

INTERROS des LYCÉES

Collection dirigée par Éric MAURETTE

sciences de la vie et de la Terre



Simon BUFFÉRAL
Julien STACKOWICZ

 Nathan

Remerciements

L'auteur et l'équipe de Prepamath Éditions tiennent à remercier Stéphane Pasquet et Damien Imbert pour l'aide précieuse qu'ils ont apportée à cet ouvrage.

Illustrations : Prisca Baverey
Coordination éditoriale : François Déliac
Conception couverture : Simon Geliot

Votre avis nous intéresse : contact@prepamath.fr

Retrouvez l'actualité des Interros des Lycées sur :

- Facebook : facebook.com/interrosdeslycees/
- Twitter : @prepamath

© PREPAMATH Éditions 2023
© Éditions NATHAN 2023 - ISBN 9782095023379

Avant-propos

En Terminale, le rythme des cours est très soutenu, ce qui limite le nombre d'exercices d'application pouvant être corrigés en classe. Pour vous préparer au mieux aux épreuves du bac, il est pourtant nécessaire d'être confrontés à une grande diversité d'énoncés durant l'année.

Le but de cet ouvrage est donc de vous aider par la pratique d'exercices corrigés, de niveaux de difficulté variables, donnés par des professeurs dans divers lycées de France, à l'exception des parties nouvelles du programme.

Ces exercices sont regroupés en quatorze chapitres couvrant l'intégralité du nouveau programme de spécialité SVT de Terminale, entré en vigueur en septembre 2020.

Afin de vous entraîner à travailler en temps limité, les exercices sont systématiquement minutés dans un contexte de réflexion préalable et de rédaction « au brouillon » (sans tenir compte du temps de mise au propre exigé un jour d'évaluation).

Vous trouverez également dans cet ouvrage des résumés de cours, qui reprennent les principales notions et définitions du programme. Sans prétendre se substituer au cours dispensé par le professeur, ces résumés vous aideront à étoffer vos réponses, d'une part aux exercices proposés, et d'autre part à la question de synthèse dite « Maîtrise des connaissances acquises » et constituant la première partie de la nouvelle épreuve écrite du baccalauréat. Les notions abordées sont illustrées à l'aide de renvois vers des exercices spécifiques.

Pour chaque chapitre, les exercices sont classés par ordre de difficulté croissante : d'abord des tests de vérification des connaissances, puis des exercices avec support documentaire, dont la diversité permet de couvrir les notions essentielles et de mettre en œuvre les principales compétences exigibles de la part d'un élève de Terminale.

À chaque fin de chapitre, un certain nombre d'exercices plus difficiles sont présentés dans l'esprit de la seconde partie de la nouvelle épreuve écrite du baccalauréat : « Pratique du raisonnement scientifique ». Vous rencontrerez notamment des situations dans lesquelles il conviendra, à partir d'un corpus documentaire, d'exposer une démarche et d'élaborer une argumentation.

Un bac blanc corrigé est également proposé en fin d'ouvrage.

Enfin, l'application « Nathan Live » donne accès à des vidéos et d'autres ressources Internet permettant de préciser certains points du cours et d'illustrer la résolution d'exercices typiques.

Nous vous souhaitons une bonne et profitable lecture.

Les auteurs

Table des matières

Chap 1	L'origine du génotype des individus	1
	● Cours	1
	● Interros	18
	● Corrigés	29
Chap 2	La complexification des génomes	41
	● Cours	41
	● Interros	48
	● Corrigés	60
Chap 3	L'inéluctable évolution des populations	69
	● Cours	69
	● Interros	79
	● Corrigés	93
Chap 4	Le temps et les roches	103
	● Cours	103
	● Interros	118
	● Corrigés	128
Chap 5	Les traces du passé mouvementé de la Terre	139
	● Cours	139
	● Interros	154
	● Corrigés	165
Chap 6	L'organisation fonctionnelle des plantes à fleurs	185
	● Cours	185
	● Interros	197
	● Corrigés	208
Chap 7	Les grandes fonctions des plantes	217
	● Cours	217
	● Interros	229
	● Corrigés	242

Chap 8	La domestication des plantes	251
	● Cours	251
	● Interros	257
	● Corrigés	270
Chap 9	Reconstituer les variations climatiques passées	277
	● Cours	277
	● Interros	291
	● Corrigés	299
Chap 10	Comprendre les variations climatiques passées	309
	● Cours	309
	● Interros	325
	● Corrigés	335
Chap 11	Agir face au réchauffement climatique	345
	● Cours	345
	● Interros	361
	● Corrigés	367
Chap 12	Comportements, mouvements et système nerveux	377
	● Cours	377
	● Interros	392
	● Corrigés	412
Chap 13	Produire le mouvement	425
	● Cours	425
	● Interros	440
	● Corrigés	459
Chap 14	Comportements et stress	469
	● Cours	469
	● Interros	477
	● Corrigés	483
Chap 15	Baccalauréat Blanc	489
	● Sujet	489
	● Corrigé	493
Annexes	Liste des vidéos	499
	Index	501

Nathan Live

Accédez aux compléments numériques de cet ouvrage (vidéos, audios, liens Internet) sur votre smartphone ou votre tablette avec



- 1 | **Téléchargez** l'application gratuite Nathan Live disponible dans tous les stores sur votre smartphone ou votre tablette (Appstore, GooglePlay, Windows Store).



