentation).

Mots-clés

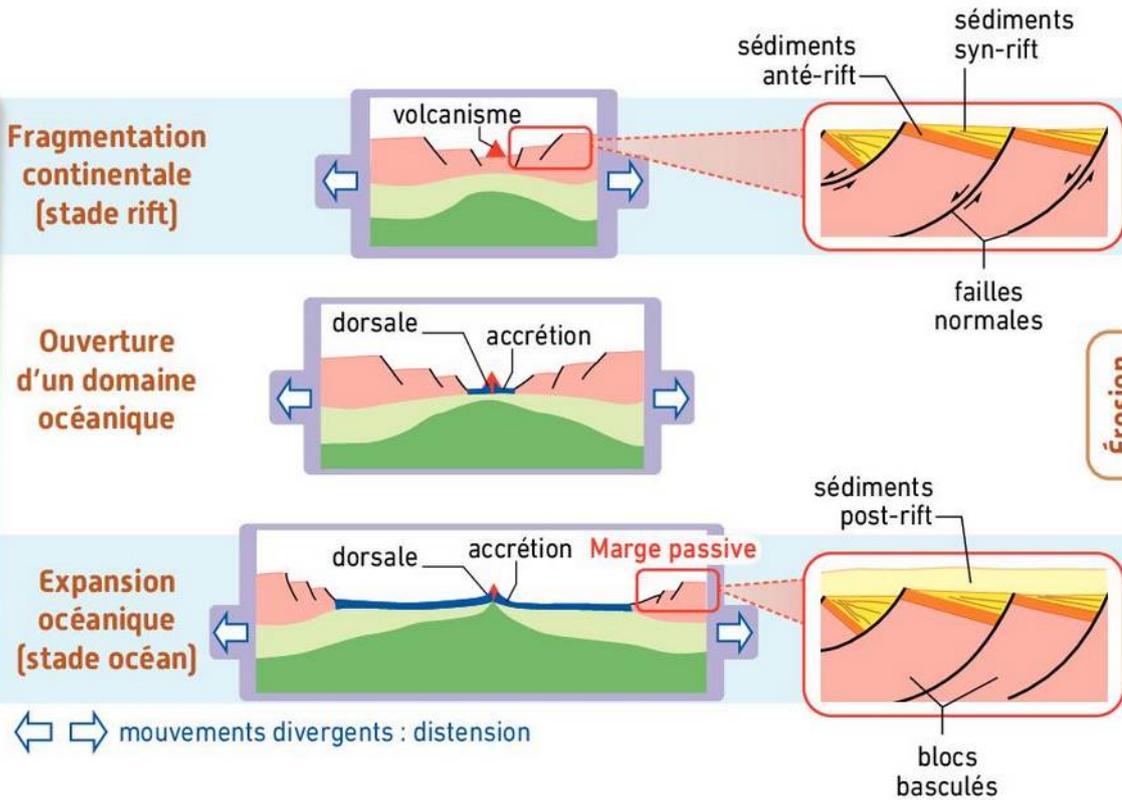
Blocs basculés ● Ceinture orogénique ● Collision ● Cycle orogénique ● Faille normale ● Fragmentation continentale ● Marge passive ● Obduction ● Ophiolite ● Paléogéographie ● Rift continental ● Suture ● Subduction

Schéma bilan

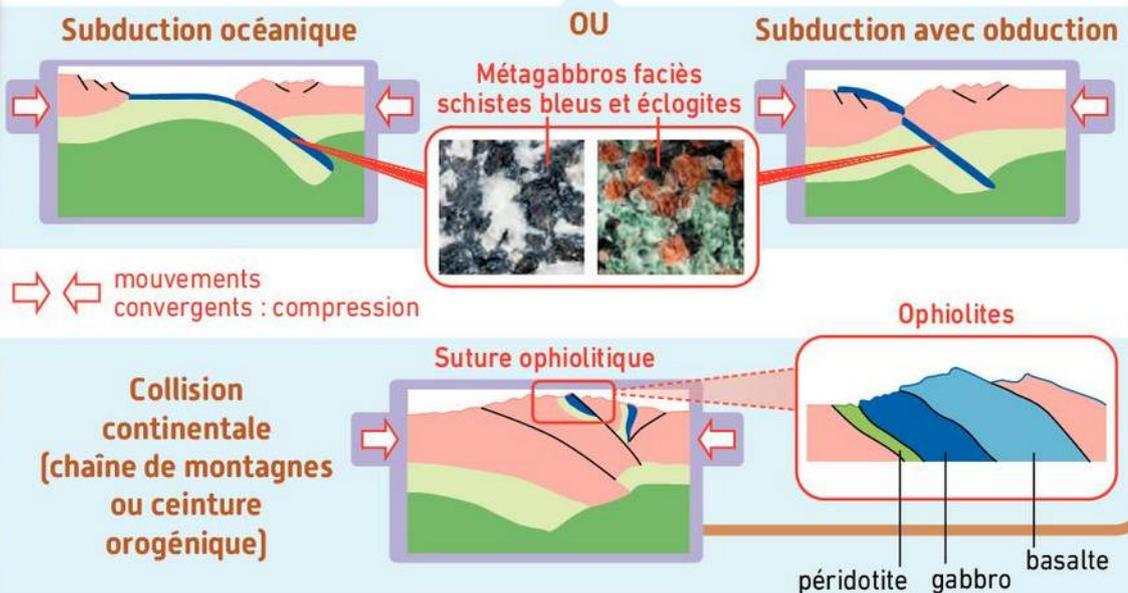
Les traces du passé mouvementé de la Terre



Phase de dislocation des blocs continentaux



Phase de regroupement des blocs continentaux



L'organisation fonctionnelle des plantes à fleurs

Préparez
le Grand oral
p. 519



Sur la terre ferme, la lumière solaire n'est présente qu'au dessus du sol, tandis que l'eau liquide et les nutriments minéraux sont présents essentiellement dans le sol. L'humidité de l'air ainsi que sa température peuvent subir d'importantes variations. Des innovations évolutives ont permis aux végétaux terrestres de s'adapter à ces contraintes de la vie fixée à l'interface du sol et de l'atmosphère.

1 Les plantes développent de grandes surfaces d'échange

Les racines, des organes adaptés à l'absorption de l'eau et des ions minéraux du sol

Chaque plante dispose d'un **réseau de racines très longues et très fines** et souvent ramifiées. Leur petit diamètre maximise leur surface de contact avec l'eau du sol. Près de leurs extrémités, les racines sont parfois couvertes de très nombreux poils absorbants, très fins et très allongés, démultipliant encore les capacités de la plante à absorber eau et ions minéraux.

Chez la plupart des espèces, les racines s'associent au mycélium de champignons. Celui-ci peut former un feuillage en surface ou pénétrer à l'intérieur même de la racine jusqu'à ses cellules. Cette association, appelée **mycorhize**, est une **symbiose** : le champignon se nourrit des matières organiques fabriquées par la plante, et celle-ci bénéficie, grâce aux filaments mycéliens du champignon, d'un volume d'exploitation de l'eau du sol très supérieur à ce qu'il serait sans mycorhize.

Les feuilles, des organes adaptés à la fonction de photosynthèse

Plates et fines, le plus souvent très nombreuses, les feuilles offrent **une grande surface d'exposition aux rayons solaires**, qui peuvent ainsi atteindre toutes les cellules de leur **parenchyme chlorophyllien**. Elles sont limitées extérieurement par deux épidermes recouverts d'une **cuticule imperméable aux gaz**, ce qui protège la plante contre la déshydratation. Cependant, des milliers de petits orifices, les **stomates**, permettent l'entrée du CO_2 dans la feuille. Une fois l'épiderme franchi, ce gaz peut atteindre toutes les cellules chlorophylliennes grâce aux **lacunes** qui les séparent. Inversement, de la vapeur d'eau s'échappe à travers les stomates. Cette **transpiration** est nécessaire car elle permet de faire monter la sève depuis les racines jusqu'aux feuilles. Elle tend à dessécher la feuille, mais

l'ouverture des stomates varie selon la quantité d'eau disponible dans le sol, l'humidité et la température de l'air.

2 Les plantes face aux contraintes de l'environnement

Au cours de leur évolution, les plantes terrestres ont développé de multiples **adaptations aux conditions environnementales extrêmes**, ainsi qu'aux **variations journalières ou saisonnières** de ces conditions.

Des adaptations au manque d'eau

Les espèces végétales adaptées aux milieux de vie très secs possèdent souvent **des feuilles réduites**, voire absentes. Quand elles existent, elles sont recouvertes de **poils** et/ou d'une **cuticule épaisse**, leurs stomates sont protégés au fond de **cryptes**. Elles peuvent avoir la capacité de s'enrouler sur elles-mêmes, réduisant encore leur transpiration. Une sécheresse sévère peut provoquer la chute d'une partie ou de la totalité des feuilles. L'ensemble de ces caractéristiques et comportements limitent la photosynthèse, mais protègent la plante contre une déshydratation qui lui serait fatale. Les systèmes racinaires des plantes de milieu sec sont également adaptés à cette contrainte : ils sont souvent **très étendus** et explorent profondément le sol, ce qui optimise l'approvisionnement en eau de la plante.

Des adaptations au froid

La présence de liquides pouvant geler dans les organes pourrait causer de grands dommages à la plante. Là où ce risque existe, les végétaux montrent différentes adaptations :

- les **plantes annuelles** franchissent la mauvaise saison sous forme de graines contenant très peu d'eau, des réserves de matière organique et un embryon en vie ralentie.
- les **plantes pérennes** entrent aussi en vie ralentie et protègent leurs bourgeons (des organes indispensables à la reprise de leur développement) par d'épaisses écailles. La plupart des arbres perdent leurs feuilles. Certaines plantes herbacées ne subsistent durant l'hiver que grâce à des organes souterrains (bulbes, rhizomes, tubercules).

3 La circulation de matières au sein de la plante

La spécialisation fonctionnelle des organes (alimentation en eau et en ions, photosynthèse, stockage de réserves) rend indispensables des échanges de matières entre

organes souterrains et aériens. Ils s'effectuent grâce à un double réseau de vaisseaux conducteurs de sèves.

Le xylème et la circulation de la sève brute

Le **xylème** est constitué de files de cellules mortes, allongées, dont ne subsiste que la paroi latérale, renforcée par des dépôts de **lignine**. Les vaisseaux du xylème transportent la **sève brute** (eau et ions minéraux) provenant des poils absorbants ou des mycorhizes, depuis les extrémités des racines jusqu'aux organes aériens. Dans les feuilles les vaisseaux du xylème se ramifient abondamment (réseau de nervures). Ils apportent eau et ions minéraux aux cellules chlorophylliennes.