- 2 | **Scannez** les pages de votre livre où le logo Nathan Live apparaît

- 3 | **Consultez** les ressources !



Logo Nathan Live indiquant que la page contient des ressources



Vous consultez directement la ressource sur votre smartphone ou votre tablette

Méthodes de travail

Les conseils qui suivent ont été mis en pratique par un grand nombre de majors (sortis premiers) de Polytechnique ou de l'ÉNA, par des professionnels de l'organisation et sont également recommandés par de nombreux professeurs. Pour approfondir votre méthode de travail et obtenir les meilleurs résultats pendant vos études, nous vous recommandons la lecture du livre « Comment travailler plus efficacement », par F. Déliac, U. Hadrien, E. Matrullo et E. Maurette.

Faire des « feed-back »

Le « *feed-back* » est le conseil le plus important et le plus utilisé par ceux qui réussissent brillamment leurs études. Il consiste à contrôler systématiquement, sans s'aider de notes, ce que l'on vient d'apprendre (exercices et cours). Ce contrôle peut se faire mentalement, oralement ou par écrit.

- Dans les transports, essayez de vous rappeler mentalement, et sans vous aider de vos notes, le cours et les exercices vus le matin en classe (feed-back mental).
- Après avoir relu votre cours le soir, essayez de retrouver par écrit les principaux paragraphes et démonstrations sans regarder votre leçon (feed-back écrit).
- Après avoir résolu un problème, prenez 5 minutes pour contrôler par écrit que vous vous rappelez clairement l'énoncé ainsi que la démarche de résolution (feed-back écrit).
- Expliquez à des amis la leçon que vous venez d'apprendre ou l'exercice que vous venez de résoudre : c'est un excellent feed-back oral. Choisissez le type de « feed-back » qui vous convient le mieux et faites-en le plus régulièrement possible (après chaque cours et chaque série d'exercices). Pour être efficace, un « feed-back » doit se faire sans l'aide de vos notes. Ainsi, faire des fiches de résumés de cours à partir de vos cahiers ouverts ne constitue nullement un « feed-back ».

Miser sur la qualité

De nombreux témoignages démontrent que pour obtenir de bons résultats, il est préférable de faire un nombre limité d'exercices de manière approfondie plutôt que d'en survoler un grand nombre. Une tendance très répandue consiste à abattre une grande quantité d'exercices, à la chaîne, mais superficiellement, en espérant que le jour du contrôle, on aura déjà vu ce type de problème et que l'on saura s'en souvenir. Cette méthode est absolument inefficace car la seule manière de se souvenir d'un exercice de mathématiques ou de physique, c'est de l'avoir parfaitement compris et assimilé.

Ainsi :

- À la fin d'un problème, prenez 5 à 10 minutes pour essayer de trouver un moyen de le généraliser ou de le compliquer (c'est ce que font souvent les professeurs pour concevoir leurs contrôles écrits) ; trouvez ce que cela pourrait changer dans la solution.
- Prenez également l'habitude, après chaque exercice, de faire un « feed-back » en faisant ressortir la démarche générale et en tissant des liens avec le cours. Bref, il ne faut pas vous contenter de résoudre l'exercice, mais il vous faut lui apporter de la valeur ajoutée et vous interroger sur son contenu.
- *Idem* pour le cours. Ne vous contentez pas de le parcourir de manière passive. Il vous faut avoir la rigueur d'effacer toutes les zones d'ombre. Pour chaque théorème, il faut vous demander quels types d'exercices son utilisation permettra de résoudre.

Travailler par « couches successives »

Cette méthode, très utile pour les étudiants préparant des examens ou des révisions, peut également être utilisée dès le lycée.

On observe que pour apprendre un gros volume de cours, rien n'est plus inefficace que de l'attaquer de front, de manière linéaire. La bonne manière consiste à d'abord survoler l'ensemble, en ne retenant que la structure, c'est-à-dire les grands titres, ainsi que les noms des paragraphes (première couche, étape devant durer 5 minutes). Dans l'étape suivante (deuxième couche, d'une durée de 10 minutes), on reprend son cours du début en retenant cette fois également les théorèmes et résultats importants. Après cette deuxième couche, on a déjà une idée claire de la structure de l'ensemble du cours. On peut alors aborder la dernière étape (troisième couche) : on reprend son cours au début pour, cette fois-ci, l'étudier en profondeur en apprenant le détail des démonstrations.

Il est à noter que cette méthode peut être également appliquée avec succès à des matières littéraires, ainsi qu'aux révisions du bac de français. Par exemple :

- Pour la préparation d'un contrôle, on commencera par passer en revue rapidement l'ensemble du cours et des exercices du chapitre précédemment étudié, avant de les réviser en détail. Ainsi aura-t-on développé une compréhension synthétique et claire.
- De même, avant d'aborder un problème volumineux (tel qu'un contrôle écrit), il est préférable d'en survoler l'ensemble avant de l'attaquer.

Travailler sa rapidité

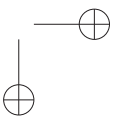
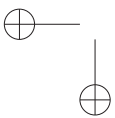
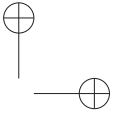
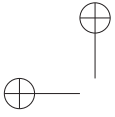
Pour acquérir de la rapidité, trois voies sont possibles :

- Prenez l'habitude, en travaillant chez vous, de vous concentrer sur une seule chose à la fois, c'est-à-dire ne pas attaquer un problème ou une dissertation, en rêvassant à ce que vous pourriez trouver à manger dans le réfrigérateur ou en écoutant de la musique.

- Prenez l'habitude de travailler chez vous dans les mêmes conditions qu'en devoirs surveillés. Le minutage de chacun des exercices de ce livre est fait en ce sens. Cependant, cela ne devrait pas, une fois la résolution faite, vous empêcher d'y réfléchir plus calmement afin de vérifier la bonne assimilation du problème. Si les seuls moments où vous vous pressez sont les contrôles écrits, vous ne deviendrez jamais rapide.
- Essayez de contenir tout votre travail à la maison dans une plage horaire serrée. Engagez-vous, par exemple, à travailler chez vous tous les jours entre 18 h et 20 h et efforcez-vous de ne jamais déborder (quelle que soit votre charge de travail). En effet, si l'on ne se donne pas de limite de temps pour accomplir un travail, on a naturellement tendance à le laisser traîner en longueur et à rêvasser. L'étroitesse de la plage horaire vous obligera à ne pas vous endormir et à devenir efficace.

Spécial Baccalauréat

- Lisez attentivement l'intégralité de l'énoncé. Cela vous permettra de repérer l'exercice qui vous semble le plus facile, de manière à commencer par celui-ci.
- Lorsque vous commencez un exercice basé sur des documents, vous devez lister au brouillon les informations que vous pouvez en tirer et qui vont vous permettre de résoudre la problématique ainsi que les notions du cours que vous allez devoir utiliser pour construire votre argumentation. Pour les exercices de QCM, prenez le temps de bien confronter les différentes propositions aux documents et à vos connaissances afin de cocher LA bonne réponse.
- Si vous êtes habitués à utiliser la méthode du feed-back exposée dans les premières pages de cet ouvrage, il est bon d'envisager un court feed-back mental sur les parties du cours concernées par l'épreuve du jour. Si vous êtes nerveux, cela vous aidera à vous mettre en confiance et à « démystifier » l'épreuve, que vous pourrez aborder avec la même sérénité qu'un devoir surveillé classique.
- Il faut absolument soigner la présentation. Au cours de l'année scolaire, votre professeur s'est habitué à votre style de rédaction, à votre écriture. Il sait ce que vous valez. Ce n'est pas le cas du correcteur qui lira votre copie. Il n'aura ni l'indulgence que pourrait avoir votre professeur, ni la patience d'essayer de vous déchiffrer si votre copie est présentée comme un brouillon. Par conséquent, il vous faut faire un réel effort de présentation le jour du bac, plus encore que pendant l'année scolaire : faites systématiquement une introduction qui énonce clairement la problématique à résoudre, utilisez des termes de transition entre les informations tirées des documents et vos connaissances. Enfin, rédigez une conclusion répondant à la problématique.
- Enfin, relisez-vous. Réservez-vous pour cela le temps nécessaire. Cette relecture doit être très attentive (ce n'est pas toujours facile à l'issue de plus de trois heures d'épreuve). Enfin, souvenez-vous, si vous manquez de temps pour tout relire, qu'il vaut mieux une relecture partielle très attentive qu'une relecture « express » en diagonale, totalement inefficace pour détecter les erreurs résiduelles.