Le phloème et la circulation de la sève élaborée

Le phloème est constitué de files de cellules vivantes, allongées, aux parois de **cellulose**. Les vaisseaux du phloème, aussi appelés **tubes criblés**, transportent la **sève élaborée** (eau, sucres, acides aminés, etc.) depuis les cellules chlorophylliennes vers tous les organes de la plante, et en particulier vers ceux ne réalisant pas la photosynthèse (racines, bourgeons, organes de stockage, etc.).

4 Le développement d'une plante

Des zones spécialisées dans la croissance de la plante

Chaque bourgeon contient une **ébauche de tige feuillée** à l'extrémité de laquelle se trouve un **méristème caulinaire**. Il s'agit d'un massif de cellules embryonnaires : petites et cubiques, elles sont indifférenciées et capables de se diviser indéfiniment. La **multiplication** de ces cellules par **mitose**, très organisée dans l'espace et dans le temps, engendre les ébauches de la tige, des feuilles, et des futurs bourgeons. L'apex d'une racine comporte également un méristème, le **méristème racinaire**. Les cellules produites par le fonctionnement des méristèmes racinaires et caulinaires, disposées en files parallèles, peuvent subir une **élongation**. Cette croissance orientée permet l'allongement des racines et des segments de tiges, ainsi que l'agrandissement des feuilles. Des méristèmes existent aussi au sein d'organes déjà développés. C'est le cas du cambium, à l'origine des vaisseaux du bois, qui provoquent une croissance du diamètre des tiges et des racines.

La mise en place des organes de la plante

Le développement d'une plante résulte du fonctionnement de ses méristèmes, et conduit à une organisation à la fois universelle et déclinée de façons diverses selon les espèces.

Les tiges feuillées sont construites et se mettent en place de façon modulaire : chaque module, appelé **phytomère**, est constitué d'un segment de tige comprenant un entre-

nœud (zone dépourvue de bourgeon et de feuille) et un nœud (zone comportant une ou plusieurs feuilles et un ou des bourgeons axillaires, situés à l'aisselle de chaque feuille).

Le développement des ébauches de phytomères contenues dans un bourgeon consiste en une élongation des entre-nœuds, une augmentation de la taille des feuilles, suivie d'une différenciation des tissus au sein de ces organes (formation des vaisseaux conducteurs de sèves, des parenchymes chlorophylliens, etc.).

À quelques centimètres au-dessus de l'apex d'une racine, des **racines secondaires** peuvent se former. Le massif de cellules méristématiques qui donne naissance à la nouvelle racine provient de la **dédifférenciation** de certaines cellules proches des vaisseaux conducteurs de sève. Ces cellules retournent à l'état embryonnaire et se divisent activement, constituant ainsi le méristème apical de la nouvelle racine. Selon les espèces, on distingue des systèmes racinaires pivotants (une racine principale peu ramifiée) ou fasciculés (pas de racine principale, mais de nombreuses racines de tailles équivalentes).

5 Une organogenèse sous influences

Un développement contrôlé par des hormones

L'**auxine** est la première **hormone végétale** qui a été découverte. Elle est principalement sécrétée par les bourgeons apicaux et les jeunes feuilles, et migre vers le bas, jusqu'aux racines. Elle provoque une élongation des cellules et favorise la formation de racines secondaires ; elle inhibe au contraire le développement des bourgeons axillaires. Ses effets dépendent de sa concentration, mais aussi de la présence et de l'abondance d'autres hormones : ainsi, les **cytokinines** sont des hormones produites par les racines, qui migrent vers les parties aériennes de la plante. Contrairement à l'auxine, elles stimulent le développement des bourgeons axillaires.

Un développement influencé par des conditions du milieu

Soumises à un éclairage latéral, les tiges se courbent en direction de la source lumineuse. Ce **phototropisme** résulte de la **migration latérale de l'auxine** vers les cellules les moins éclairées, dont l'élongation sera de ce fait plus forte.

Bien d'autres facteurs environnementaux interviennent dans le développement de la plante : la gravité est perçue par des organites au sein des cellules végétales ce qui modifie la répartition des hormones et oriente verticalement la croissance des tiges et des racines (**gravitropisme**). Le froid ralentit la croissance des entre-nœuds et nanifie les plantes. Un vent soufflant toujours dans la même direction modifie la silhouette des arbres et ralentit leur développement.

À retenir

- **Les plantes développent de grandes surfaces d'échange**

Les plantes terrestres s'adaptent à la vie fixée à l'interface du sol et de l'atmosphère en développant de grandes surfaces d'échange dans ces deux milieux : leurs racines absorbent efficacement l'eau et les ions du sol grâce à leurs **poils absorbants** et aux **mycorhizes**. Leurs feuilles fines et nombreuses optimisent l'exposition des cellules chlorophylliennes à la lumière, et les **stomates** permettent leur approvisionnement en CO_2 tout en limitant les pertes en eau grâce à leur ouverture variable.

- **Les plantes face aux contraintes de l'environnement**

En milieu très sec, les plantes limitent leurs pertes en eau grâce à des **feuilles de taille réduite**, recouvertes d'une **épaisse cuticule**, de **poils** et de **cryptes** protégeant leurs stomates. Leur réseau racinaire très étendu favorise l'absorption de l'eau du sol.

Leur capacité à entrer en **vie ralentie** permet aux plantes de survivre durant les périodes froides, soit sous forme de **graines**, soit sous forme d'**organes de réserves** souterrains, ou encore en protégeant leurs bourgeons par d'épaisses écailles.

- **La circulation de matières au sein de la plante**

Les vaisseaux du **xylème** transportent la **sève brute** (eau et ions minéraux) provenant des racines jusqu'aux feuilles, où se déroule la photosynthèse. Les vaisseaux du **phloème** transportent la **sève élaborée** contenant les produits de la photosynthèse (sucres, acides aminés) depuis les cellules chlorophylliennes vers tous les organes de la plante, et en particulier vers les **organes de stockage**.

- **Le développement d'une plante**

Le développement d'une plante associe **croissance** et **différenciation** d'organes. La croissance en longueur est assurée par les **mitoses** se déroulant dans les **méristèmes** caulinaires et racinaires. D'autres méristèmes existent et permettent la croissance en épaisseur des organes ou la ramification des racines. Le fonctionnement des méristèmes caulinaires produit une **organisation modulaire** des tiges feuillées. Chaque module, ou **phytomère**, est constitué d'un entrenœud et d'un nœud, où s'insèrent feuilles et bourgeons axillaires.

- **Une organogenèse sous influences**

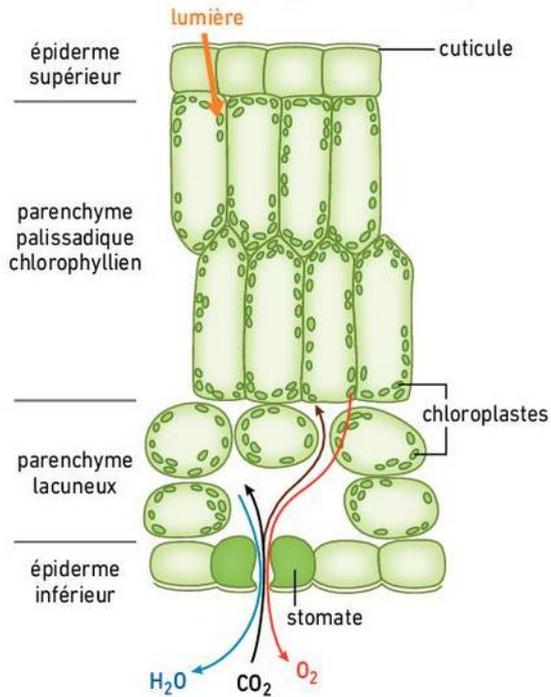
L'**auxine** et d'autres **hormones végétales** contrôlent l'organogenèse de la plante. Leurs concentrations et leurs interactions déterminent par exemple l'allongement et la ramification des tiges, la formation des racines secondaires. L'organogenèse peut être influencée par de nombreux facteurs environnementaux, dont l'intensité et l'hétérogénéité de l'éclairement (**phototropisme**), la gravité (**gravitropisme**), la température, le vent.

Mots-clés

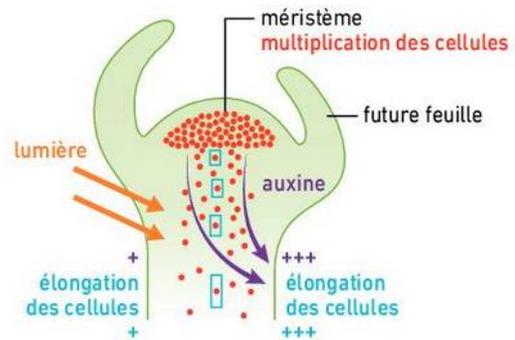
- Bourgeon ● Élongation ● Feuille ● Hormone végétale ● Méristème caulinaire ● Méristème racinaire ● Mycorhize
- Organogenèse ● Phloème ● Phytomère ● Poil absorbant ● Racine ● Stomate ● Tige ● Vaisseau conducteur
- Xylème

L'organisation fonctionnelle des plantes à fleurs

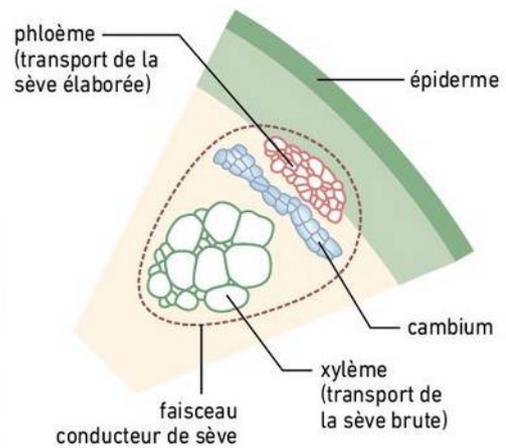
La feuille et ses échanges avec l'atmosphère