Chapitre

1

L'origine du génotype des individus

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Stabilité des génotypes au cours de mitoses successives
3. La reproduction sexuée permet un brassage des génotypes à chaque génération
4. L'étude de la transmission des gènes
5. Accidents génétiques lors de la méiose

1 Introduction

En classe de première, nous avons étudié deux grands types de divisions cellulaires :

- la mitose, qui permet d'obtenir deux cellules filles génétiquement identiques à partir d'une cellule mère. C'est une reproduction conforme qui conserve le nombre de chromosomes ;
- la méiose, qui permet la fabrication des cellules reproductrices. À partir d'une cellule mère, on obtient quatre cellules filles génétiquement différentes. La méiose divise le nombre de chromosomes par deux au sein des cellules filles.

Chez les organismes unicellulaires, comme les eubactéries, la mitose permet la génération de nouveaux individus à chaque cycle cellulaire. La reproduction est dite *asexuée*, car elle ne nécessite pas de gamètes, et les nouveaux organismes présenteront le même génotype que le parent.

Chez les eucaryotes, la reproduction est généralement *sexuée* : la réunion de deux gamètes, appelée fécondation, donne une cellule-œuf. Suite à des mitoses successives, la cellule-œuf formera un embryon. À la naissance, la moitié du génotype de l'individu proviendra de sa mère, et l'autre moitié, de son père.

La diversité génétique des individus est une composante importante de la biodiversité. Or la mitose et la reproduction sexuée n'engendrent pas les mêmes conséquences génétiques sur les cellules et les organismes.

? PROBLÉMATIQUE

En quoi la mitose et la reproduction sexuée participent-elles à la diversification génétique ?

2 Stabilité des génotypes au cours de mitoses successives

Définition 1 : génotype

Ensemble de l'information portée par les gènes (et leurs différents allèles) d'un individu, à l'origine de ses caractères, c'est-à-dire de son phénotype.

La mitose correspond à une suite d'événements permettant le passage d'une cellule mère à deux cellules filles génétiquement identiques. Suite à des mitoses successives, on aboutit à ce que l'on appelle *des clones*.

Définition 2 : clone

Ensemble de cellules formées suite à des mitoses successives, présentant le même génotype.

La formation de clones a lieu chez les eubactéries, permettant leur multiplication. Des mitoses successives ont également lieu chez les eucaryotes. Chez les êtres humains par exemple, la cellule-œuf est à l'origine de 5.10^{12} cellules à la naissance. Ainsi, les différents clones d'une cellule peuvent constituer des tissus composant les organes. De plus, chez l'adulte, certaines cellules, appelées cellules souches, participent au renouvellement cellulaire. Ainsi, par exemple, un lymphocyte B spécifique d'un antigène (classe de spécialité de première) pourra se multiplier par mitoses et être à l'origine de nombreux clones facilitant la réponse immunitaire (amplification clonale). On peut aussi prendre l'exemple de l'agriculture pour laquelle des techniques de bouturage reposent sur la stabilité clonale.

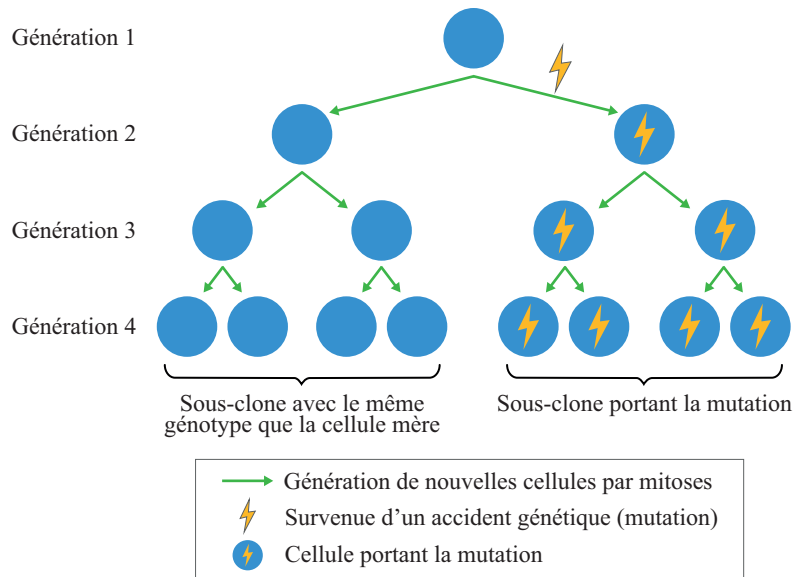


Figure 1.1 – Formation de deux sous-clones suite à des mitoses successives et un accident génétique

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

Toutefois, la transmission d'un génotype à un ensemble de cellules formant un clone implique le fait que si un accident génétique (mutation, délétion d'un gène ou d'un morceau de chromosome) se produit chez une cellule, il pourra être transmis à l'ensemble des cellules qui en sont issues, ensemble qu'on appelle un sous-clone.

À RETENIR

Des mitoses successives permettent la formation de cellules génétiquement identiques que l'on appelle des clones. Cette stabilité génétique est toutefois limitée par l'apparition d'accidents génétiques, qui se transmettront à l'ensemble des descendants.

3 La reproduction sexuée permet un brassage des génotypes à chaque génération

PROBLÉMATIQUE

En quoi la méiose et la fécondation favorisent-elles le brassage des génotypes ?

3.1 De l'haploïdie du gamète à la diploïdie après la fécondation

Définition 3 : reproduction

La reproduction est l'ensemble des processus par lesquels une espèce assure une descendance à partir du développement de nouveaux individus. On parle de *reproduction sexuée* lorsque qu'une rencontre de gamètes (la fécondation) est nécessaire.

Elle est à l'origine d'un œuf, aussi appelé zygote. Par reproduction sexuée, deux parents donnent naissance à un nouvel individu. Au cours de ces processus, il y a conservation du *caryotype*, qui est une caractéristique de l'espèce. Deux événements majeurs assurent la stabilité du caryotype : la méiose et la fécondation. Au cours d'un cycle de développement, chaque individu de l'espèce présente un nombre de chromosomes identiques : ce nombre est donc maintenu constant de générations en générations.

Définition 4 : cycle de développement

Succession des événements allant de la conception d'un individu à celle d'un de ses descendants.

Par ailleurs, selon le type cellulaire, les chromosomes peuvent être présents en un ou deux exemplaires : on parle de cellule *haploïde* ou *diploïde*.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

	Cellule diploïde	Cellule haploïde
Définition	Une cellule est dite diploïde si les chromosomes qu'elle contient peuvent être associés par paires de chromosomes homologues.	Une cellule est dite haploïde si elle ne possède qu'un seul exemplaire de chaque chromosome.
Notation du nombre total de chromosomes	$2n$ (2×23 chromosomes chez l'Homme)	n (23 chromosomes chez l'Homme)
Exemples de cellules chez l'être humain	Toutes les cellules de l'organisme (cellules somatiques) et cellules germinales à l'origine des gamètes (gonies).	Gamètes.

Tableau 1.1 – Cellules diploïdes et cellules haploïdes

Lors de la reproduction sexuée, chaque individu produit des gamètes (cellules haploïdes) à partir de cellules diploïdes : c'est la méiose. Lors de la fécondation, ces gamètes haploïdes fusionnent en une cellule-œuf à nouveau diploïde : on dit que la fécondation restaure la diploïdie. La cellule-œuf diploïde formée sera à l'origine d'un nouvel individu.

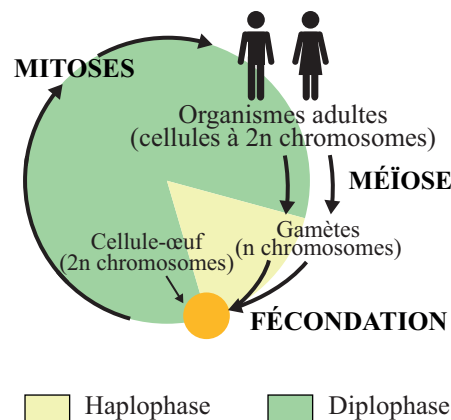


Figure 1.2 – Diplophase et haplophase au cours du cycle de développement humain

Par convention, chez l'humain, le contenu chromosomique de la cellule mère diploïde des gamètes est défini comme étant $2n = 46$, et celle d'un gamète haploïde à 23 chromosomes est $n = 23$.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