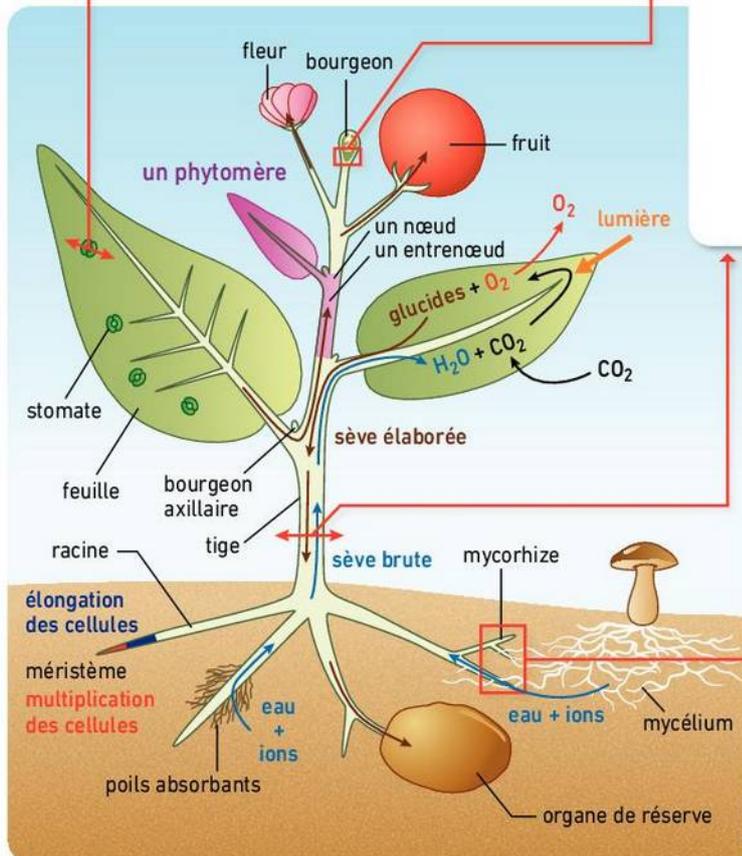
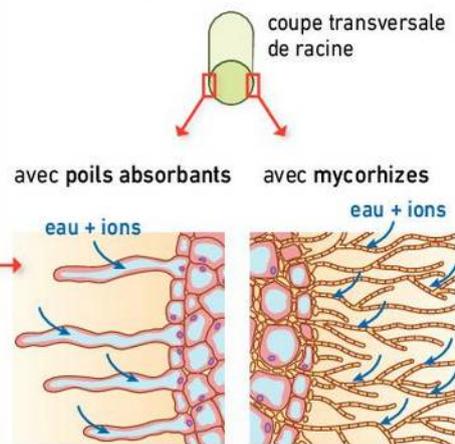
Le méristème caulinaire, zone de croissance



Des tissus conducteurs de sèves



La racine et l'absorption de l'eau et des ions du sol



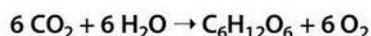


1 Les structures impliquées dans la photosynthèse

Les plantes, des organismes autotrophes

Les plantes sont capables de produire toutes leurs molécules organiques (glucides, lipides, protides, acides nucléiques, vitamines...) à partir de molécules minérales (**dioxyde de carbone** prélevé dans l'air entré par les stomates, **eau** et **ions minéraux** prélevés dans le sol et transportés grâce à la sève brute) : ce sont des organismes **autotrophes**. Cette autotrophie nécessite de l'énergie lumineuse et se fait au cours d'un processus complexe, la **photosynthèse**.

Le **glucose** ($C_6H_{12}O_6$) étant l'une des premières molécules organiques produites lors de ce processus, l'équation bilan de la photosynthèse peut s'écrire ainsi :



Les organes chlorophylliens réalisent la photosynthèse

La présence d'amidon (une forme de stockage du glucose) peut être mise en évidence dans les **parties vertes** des plantes, seulement si elles ont reçu suffisamment de lumière. Ainsi, la production de matière organique par photosynthèse se fait dans les parties aériennes et vertes de la plante, principalement au niveau des **feuilles**.

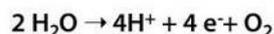
C'est surtout dans leurs parenchymes que se trouvent les **cellules chlorophylliennes**, pourvues d'organites spécialisés dans la photosynthèse : les **chloroplastes**. Ils contiennent un ensemble de molécules capables d'absorber l'énergie lumineuse, les **pigments chlorophylliens**.

2 Les processus biochimiques de la photosynthèse

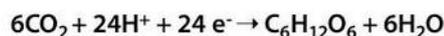
La photosynthèse : des réactions d'oxydoréduction

En 1937, Robert Hill constata que des chloroplastes isolés et bien éclairés libèrent du dioxygène, à condition qu'un oxydant (un accepteur d'électron) soit ajouté au milieu. Cette expérience montre que la photosynthèse s'accompagne de **réactions d'oxydoréduction activées par l'énergie lumineuse**.

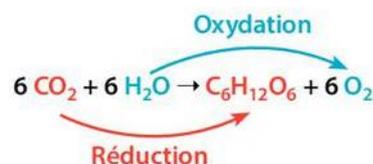
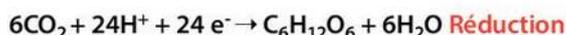
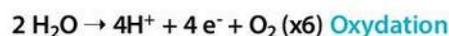
En 1941, Ruben et Kamen au cours d'une série d'expériences montrent que le dioxygène produit lors de la photosynthèse a pour origine la molécule d'eau. Au cours de la photosynthèse, **des molécules d'eau sont donc oxydées**, libérant du dioxygène mais aussi des protons et des électrons. C'est la **photolyse de l'eau** :



Les électrons ainsi libérés doivent être captés par une autre molécule, qui sera alors réduite. Les expériences de Calvin et Benson au cours des années 1950 montrent que le **dioxyde de carbone** est transformé au cours de la photosynthèse en différentes molécules organiques comme des **glucides** (glucose ou autres sucres solubles) et des **acides aminés**. À la suite de réactions chimiques complexes, le carbone qui était lié exclusivement à l'oxygène dans le CO_2 se retrouve lié dans les molécules organiques à d'autres carbones et à des hydrogènes. Cela correspond à une **réduction du dioxyde de carbone**, dont le bilan est le suivant :



La photosynthèse correspond donc à une **réduction de CO_2** en matière organique couplée à l'**oxydation de l'eau**.



Le rôle de la lumière

La réduction du dioxyde de carbone n'est pas une réaction spontanée : **elle nécessite de l'énergie** qui est apportée initialement par la lumière. Les cellules chlorophylliennes présentent donc des structures qui permettent de capter cette énergie lumineuse et de la convertir en énergie chimique, nécessaire à la synthèse de la matière organique. Ces structures sont les **pigments chlorophylliens**, (xanthophylles, carotènes, chlorophylles a et b) présents au sein des chloroplastes. Sous l'effet de la lumière absorbée par cet ensemble de pigments, des électrons de la chlorophylle a sont portés à un niveau d'énergie supérieur, puis transférés à d'autres molécules. Ainsi **l'énergie lumineuse est convertie en énergie chimique**. Cette énergie chimique permet *in fine* de réduire le dioxyde de carbone en matière organique.

3

Le devenir des produits de la photosynthèse

La matière organique est exportée et transformée

Les molécules organiques produites par la photosynthèse sont en partie utilisées par les tissus chlorophylliens eux-mêmes. Le reste est exporté sous forme de petites molécules solubles (**acides aminés, sucres**) vers tous les organes de la plante, et en particulier vers les organes non chlorophylliens (racines, bourgeons, fruits...) via la **sève élaborée**.

Ces sucres et ces acides aminés sont alors transformés et permettent la production d'une grande diversité de composés organiques, remplissant de nombreuses fonctions au sein de la plante.

Des matières organiques assurant la croissance et le port de la plante

Les cellules des plantes possèdent une paroi formée de différents composés organiques assemblés en couches superposées (pectines, hémicelluloses et cellulose). La **cellulose** est un polymère de glucose synthétisé grâce à une enzyme, la cellulose synthase, chez les jeunes cellules en cours de croissance. Leur paroi étant initialement fine et déformable, ces cellules s'allongent sous l'effet de la pression de turgescence. Exportée du cytoplasme vers la paroi, la cellulose y devient peu à peu le constituant principal et rend alors la paroi de plus en plus épaisse et rigide, finissant par s'opposer à la poursuite de la **croissance en longueur**.

Certaines cellules imprègnent leurs parois d'autres composés organiques, les **lignines**. Il s'agit de polymères dont les sous-unités sont issues d'une voie métabolique transformant un acide aminé issu de la photosynthèse (la phénylalanine) grâce à différentes **enzymes**. L'accumulation de lignine dans la paroi des cellules du xylème les imperméabilise, facilitant la circulation de la sève brute. La lignine est aussi présente au niveau des cellules du **sclérenchyme, un tissu de soutien** fréquent chez les plantes herbacées. Chez les plantes dites « ligneuses » un xylème secondaire se forme et s'épaissit année après année dans les organes pérennes (tiges, racines). Ce tissu se lignifie et donne un matériau à la fois léger et rigide, le **bois**, responsable du **port dressé** qui permet à certains arbres d'atteindre des tailles de plusieurs dizaines de mètres de haut.

Le stockage de la matière organique

En hiver ou lors de longues périodes de sécheresse, certaines plantes perdent leurs feuilles, d'autres perdent leurs parties aériennes, d'autres encore meurent. Des organes sélectionnés au cours de l'évolution permettent de stocker

de la matière organique en attendant le retour de conditions plus favorables au développement et à la photosynthèse.

Les plantes herbacées pérennes possèdent des organes souterrains capables d'accumuler des réserves à l'abri des intempéries, comme les **bulbes** (tulipe, oignon), les **tubercules** (pomme de terre, carotte), les **rhizomes** (iris, gingembre). Les réserves dans ces organes sont le plus souvent glucidiques (**saccharose** de la betterave ou de l'oignon ; **amidon** stocké dans les **amyloplast**es de la pomme de terre).

Chez les plantes annuelles, la pérennité est assurée par les graines. Produit de la reproduction sexuée (voir le chapitre 3), la **graine** contient des matières organiques qui nourriront l'embryon, puis la jeune plantule lors de la germination. La nature des réserves au sein des graines diffère selon les espèces. Il peut s'agir de **glucides** (blé, riz), de **lipides** (noix, amande) ou encore de **protides** (pois, lentille).

Beaucoup de plantes possèdent des fruits charnus comestibles, riches en matières organiques (surtout des glucides). Ces fruits sont consommés par des animaux frugivores (certains oiseaux, reptiles, mammifères) ce qui contribue à la dispersion de leurs graines (voir le chapitre 3).

La matière organique de la plante et ses interactions avec d'autres espèces

Au cours de l'évolution des plantes, différentes innovations permettant de limiter l'impact de la prédation ont été sélectionnées. Ainsi, certaines plantes produisent des **tanins**. Il s'agit de molécules construites par assemblage de plusieurs phénols (petites molécules cycliques). Dans les cellules, les tanins sont produits par une voie de biosynthèse qui a pour précurseur le glucose, et qui implique de nombreuses enzymes. En se liant avec les protéines alimentaires ou avec les enzymes digestives du phytophage, les tanins produisent des précipités aux **effets toxiques ou répulsifs**, qui limitent la pression de prédation. De plus, les plantes agressées par des phytophages produisent davantage de tanins que les plantes indemnes : elles adaptent leur métabolisme en fonction des agressions qu'elles subissent.