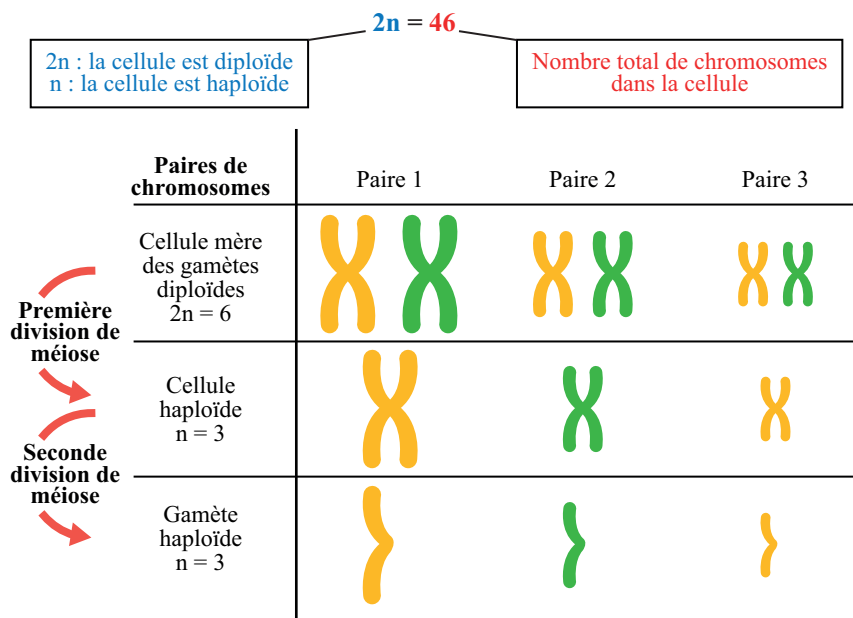


Figure 1.3 – Conventions d'écriture du nombre de chromosomes par cellule dans le cas de 3 paires de chromosomes par cellule avant, pendant et après la méiose. Les chromosomes parentaux sont représentés en vert et jaune, et leur répartition dans les cellules haploïdes est arbitraire

Lors de la fécondation, chaque gamète apporte un lot de 23 chromosomes. Ces derniers portent l'information génétique qui sera transmise au descendant.

Au sein d'une espèce se reproduisant par voie sexuée, chaque individu de l'espèce est génétiquement unique (à l'exception des vrais jumeaux). En effet, même si tous les membres de l'espèce ont en commun les mêmes gènes, chaque individu est caractérisé par une combinaison allélique unique. Ceci s'explique par des processus de brassage génétique à l'origine de la variabilité des combinaisons alléliques qu'un individu peut transmettre.

3.2 La répartition aléatoire des chromosomes lors de la méiose : le brassage interchromosomique

La première division de méiose assure la séparation des chromosomes homologues. Pour chaque paire de chromosomes, la ségrégation est indépendante des autres chromosomes. Or les chromosomes homologues ne sont pas identiques : ils portent des allèles différents pour de nombreux loci. La ségrégation aléatoire des chromosomes homologues en anaphase I conduit alors à la formation de cellules haploïdes (gamètes) présentant des combinaisons alléliques différentes : on dit qu'il y a *brassage interchromosomique*.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

3.2.1 - Étude de la transmission des allèles d'un seul gène

Pour un gène considéré, si une cellule diploïde possède deux fois le même allèle, on parle d'*homozygotie* et dans le cas inverse, d'*hétérozygotie*.

Cas 1 : l'individu est homozygote pour le gène d'intérêt

Étant donné qu'un gamète ne reçoit qu'un allèle de chaque gène en fin de méiose, un individu homozygote pour un gène d'intérêt formera nécessairement des gamètes portant l'allèle correspondant, qui sera donc, après fécondation, transmis au nouvel individu.

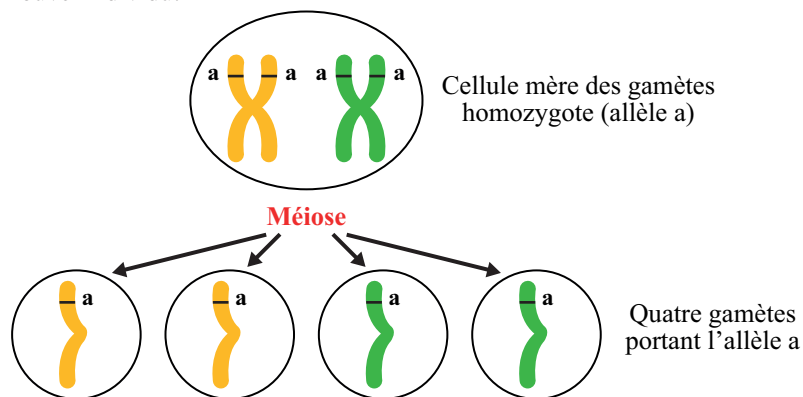


Figure 1.4 – Transmission génétique d'un allèle d'intérêt nommé « a » après méiose et fécondation, dans le cas d'un parent homozygote

Cas 2 : l'individu est hétérozygote pour le gène d'intérêt

Toutefois, si l'individu est hétérozygote pour le gène considéré, un allèle est transmis avec une probabilité de 0.5 à chaque descendant.

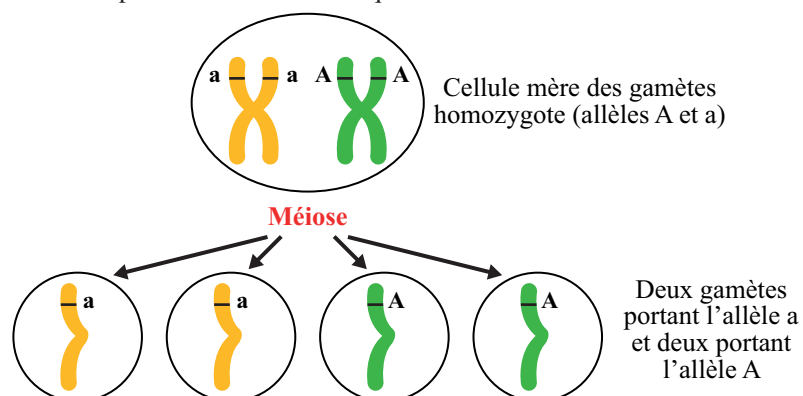


Figure 1.5 – Transmission génétique de deux allèles « a » et « A » après méiose et fécondation, dans le cas d'un parent hétérozygote