La vie fixée pose aussi le problème du rapprochement des gamètes (voir chapitre 3). De nombreuses fleurs produisent un pollen abondant et un liquide riche en sucres et autres substances nutritives, le nectar. Elles attirent les **insectes pollinisateurs** en signalant la présence de ces matières comestibles grâce à des molécules organiques volatiles (parfums) et en affichant des couleurs vives. Par exemple, les fleurs roses, rouges ou violettes contiennent des **anthocyanes**. Il s'agit d'une famille de molécules fabriquées grâce à une voie de biosynthèse proche de celle des tanins, mais aboutissant à des pigments rouges, bleus ou pourpres, qui sont stockés dans les vacuoles des cellules, et qui rendent les fleurs plus attractives pour les pollinisateurs.

À retenir

La production de matière organique par photosynthèse

Les plantes sont des organismes **autotrophes**, car elles produisent leur matière organique à partir de matières minérales. Cette production se déroule à la lumière : c'est la **photosynthèse**. L'énergie lumineuse est captée par des **pigments chlorophylliens** présents dans des organites spécialisés, les **chloroplastes**, abondants dans les organes verts des plantes, comme les feuilles.

La photosynthèse, des oxydoréductions activées par la lumière

La production de matière organique correspond à une **réduction du dioxyde de carbone**, à l'issue de laquelle le glucose, d'autres **sucres solubles** et des acides aminés sont produits. Cette réduction est couplée à la **photolyse de l'eau**, une **oxydation des molécules d'eau** libérant du dioxygène. Cette réaction n'a lieu qu'en présence de lumière. En effet, la production de matière organique nécessite un apport d'énergie. C'est l'**énergie lumineuse** captée par les pigments chlorophylliens puis convertie en **énergie chimique** qui active ces réactions d'oxydoréduction.

Circulation et transformations de la matière organique

Les produits de la photosynthèse sont distribués via la **sève élaborée** dans tous les organes de la plante. Des **enzymes variées** les métabolisent, produisant des **molécules très diverses** capables d'assurer de **nombreuses fonctions** au sein de la plante.

Matière organique, croissance et port de la plante

La **cellulose** est une molécule fibreuse produite dans les zones d'élongation des organes. Elle s'accumule progressivement dans la paroi des cellules végétales, participant au contrôle de leur **croissance**. La paroi de certaines cellules s'enrichit en **lignines** et devient très rigide. Elles constituent alors des tissus comme le sclérenchyme ou le bois, qui assurent le soutien et le **port de la plante**.

Le stockage de la matière organique

Certaines plantes stockent des molécules organiques diverses dans des **organes de réserves** (bulbes, rhizomes, tubercules) qui leur permettent de **résister aux conditions défavorables**, ou d'assurer leur reproduction asexuée. Les **graines** et certains fruits contiennent aussi des réserves qui contribuent au succès de la reproduction sexuée.

Matière organique et interactions avec d'autres espèces

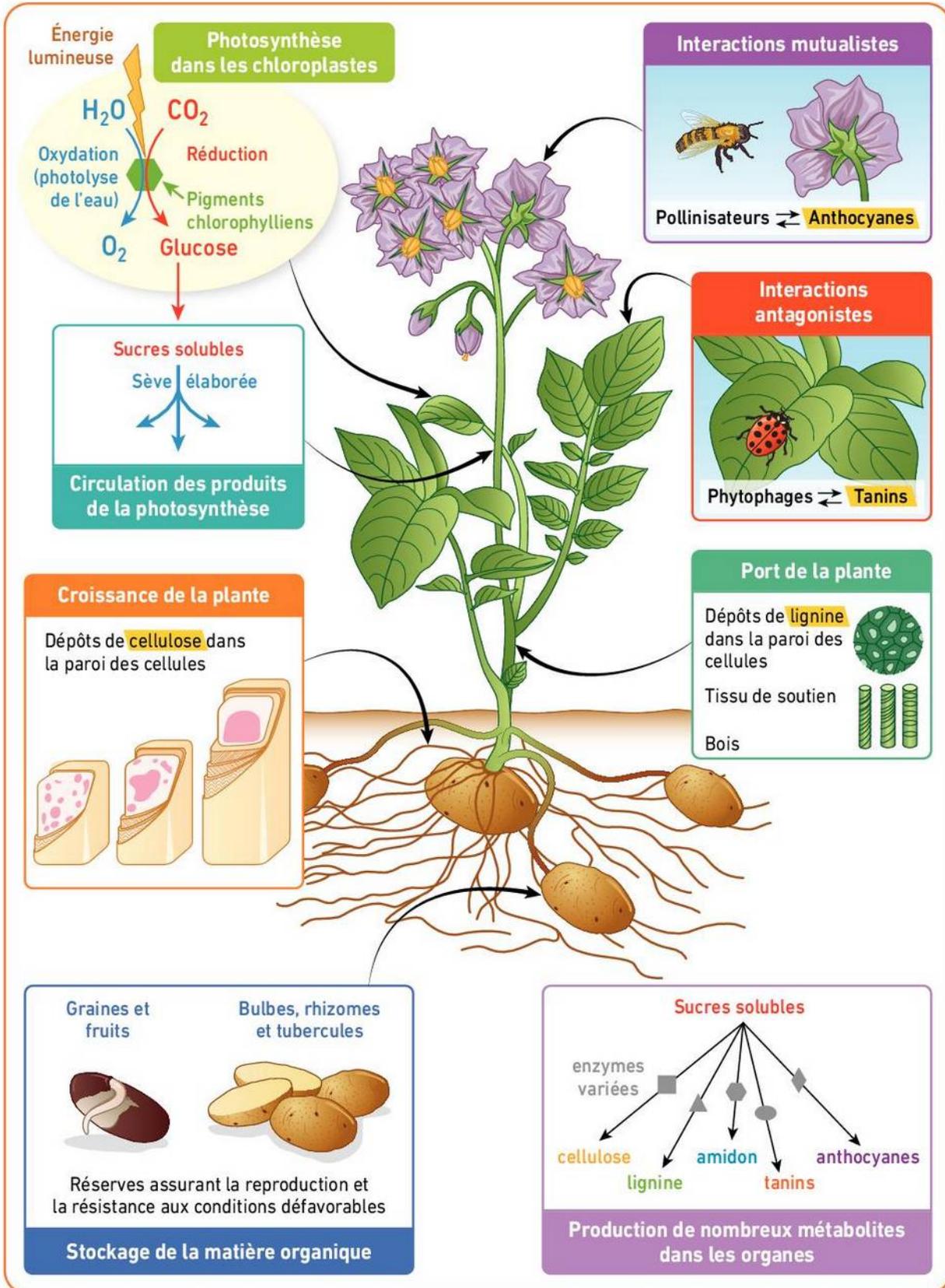
Plantes et **phytophages** sont en **interaction antagoniste**. Les **tanins** sont des molécules qui rendent la plante répulsive voire toxique, et permettent ainsi de limiter la prédation. Des **interactions mutualistes** avec d'autres êtres vivants existent aussi. Ainsi, les couleurs vives de certaines fleurs contenant des **anthocyanes** attirent les **insectes pollinisateurs**, qui s'y nourrissent et participent au transport du pollen.

Mots-clés

Chloroplaste ● Croissance ● Énergie chimique ● Enzymes ● Interactions antagonistes ● Interactions mutualistes ● Matière organique ● Organes de réserves ● Photolyse de l'eau ● Photosynthèse ● Pigments chlorophylliens ● Port de la plante ● Réduction du CO₂.

Schéma bilan

La plante, productrice de matière organique





La vie fixée chez les plantes à fleurs, aussi appelées angiospermes, impose des contraintes qui se sont traduites par des adaptations leur permettant de se nourrir, d'interagir avec leur milieu et aussi de se reproduire par voie sexuée ou asexuée, assurant ainsi leur survie et leur dissémination à la surface des continents. Les deux types de reproduction peuvent exister chez une même plante.

1 La reproduction asexuée, se reproduire sans gamètes

Une grande diversité d'organes permet la reproduction asexuée

La reproduction asexuée ou végétative est un mode de reproduction assuré sans fécondation à partir d'un individu parental unique. Elle peut se faire grâce à divers organes de la plante. Certains ne sont pas spécialisés dans cette fonction reproductive. Ce sont des fragments de tiges feuillées ou des feuilles qui se séparent naturellement ou artificiellement du pied mère, et peuvent régénérer une plante entière. D'autres sont des organes dédiés à cette fonction reproductive. Ce sont par exemple des tiges particulières, comme les stolons des fraisiers ou les dragons des framboisiers. Enfin, certains organes de réserve permettent aussi une reproduction asexuée. Il s'agit des tubercules, des rhizomes et des bulbes.

Les propriétés des plantes qui permettent la reproduction asexuée

La reproduction asexuée repose sur la **totipotence** de certaines cellules des tiges, des feuilles et des racines, capables après différenciation de donner naissance à de nouveaux méristèmes racinaires et caulinaires. Grâce à leurs **capacités de croissance indéfinie**, ces méristèmes permettent de reconstituer une plante entière, si les conditions environnementales le permettent.

La reproduction asexuée permet l'accroissement rapide des populations végétales et ainsi la colonisation efficace des milieux continentaux. Elle génère des clones, formés d'individus possédant la même information génétique que le parent unique, ce qui peut se révéler défavorable en cas de changements environnementaux ou d'infection par un pathogène.

Un mode de reproduction utilisé par l'Homme

Les horticulteurs exploitent depuis des siècles ces propriétés pour **cloner une plante intéressante** et la produire en grandes quantités. Selon les espèces, on peut procéder :
– par simple séparation et repiquage des bulbes, tubercules ou rhizomes ;

- par bouturage (une feuille ou une tige feuillée est séparée de la plante mère, puis on favorise la formation de racines) ;
- par marcottage (on favorise la formation de racines sur une tige feuillée, puis on la sépare de la plante mère).

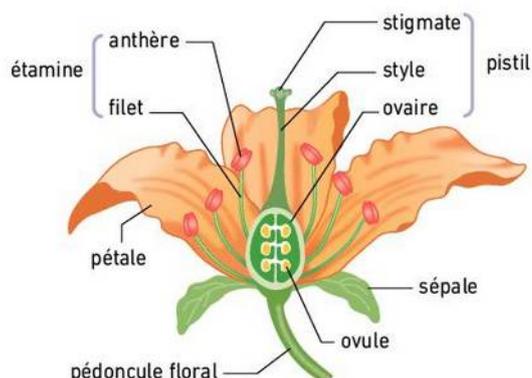
À partir du **xx^e** siècle, les progrès des connaissances en physiologie végétale ont permis la mise au point de techniques de **culture *in vitro*** qui ont conduit, à partir de tissus, voire de cellules isolées, à la régénération et à la multiplication très rapide des plantes sur un milieu nutritif approprié (milieu gélosé contenant des sels minéraux, des vitamines, des sucres et des hormones végétales), en conditions aseptiques.