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

⚠ ATTENTION

Lorsqu'un chromosome est double (c'est-à-dire possédant deux chromatides), les allèles portés par un même chromosome sont strictement identiques. Lorsque l'on parle d'hétérozygotie, ce sont les allèles situés sur les chromosomes homologues d'une même paire qui diffèrent.

Pour un seul gène étudié, la formation des gamètes au cours de la méiose entraîne une première conséquence sur la diversité génétique : selon le gamète réalisant la fécondation, un allèle différent sera transmis. Or l'être humain possède entre 20 000 et 30 000 gènes.

3.2.2 - Étude de la transmission des allèles de plusieurs gènes

? PROBLÉMATIQUE

Quelles règles régissent la transmission de plusieurs gènes ?

Prenons le cas de la transmission de deux gènes.

Soient A et a, deux allèles d'un premier gène, et B et b deux allèles d'un second. Deux cas sont possibles : les gènes peuvent être liés ou indépendants.

Cas 1 : les deux gènes sont indépendants

Définition 5 : gènes indépendants

Gènes portés par des chromosomes différents, dont les répartitions lors de la formation des gamètes sont donc indépendantes l'une de l'autre.

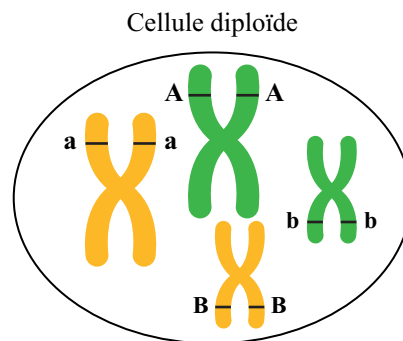


Figure 1.6 – Exemple de deux gènes indépendants : le premier est représenté par ses deux allèles A et a et est porté par une paire de chromosomes et le second est représenté par les allèles B et b et est porté par une autre paire de chromosomes

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Si l'individu est hétérozygote pour les deux gènes, il transmettra chaque combinaison d'allèles de manière équiprobable à sa descendance. En effet, chaque chromosome homologue se répartit aléatoirement lors de l'anaphase de la première division de méiose. La formation de quatre gamètes possédant sa propre combinaison d'allèles met donc ici en évidence un brassage génétique, appelé *brassage interchromosomique*.

Définition 6 : brassage interchromosomique

Brassage génétique lié à la répartition aléatoire des chromosomes homologues lors de la première division de méiose.

Chez l'être humain, chaque gamète comporte ainsi un lot aléatoire de 23 chromosomes, dépendant de la répartition des 46 chromosomes lors de l'anaphase 1 de méiose. Le brassage interchromosomique limite donc la probabilité d'avoir deux gamètes possédant les mêmes allèles, et donc le même patrimoine génétique. Le nombre de combinaisons génétiques possibles dans les gamètes est évidemment plus élevé si l'état d'hétérozygotie est plus grand chez les parents à l'échelle de leur génome.

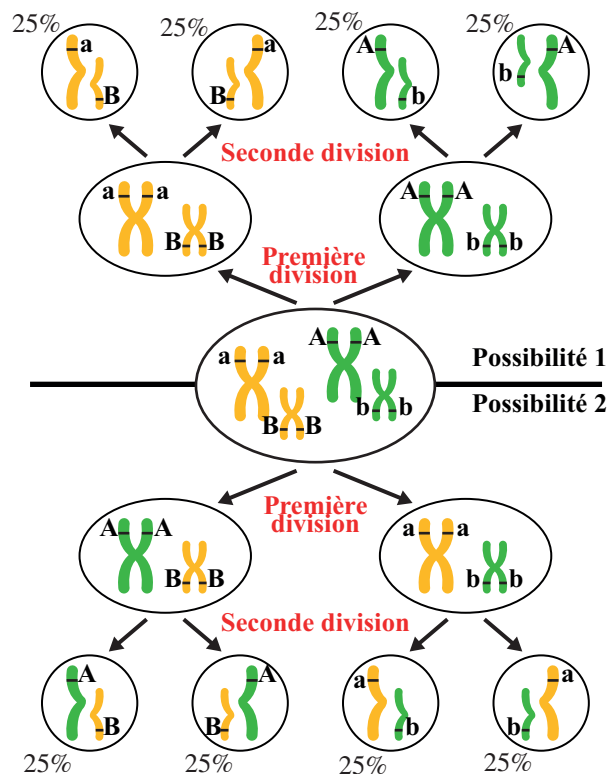


Figure 1.7 – Transmission génétique pour un individu hétérozygote pour deux allèles de deux gènes indépendants

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

À RETENIR

L'étude de la répartition de deux gènes indépendants démontre un premier brassage, le brassage interchromosomique. Il est permis par la répartition des chromosomes homologues lors de l'anaphase de la première division de méiose.