2 Les fleurs permettent la reproduction sexuée

Les fleurs, de la production de gamètes à la fécondation

D'une grande variété de formes, de dimensions ou de couleurs, les fleurs renferment les organes reproducteurs mâles et/ou femelles. Elles comportent classiquement, de l'extérieur vers l'intérieur, des pièces florales organisées en cercles concentriques :

- Les **sépales**, souvent verts, protègent les organes reproducteurs tant qu'ils sont immatures (fleur « en bouton »).
- Les **pétales**, de forme et de couleur très variables. Lorsqu'ils sont larges et vivement colorés, ils attirent les insectes pollinisateurs.
- Les **étamines**, pièces florales mâles formées d'une partie filamenteuse, le **filet**, supportant une partie renflée, l'**anthère**, dans laquelle se forment les **grains de pollen**, contenant les gamètes mâles.
- Le **pistil**, pièce florale femelle constituée d'un ou plusieurs carpelles. Chaque carpelle comporte un **stigmate**, sur lequel peut se déposer le pollen, ainsi qu'une pièce intermédiaire, le **style**, et un **ovaire creux** renfermant les **ovules**, contenant les gamètes femelles.



■ Schéma d'une fleur d'angiosperme.

Les grains de pollen déposés sur le stigmate du pistil d'une fleur de la même espèce absorbent la solution sucrée produite par celui-ci, germent et forment chacun un tube pollinique qui s'insinue dans les tissus du style et amène un noyau mâle jusqu'à un ovule, situé dans l'ovaire.

Quand la fleur est **hermaphrodite** (possédant pistil et étamines) ou que la plante porte des fleurs mâles et des fleurs femelles (plante monoïque), l'**autofécondation** est parfois possible. Cependant, la plupart des angiospermes ont recours à une **fécondation croisée** qui présente l'avantage de produire une **descendance génétiquement plus diversifiée**. Elle est favorisée par diverses adaptations : fleurs mâles et femelles sur des plantes différentes (espèces dioïques), décalage temporel dans la maturation des gamètes mâles et femelles, existence de barrières physiques entre les organes reproducteurs, incompatibilité d'ordre génétique entre pollen et stigmate.

► La pollinisation, étape préalable à la rencontre des gamètes et à la fécondation

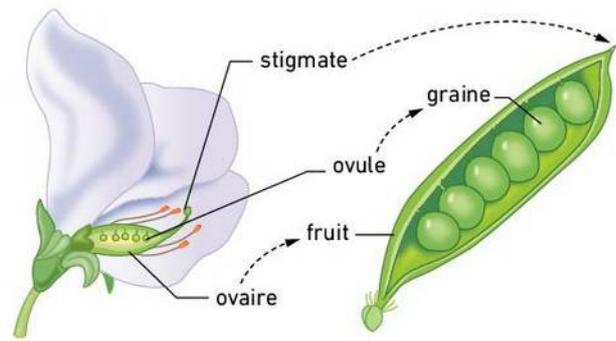
La fécondation croisée impose le transport du pollen. Certaines espèces sont pollinisées grâce au **vent** (anémogamie). Leurs fleurs présentent de nombreuses adaptations à ce mode de transport aléatoire : généralement discrètes, sans nectar ni odeur, aux étamines et pistils longs, bien exposés au vent, elles produisent en abondance du pollen de petite taille, sans ornementation, avec parfois des structures portantes (ballonnets).

D'autres sont pollinisées par des **animaux** (zoogamie) qui assurent un transport du pollen plus ciblé. Elles sont dotées de fleurs généralement de grande taille, colorées, aux étamines courtes et stigmates massifs, et qui produisent de gros grains de pollen ornementés.

Pour attirer les pollinisateurs, ces fleurs émettent des signaux variés. Il peut s'agir de **signaux visuels** (couleurs, guides, formes...), de **signaux chimiques** (odeurs, phéromones attractives) et de **signaux trophiques** (nectar sucré, pollen). Parallèlement, les animaux pollinisateurs (surtout des insectes, parfois des oiseaux comme les colibris ou des mammifères comme les chauves-souris) ont développé des organes adaptés à la récolte du nectar, et au transport du pollen. On a donc ainsi une **coévolution** de chacun des partenaires (plante et pollinisateur).

► De la fleur au fruit

Après la fécondation, la fleur subit des transformations : les sépales, pétales et étamines fanent. **L'ovaire se transforme en fruit**, à l'intérieur duquel **les ovules se transforment en graines**. La paroi du fruit peut être charnue et gorgée de réserves (cerise, pêche, framboise, myrtille...), soit sèche et dure (noisette, colza, érable, pissenlit...) en relation avec le mode de dispersion des graines. Celles-ci subissent une **maturation** (déshydratation, stockage de réserves fournies par l'organisme parental et entrée en **vie ralentie**).



■ Formation d'une gousse de petits pois à partir d'une fleur fécondée.

► La dispersion des fruits et des graines à distance

Grâce à différentes modalités, les fruits et les graines sont disséminés à distance de la plante mère, ce qui évite la compétition et permet la colonisation de nouveaux espaces. La dispersion des graines peut s'effectuer par la plante elle-même grâce à des dispositifs actifs de type catapulte, ou par des agents extérieurs comme le vent, l'eau ou les animaux. Les fruits et les graines présentent **des adaptations liées à la nature de l'agent disperseur** :

- légèreté et structures portantes pour la dissémination par le vent ;
- légèreté et flottabilité en cas de transport par l'eau ;
- crochets ou surfaces collantes permettant le transport passif par les animaux.
- fruits pulpeux, colorés et nutritifs incitant à la consommation par les animaux.

Dans ce dernier cas, le transit des graines dans l'appareil digestif soumet les graines à l'action des enzymes, ce qui altère leurs téguments et favorise la germination, après rejet dans les excréments fertilisants. Ce type de dispersion repose sur **une relation mutualiste** entre plante et animal.

Pollinisation et dispersion des fruits et des graines qu'ils contiennent constituent **des étapes de mobilité** dans la reproduction des **plantes**, leur permettant de coloniser de vastes territoires.

► La germination ou le développement d'une nouvelle plantule

La graine contient un **embryon** issu du développement du zygote et des tissus contenant des réserves (amidon, protéines, lipides) protégés par une enveloppe, le tégument. Une fois la graine formée, l'embryon entre en vie ralentie. Lorsque les conditions sont favorables, la graine s'imbibe d'eau, son activité métabolique redevient très active (fabrication d'enzymes, respiration cellulaire...). L'embryon reprend son développement grâce à la mobilisation des réserves de la graine. Bientôt, la première racine puis la première tige feuillée déchirent le tégument : c'est **la germination**, à l'origine d'une nouvelle plantule.

À retenir

► **Une reproduction asexuée, sans gamète ni fécondation**

La **reproduction asexuée** repose sur la **totipotence** des cellules végétales, c'est-à-dire leur capacité à se différencier et à se redifférencier, mais aussi sur les capacités de **croissance indéfinie** des plantes. Ce mode de reproduction produit **des clones, génétiquement identiques** à leur unique parent. Qu'elle mette en jeu ou non des organes spécialisés, la reproduction asexuée permet à la plante de coloniser rapidement et à moindre coût énergétique son environnement. Ces propriétés sont exploitées par l'Homme dans ses pratiques culturales et les techniques de **clonage in vitro**.

► **La fleur contient les organes de la reproduction sexuée**

Chez les angiospermes, la **fleur** est organisée en enveloppes concentriques et comporte des pièces stériles (sépalés et pétales) et des pièces fertiles, **étamines** et carpelles constituant le **pistil**, au sein desquels se forment par méiose les **grains de pollen** et les **ovules**, renfermant les gamètes mâles et femelles.

► **La pollinisation, étape de mobilité nécessaire à la fécondation**

Bien que la plupart des fleurs soient hermaphrodites, l'autofécondation est souvent impossible, et les plantes, du fait de leur immobilité, doivent recourir au transport de leur pollen afin de réaliser une fécondation croisée.

Cette **pollinisation** est assurée selon les espèces par le vent, l'eau ou les animaux (principalement des insectes). Ces derniers sont attirés par divers signaux. La collaboration plante – pollinisateur qui se construit grâce aux influences réciproques entre les deux partenaires est le résultat d'une **coévolution**.

► **De la fleur au fruit**

À la suite de la pollinisation, les grains de pollen déposés sur le stigmate du pistil germent et amènent chacun un noyau mâle au contact d'un noyau femelle contenu dans l'ovule. La fécondation peut se produire et les ovules se transforment en **graines** contenues dans le **fruit** résultant de la transformation du pistil.

La graine contient un **embryon** et des **réserves organiques** qui seront utilisées pour développer, au moment de la **germination**, une nouvelle plante génétiquement différente de ses parents.

► **La dispersion des graines, autre étape de mobilité**

La **dissémination des graines** permet la conquête de nouveaux territoires, mais évite aussi la compétition avec la plante mère. Les fruits et les graines présentent des adaptations en relation avec leur mode de dissémination par des vecteurs différents, le vent, l'eau ou des animaux. Dans ce cas, elle peut être le résultat d'une **coévolution**.

Mots-clés

Clonage ● Coévolution ● Croissance indéfinie ● Dissémination des graines ● Étamines ● Fleur ● Fruit ● Germination ● Grain de pollen ● Graine ● Ovule ● Pistil ● Pollinisation ● Reproduction asexuée ● Totipotence

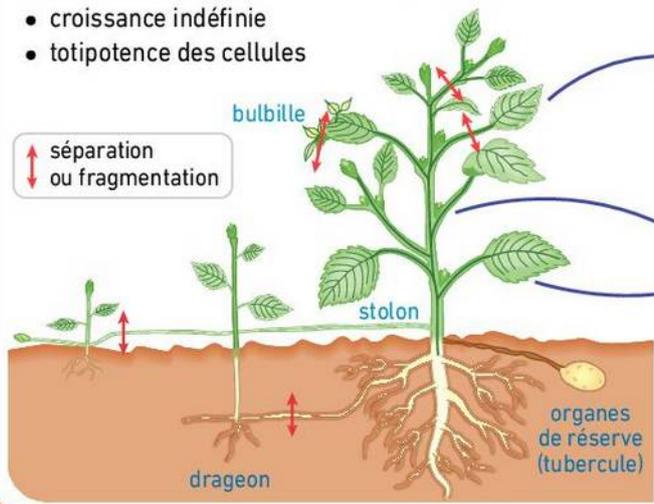
Schéma bilan

Reproduction de la plante, entre vie fixée et mobilité

Une reproduction asexuée, la multiplication végétative

Des capacités naturelles de la plante...

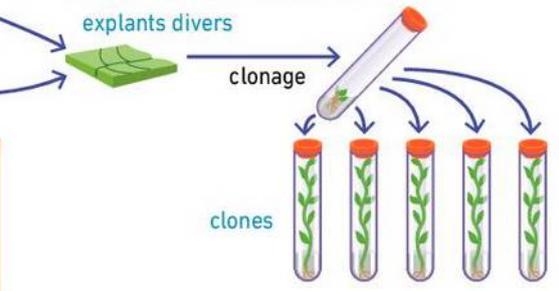
- croissance indéfinie
- totipotence des cellules



... utilisées en horticulture



... utilisées en culture in vitro



Une reproduction sexuée assurée par la fleur

Pollinisation par les insectes

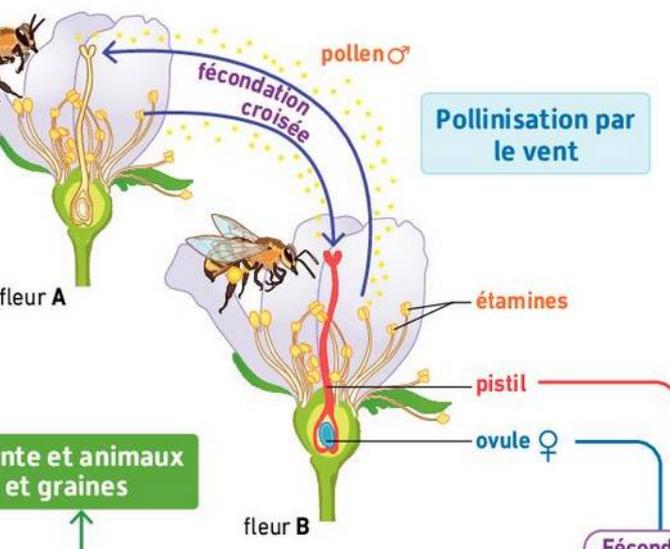
La plante présente des signaux attractifs

- visuels (couleurs, formes)
- chimiques (odeurs, phéromones)
- trophiques (nectar, pollen)

L'animal présente aussi des adaptations

favorisant le repérage des fleurs, la collecte et le transport du pollen

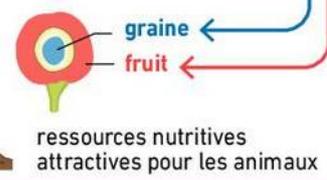
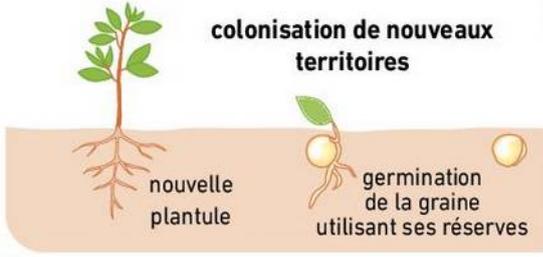
Une coévolution entre plante et animaux pour disperser pollen et graines



Pollinisation par le vent

Dispersion des fruits et des graines

- vent, eau
- animaux
- dispositifs spécifiques





1 Les processus de domestication des plantes

Les débuts de la domestication

Au sortir de la dernière grande glaciation, il y a environ 11 000 ans, des populations de chasseurs-cueilleurs ont commencé à semer les graines des plantes sauvages qu'elles consommaient. C'est le début de l'agriculture. Récolte après récolte, **une relation mutualiste** entre plantes cultivées et êtres humains s'est établie.

Les agriculteurs ont plus ou moins volontairement exercé une pression de **sélection empirique** sur ces plantes cultivées en favorisant la reproduction des individus les mieux adaptés au nouvel environnement que constitue le champ. Ainsi, les plantes dont les graines ou fruits mûrissent de façon synchrone et ne tombent pas spontanément au sol une fois à maturité ont été sélectionnées. D'autres pressions de **sélection artificielle** ont joué, notamment en faveur de la reproduction des individus dont les parties consommées (fruits, graines, organes de réserves...) présentaient les « meilleurs » phénotypes (taille, qualités gustatives et nutritives...). **Les plantes sauvages sont ainsi devenues peu à peu des plantes domestiquées**, dépendantes de l'Homme pour leur reproduction (semis, récolte des semences) et pour leur développement (travail du sol, désherbage, fertilisation, irrigation).

Réciproquement, **la domestication des plantes a sédentarisé les populations humaines**, provoquant la transformation de sociétés nomades en des sociétés aux structures sociales et économiques de plus en plus complexes.

Ce processus s'est produit dans différents lieux du globe, donnant naissance aux espèces de plantes domestiquées : le maïs au Mexique, le blé et l'orge au Moyen-Orient, le riz en Asie, par exemple.

Au cours des siècles, les plantes cultivées se sont dispersées sur la planète, suivant les populations humaines dans leurs migrations. **Des pressions de sélection diversifiées** selon les régions ont permis l'émergence de **nombreuses variétés** au sein de chaque espèce de plante cultivée (variétés de pays).

L'accélération du processus de domestication

La sélection empirique produit des populations de plantes cultivées aux caractéristiques hétérogènes. Au cours du **xix^e siècle**, la modernisation de l'agriculture européenne et l'industrialisation des filières de transformation nécessitent

des plantes calibrées, adaptées aux machines. De plus, il est nécessaire d'améliorer les rendements agricoles pour rentabiliser les machines et nourrir une population qui s'urbanise. C'est dans ce contexte que débutent les premières expériences d'hybridation sur le maïs. Il faut cependant attendre le début du **xx^e siècle** pour que soient mises au point des techniques de **sélection programmée** à grande échelle. **L'hybridation de lignées pures** sélectionnées pour leurs qualités agronomiques conduit à une **hausse significative des rendements agricoles** et à une **homogénéisation des populations variétales**. La création de variétés hybrides s'appuie sur une recherche agricole qui se professionnalise. Elle s'accélère à partir des années 1960 du fait de l'accumulation des connaissances sur la physiologie et la génétique des plantes. La création de ces variétés de plus en plus productives s'accompagne d'une intensification croissante de l'agriculture, afin de répondre aux besoins de ces plantes et aux besoins alimentaires de populations humaines en croissance exponentielle après la Seconde Guerre mondiale.

La création variétale se poursuit dans les années 80 et 90 grâce à la mise au point de nouvelles biotechnologies. Associée à la mise au point antérieure des techniques de **culture *in vitro***, la production de **plantes génétiquement modifiées** constitue une rupture technologique majeure, car elle permet d'inscrire dans le génome d'une plante de nouveaux caractères, comme la résistance à des maladies ou à des herbicides, en s'affranchissant des barrières entre espèces.

Au **xxi^e siècle**, **l'édition génomique**, facilitée par la mise au point du système moléculaire CRISPR-Cas9, ouvre de nouvelles perspectives dans la création variétale. Introduisant des caractères agronomiquement intéressants dans des variétés anciennes (voire dans des plantes sauvages) aux caractéristiques plus robustes que les variétés récentes, l'édition génomique permet en effet d'envisager **une domestication génétiquement ciblée et accélérée** (en quelques années seulement).

La création des variétés nouvelles suit un processus complexe et très coûteux, souvent émaillé d'échecs, qui ne peut être mené qu'à une échelle industrielle. **Une filière spécialisée dans la création, la production et la commercialisation de semences** s'est ainsi constituée. Des législations nationales et supranationales soucieuses de protéger les industries semencières et la qualité des semences encadrent cette filière, interdisant par exemple la vente de semences entre agriculteurs. Cependant, la tendance actuelle est en faveur d'un relâchement des contraintes : ainsi, la législation européenne redonne à partir de 2021 la liberté aux agriculteurs biologiques de produire et de commercialiser leurs propres semences.

2 Les effets de la domestication des plantes

Les effets sur les plantes

Le processus de domestication des plantes a eu deux effets génétiques majeurs. Il a favorisé la fixation dans les populations cultivées de mutations pour des caractères particuliers (gènes contrôlant par exemple le rendement, la précocité, la couleur, le goût...) et ainsi contribué à une **forme de biodiversité**. Il a cependant aussi entraîné un **appauvrissement génétique global** des variétés cultivées du fait :

- de la perte de caractères présents chez les ancêtres sauvages des plantes domestiquées (par exemple la perte des capacités de dissémination des semences) ;
- de la sélection programmée de nouvelles variétés, à partir du xx^e siècle, qui repose sur un nombre très restreint d'allèles jugés intéressants ;
- de l'abandon des variétés de pays (génétiquement assez diversifiées) au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, sous l'effet de l'industrialisation de l'agriculture et de législations très contraignantes.

La sélection variétale a aussi conduit à conserver **des variants génétiques moins résistants aux ravageurs et maladies des cultures**. Les cultures monovariétales et donc génétiquement uniformes, sur de grandes surfaces, favorisent le développement rapide de ces ravageurs et maladies au sein des populations. Pendant plus de cinquante ans, la réponse principale a été de multiplier les traitements pesticides (fongicides et insecticides principalement) pour conserver de hauts rendements. Actuellement, la nécessité de développer une agriculture plus respectueuse de l'environnement et de la santé humaine oriente la recherche agronomique vers :

- **la valorisation de ressources génétiques** existant chez des variétés de pays ou des plantes sauvages, permettant la création de nouvelles variétés productives mais résistantes ou tolérantes vis-à-vis des prédateurs et maladies ;

- **la mise au point de nouvelles méthodes de culture**, visant à compenser les fragilités des plantes cultivées tout en limitant le recours aux intrants chimiques (cultures associées, greffes, traitements autorisés en culture biologique, etc.).

Les effets sur les populations humaines

Les débuts de la domestication ont entraîné **la constitution et l'organisation sociale et culturelle des premières sociétés sédentaires**, en assurant notamment une forme de sécurité alimentaire. **L'amélioration variétale et le développement de l'agriculture intensive** à l'échelle mondiale a, au cours du xx^e siècle, contribué à éliminer la plupart des famines et périodes de disette, permettant une croissance exponentielle de la population humaine. Cette agriculture reposant sur des semences sélectionnées pour leur haut niveau de performance, mais très consommatrice d'intrants (eau, engrais, pesticides, machines et carburants) semble avoir atteint ses limites, qu'il s'agisse du respect de l'environnement, de celui de la santé humaine ou des aspects économiques et financiers. De nouvelles agricultures émergent, dont l'agriculture biologique, qui s'appuient sur les connaissances actuelles pour envisager des stratégies durables associant à la fois productivité, qualité des produits et sécurité alimentaire, tout en permettant aux agriculteurs de vivre décemment de leur travail.

Outre ses effets sociaux, la domestication des plantes a eu des conséquences sur la génétique des populations humaines. Celles-ci ont adopté des régimes alimentaires diversifiés selon les régions du monde, en rapport avec les principales plantes cultivées localement. Ces régimes alimentaires ont pu exercer **des pressions de sélection sur les allèles** de certains gènes impliqués dans la digestion de nutriments ou le métabolisme. C'est ainsi qu'un allèle qui stimule la voie métabolique des acides gras oméga 3 et 6 (peu abondants dans les végétaux consommés) est nettement plus fréquent dans les populations principalement végétariennes que dans celles où l'on consomme surtout poissons et autres produits de la mer, riches en oméga 3 et 6.



■ Diversité des fruits exotiques.

À retenir

- **La domestication des plantes**

La **domestication** des plantes est un processus mené par l'Homme qui sélectionne chez la plante des caractères désirables, en relation avec ses besoins et ses techniques agricoles. Les plantes résultant de ces sélections successives sont de plus en plus dépendantes de l'Homme pour leur survie.

- **Les étapes de la domestication des plantes**

Les premières cultures de **plantes sauvages** à partir de -11 000 ans ont provoqué l'évolution progressive de ces plantes, soumises à **une sélection empirique** par l'Homme. Des caractères indispensables à la vie sauvage ayant été perdus, ces plantes cultivées sont devenues des **plantes domestiquées**. Leur diffusion hors des régions d'origine et la poursuite de sélections empiriques ont abouti en quelques milliers d'années à la production de nombreuses **variétés** présentant des caractères très différents des populations ancestrales. Au **xx^e** et au **xxi^e** siècles, les progrès technologiques liés à l'amélioration des connaissances en génétique et en physiologie végétale ont permis d'accélérer la création de nouvelles variétés à l'aide de la **sélection programmée** et de biotechnologies comme la **transgénèse** et, depuis peu, l'**édition de gènes**.

- **Les conséquences de la domestication sur les plantes**

Les variétés créées par l'Homme sont de plus en plus **productives** et ont donc des besoins accrus ; elles sont aussi **génétiquement moins diverses** que les espèces sauvages et, de ce fait, **plus sensibles** aux maladies et aux prédateurs. Leur culture nécessite donc la mise en œuvre de techniques de plus en plus intensives, incluant l'utilisation d'intrants comme les engrais et les pesticides. La création de variétés se traduit aussi par la nécessité de produire des semences commerciales qui garantissent l'homogénéité des populations végétales.

- **Les conséquences de la domestication des plantes pour l'Homme**

La création de nouvelles variétés de plus en plus productives a participé à l'**expansion démographique de l'Homme** sur la planète en améliorant sa sécurité alimentaire. La domestication des plantes a aussi contribué à la **sélection d'allèles au sein des populations humaines** en fonction de leurs régimes alimentaires. Aujourd'hui, le changement climatique et les effets de l'agriculture intensive sur l'environnement et sur la santé humaine nécessitent de créer des variétés productives et plus robustes, tout en développant de **nouvelles pratiques culturelles**.

Mots-clés

Diversité génétique ● Domestication ● Hybridation ● Plante domestiquée ● Plante génétiquement modifiée ● Plante sauvage ● Pratiques culturelles ● Sélection artificielle ● Sélection programmée ● Variété

La domestication des plantes



plantes sauvages
(300 000 espèces connues)

Il y a 11 000 ans
les débuts de l'agriculture



plantes domestiquées
(environ 200 espèces)

Des millénaires de domestication

Sélection empirique, par les agriculteurs

- perte de caractères nécessaires à la vie sauvage
- fixation de caractères « intéressants » pour l'Homme
- dépendance mutuelle et coévolution Homme/plantes
- rendements faibles



Depuis un siècle :

Sélection programmée, par les semenciers

- réduction de la diversité allélique
- perte de défenses chimiques (plantes plus fragiles)
- augmentation des rendements (monoculture)
- utilisation massive des intrants (engrais, pesticides)

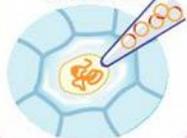
nombreuses variétés
« de pays »



petit nombre de variétés
(lignées pures, variétés hybrides)

Actuellement

Plante
génétiquement
modifiée



Valorisation des
ressources génétiques

- Recherche de gènes intéressants
- chez des plantes sauvages
 - chez les variétés « de pays »

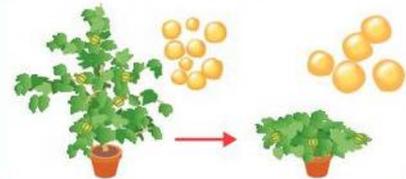
Utilisation des
biotechnologies

- transgénèse
- édition de gènes

Vers une agriculture
plus durable ?



Domestication accélérée



Changement des pratiques
culturales

- limitation des intrants
- cultures associées
- greffage

Le contrôle des flux de glucose

Préparez
le Grand oral
p. 519



1

Des flux de glucose dans l'organisme

Des organes consommateurs de glucose : les muscles

Pour assurer leurs besoins énergétiques, les cellules musculaires **consomment** principalement du glucose, qu'elles oxydent grâce à la respiration cellulaire ou à la fermentation lactique. Nutriments et dioxygène sont **puisés dans le sang** en fonction des besoins des cellules musculaires. Faibles au repos, ces besoins peuvent être très importants lors d'efforts physiques intenses. Les muscles sont donc des organes vers lesquels le flux de glucose sanguin est dirigé.

Des apports en glucose discontinus

L'origine du glucose de l'organisme est alimentaire : la digestion des glucides produit du glucose qui passe dans le sang au niveau de la muqueuse de l'intestin grêle. Cette entrée de glucose est discontinue : forte après les repas, elle est quasi nulle hors des périodes de digestion.

Des organes qui stockent le glucose

Après son absorption intestinale, le glucose d'origine alimentaire atteint le foie par la veine porte. Les cellules hépatiques prélèvent le glucose et le stockent en le polymérisant en glycogène : c'est la **glycogénogenèse**.

Le foie est également capable de libérer dans le sang le glucose préalablement stocké : les hépatocytes peuvent hydrolyser le glycogène qu'ils contiennent (**glycogénolyse**), et le glucose ainsi produit peut rejoindre la circulation sanguine.

Le glucose est aussi stocké par les cellules musculaires, mais leurs réserves de glycogène sont en revanche privées : le glucose issu de l'hydrolyse du glycogène musculaire ne peut être libéré dans le sang, et n'est donc destiné qu'au muscle lui-même.

Le foie a donc un rôle essentiel de régulation des flux de glucose de l'organisme.

2

La glycémie, un paramètre biologique régulé

La nécessité d'un système de régulation

Le bon fonctionnement de l'organisme impose que les organes sources de glucose subviennent en permanence aux besoins des organes consommateurs. Les besoins étant variables et les apports étant discontinus,

l'existence d'un **système de régulation** de la glycémie (concentration en glucose sanguin) est impérative.

Chez une personne en bonne santé, la mesure en continu de la glycémie révèle de légères variations autour d'une valeur moyenne proche de $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$: la glycémie diminue légèrement lors d'un effort physique, et augmente légèrement après les repas. Cette stabilité globale de la glycémie est la preuve de l'existence de mécanismes de régulation.

Un organe de contrôle de la glycémie : le pancréas

L'ablation totale du pancréas est suivie d'une très forte hyperglycémie : cette glande tend donc globalement à abaisser la glycémie. Des injections intraveineuses d'extraits pancréatiques ont également un effet hypoglycémiant, prouvant ainsi que cet effet provient de molécules pancréatiques transportées par le sang : ce sont donc des hormones.

Le pancréas contient deux types de tissus : un tissu continu, constitué de cellules productrices de suc digestif, libéré dans l'intestin grêle : elles sont sans effet sur la régulation de la glycémie. Un tissu discontinu, constitué de cellules formant de petits amas sphériques dispersés : les **îlots de Langerhans**. Richement irrigués, ces îlots contiennent **deux types de cellules endocrines** sécrétant des hormones dans le sang. Les cellules α produisent du **glucagon**, les cellules β produisent de **l'insuline**.

L'insuline a un effet hypoglycémiant (elle abaisse la glycémie) et agit sur toutes les cellules, à l'exception des neurones. **Le glucagon a au contraire un effet hyperglycémiant** (il augmente la glycémie) et agit principalement sur les cellules hépatiques.

La sécrétion de ces hormones dépend de la glycémie : **l'hyperglycémie stimule les cellules β** alors que l'hypoglycémie les inhibe ; c'est le contraire pour les cellules α . Le message, hypoglycémiant ou hyperglycémiant, est codé par la concentration sanguine des deux hormones pancréatiques : une hyperglycémie entraîne une forte sécrétion d'insuline et diminue la sécrétion de glucagon, ce qui conduit à un retour progressif vers une glycémie moyenne de $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. Le contraire se produit en cas d'hypoglycémie.

Le message hormonal s'adapte en permanence à l'état de la glycémie, car glucagon et insuline sont dégradés rapidement après avoir été sécrétés (leur demi-vie est d'environ 5 minutes).

3

Dysfonctionnements de la régulation de la glycémie

Une mauvaise régulation peut avoir de graves conséquences. L'hypoglycémie sévère (glycémie $< 0,5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) est une situation d'urgence car elle affecte les cellules nerveuses, dont le glucose est l'unique nutriment énergétique.

En France, **plus de 5 % de la population** est touché par le diabète. Il s'agit de troubles de la régulation marqués par une **hyperglycémie chronique** (glycémie à jeun $> 1,26 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$). Il existe différents types de diabète, mais deux d'entre eux regroupent la quasi-totalité des malades.

Un défaut de production d'insuline : le diabète de type 1

Le **diabète insulino-dépendant** (diabète de type 1) se déclare chez des individus jeunes (avant 20 ans le plus souvent, avec un pic au moment de la puberté). Les patients montrent alors un amaigrissement malgré une alimentation normale voire excessive, une soif intense avec polyurie (émission d'urine importante). Les analyses révèlent une glycémie très élevée (parfois plus de $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) et la présence de glucose dans les urines (glycosurie). Cette forme de diabète est due à **une destruction des cellules β productrices d'insuline**, suite à une réaction auto-immune. Sans insuline, l'action hypoglycémisante du pancréas n'a pas lieu. Les cellules n'absorbent plus assez de glucose sanguin, et dégradent alors lipides et protéines pour se procurer l'énergie dont elles ont besoin (d'où l'amaigrissement). Cela produit des déchets toxiques (corps cétoniques) qui sont rejetés dans le sang puis évacués dans les urines, avec l'excès de glucose.

Une insulino-résistance : le diabète de type 2

Le **diabète non insulino-dépendant** (diabète de type 2) affecte plutôt des personnes de plus de 45 ans, en surpoids et menant une vie très sédentaire. Si le mode de vie augmente fortement le risque de déclencher ce type de diabète, des prédispositions génétiques sont presque toujours présentes. Au moment du diagnostic, la glycémie à jeun est supérieure à la normale, mais sans atteindre des valeurs extrêmes.

La maladie s'installe progressivement quand l'insuline commence à perdre de son efficacité sur ses cellules cibles. Les cellules β en augmentent la sécrétion et, pendant plusieurs années, il y a ainsi production croissante **d'une insuline de moins en moins efficace** : les **cellules cibles deviennent insulino-résistantes**. Puis, le fonctionnement des cellules β est altéré, la production d'insuline décroît : le sujet commence à présenter des hyperglycémies modérées ($1,10$ à $1,26 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$). Des hyperglycémies plus sévères marquent le début du diabète. De par son caractère silencieux et progressif, de nombreux sujets ignorent leur état et ce sont les complications qui s'installent qui leur révèlent qu'ils sont atteints.

4

Les mécanismes de la régulation de la glycémie

Des transporteurs de glucose

La régulation implique que des cellules puissent absorber du glucose à partir du plasma sanguin, ou au contraire en restituer vers le sang. Ces transferts sont opérés par des transporteurs de glucose, des protéines capables de s'intégrer à la membrane plasmique et comportant un canal plus ou moins spécifique pour le transit du glucose. L'abondance de ces transporteurs dans les membranes varie, et détermine la capacité des cellules à absorber ou à rejeter le glucose à un moment donné.

Complémentarité hormone / récepteur

Seules les cellules qui possèdent des **récepteurs spécifiques** à une hormone sont sensibles à la présence et à la concentration de cette hormone dans leur environnement. Ces récepteurs sont des protéines qui présentent un ou plusieurs sites dont **la forme tridimensionnelle est complémentaire de celle de l'hormone**, ce qui explique leur spécificité vis à vis d'une hormone particulière.

La **fixation de l'insuline sur son récepteur** provoque une modification de sa conformation tridimensionnelle, activant une cascade de réactions chimiques avec deux conséquences :

- **des transporteurs de glucose sont transférés vers la membrane plasmique**, ce qui augmente la capacité des cellules à absorber le glucose sanguin.
- **la glycogénogenèse est activée** dans les cellules musculaires et hépatiques : le stock de glycogène augmente. Le bilan hépatique (différence entre les concentrations de glucose dans le sang sortant du foie et dans le sang entrant) se réduit : l'hyperglycémie est corrigée.

Le **glucagon agit sur les cellules hépatiques**, car elles possèdent des récepteurs pour cette hormone. Sa fixation déclenche une cascade de réactions chimiques qui **active la glycogénolyse et la sortie du glucose**, transféré via les transporteurs de glucose vers le plasma sanguin. L'hypoglycémie est ainsi corrigée.

La prise en charge des diabètes dépend de ces mécanismes moléculaires. Celle du diabète de type 1 consiste principalement à **compenser le manque d'insuline** grâce à des apports quotidiens de cette hormone, sous forme d'injections ou grâce à des pompes plus ou moins automatisées. Dans le cas du diabète de type 2, le nombre de récepteurs membranaires à l'insuline et de transporteurs de glucose inclus dans les membranes plasmiques diminue. Des études montrent que la contraction musculaire active la synthèse et la mise en place membranaire de transporteurs de glucose. C'est la raison pour laquelle le changement de mode de vie (**d'avantage d'activité physique et rééducation alimentaire**) est recommandé pour les diabétiques de type 2, avant même le recours à des traitements médicamenteux.

À retenir

- Des flux de glucose dans l'organisme

Afin de produire l'énergie nécessaire à la contraction, les cellules musculaires reçoivent un **flux de glucose sanguin**, d'intensité croissante avec le degré d'activité de l'organisme. Ce flux de glucose, d'origine alimentaire, est discontinu : il provient de l'intestin grêle, où se fait l'absorption des produits de la digestion.

Le glucose est **stocké dans le foie et les muscles** sous forme de glycogène. Le foie peut libérer dans le sang le glucose obtenu en hydrolysant le glycogène accumulé. **Le foie a un rôle régulateur** : il entretient le flux de glucose vers les muscles hors des périodes de digestion.

- La glycémie, un paramètre biologique régulé

La glycémie est soumise à un **système de régulation** qui la maintient en permanence à $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ environ. Les cellules des **îlots de Langerhans du pancréas** produisent l'**insuline, hormone hypoglycémiante** issue des cellules β , et le **glucagon, hormone hyperglycémiante** issue des cellules α . La libération de ces hormones dépend de la glycémie : l'hyperglycémie stimule la libération d'insuline et inhibe celle du glucagon (et inversement pour l'hypoglycémie).

- Des dysfonctionnements de la régulation de la glycémie

Les diabètes sont des dysfonctionnements de la régulation de la glycémie caractérisés par une hyperglycémie chronique.

Le **diabète insulino-dépendant** (de type 1) touche plutôt des individus jeunes, il est causé par la destruction des cellules β des îlots de Langerhans.

Le **diabète non insulino-dépendant** (de type 2) touche des personnes de plus de 45 ans en surpoids, dont les cellules sont devenues insulino-résistantes.

- Les mécanismes moléculaires de la régulation de la glycémie

Les transferts de glucose entre le sang et les cellules se font par des protéines de transport intégrées aux membranes plasmiques, et dont la quantité est variable.

Les cellules sensibles à l'insuline et au glucagon portent **des récepteurs spécifiques**, de forme complémentaire de celles des hormones. C'est la fixation de l'hormone sur le récepteur qui déclenche son effet. L'insuline fait augmenter le nombre de transporteurs de glucose et stimule la glycogénogenèse dans les cellules musculaires et hépatiques. Sous l'effet du glucagon, les cellules hépatiques hydrolysent le glycogène qu'elles contiennent et libèrent du glucose.

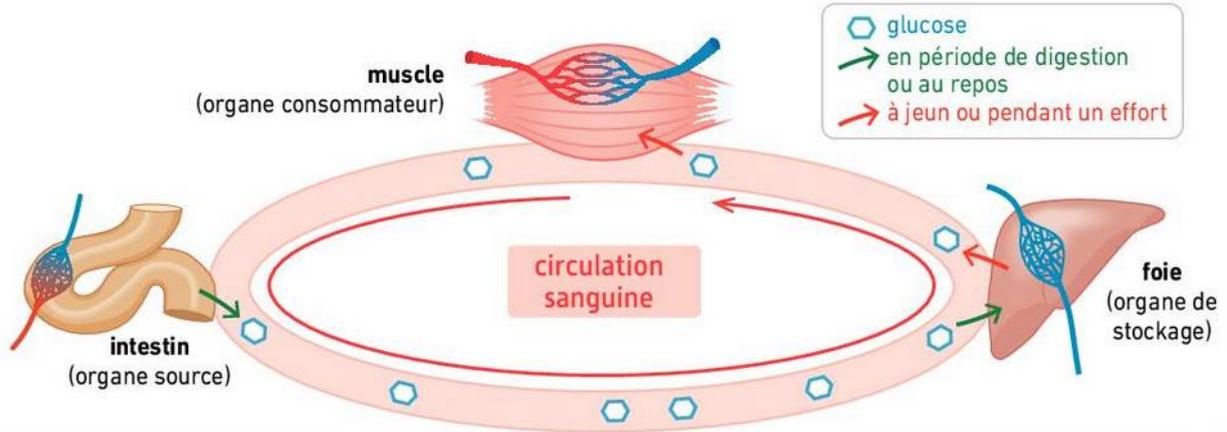
Mots-clés

Cellule endocrine ● Diabète insulino-dépendant ● Diabète non insulino-dépendant ● Flux de glucose ● Glucagon ● Glycémie ● Hormone hyperglycémiante ● Hormone hypoglycémiante ● Îlot de Langerhans ● Insuline ● Organe source ● Système de régulation ● Récepteur hormonal

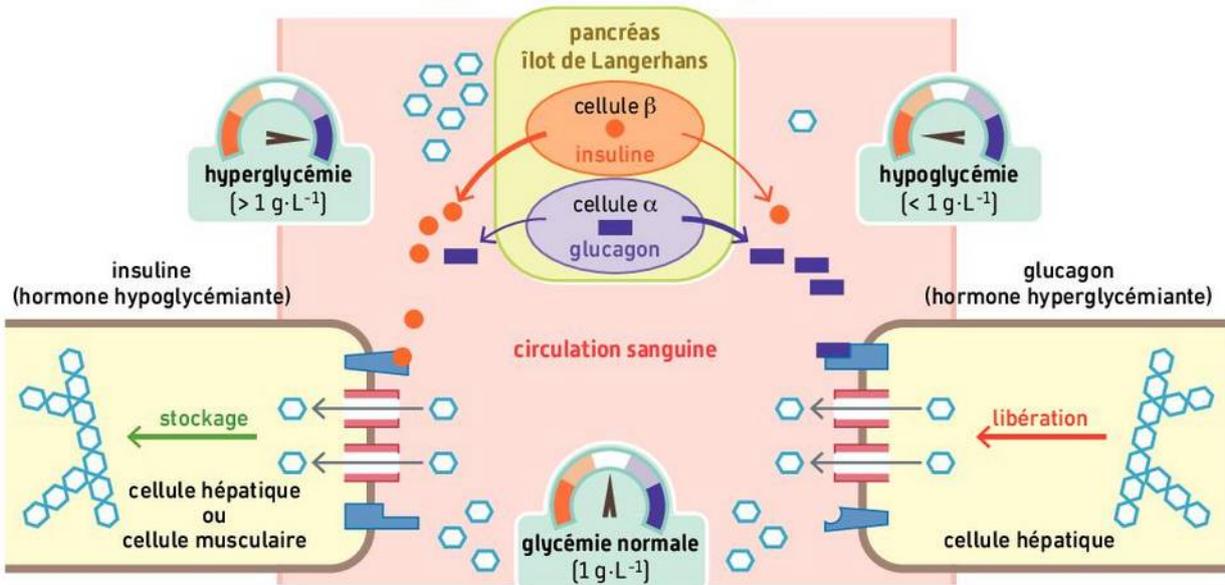
Schéma bilan

Le contrôle des flux de glucose

Des flux de glucose différents selon les circonstances



La régulation des flux de glucose



Des dysfonctionnements du système de régulation