Cas 2 : les deux gènes sont liés

Définition 7 : gènes liés

Gènes présents sur un même chromosome, qui seront donc en théorie répartis en bloc lors de la méiose.

Les deux allèles des deux gènes portés par un chromosome seront transmis ensemble à un gamète, et donc à une possible descendance.

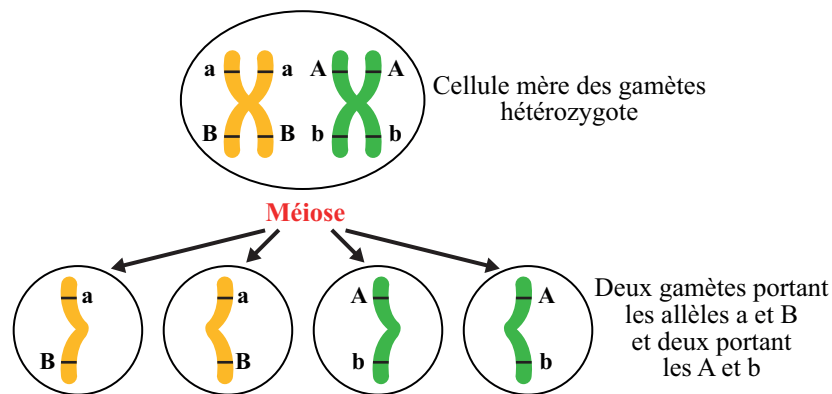


Figure 1.8 – Transmission génétique pour un individu hétérozygote pour deux allèles de deux gènes liés

Nous allons voir qu'au cours de la méiose, un deuxième brassage peut affecter des gènes liés.

3.3 Des échanges de portions d'ADN lors de la méiose à l'origine d'un brassage intrachromosomique

PROBLÉMATIQUE

En quoi la répartition de deux gènes liés peut également subir un autre brassage génétique ?

En prophase 1 de méiose, les paires de chromosomes homologues s'associent et s'enchevêtrent au niveau de ce que l'on appelle *des chiasmas*. Une portion du chromosome considéré du parent 1 peut alors être échangée avec une portion du chromosome du parent 2. Ce processus est appelé *crossing-over*.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Suite à l'anaphase 1 et à la fin de la méiose, des gamètes portant une combinaison d'allèles inattendue apparaissent. Les crossing-overs participent donc à un autre brassage dit *intrachromosomique*.

Définition 8 : brassage intrachromosomique

Brassage intrachromosomique : diversification génétique due à l'échange de matériel génétique lors des premières étapes de la méiose, permettant de nouvelles associations d'allèles.

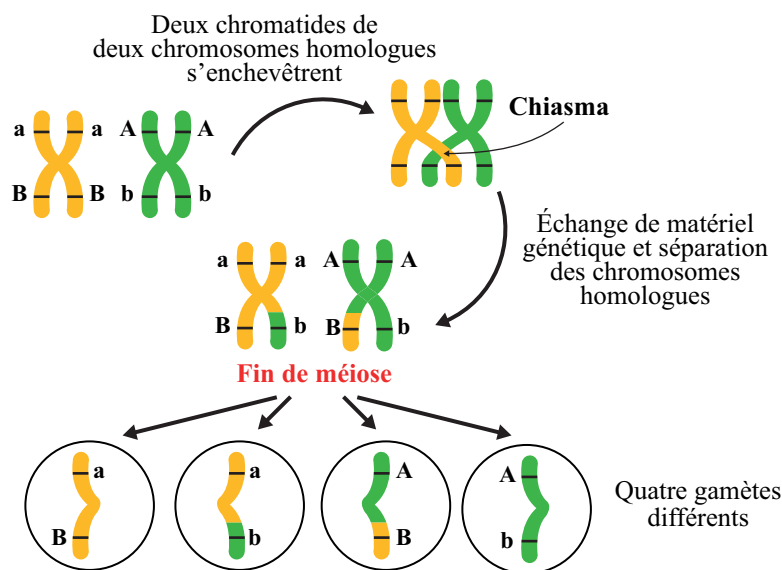


Figure 1.9 – Le crossing-over et ses conséquences sur l'information génétique des gamètes formés

► POUR ALLER PLUS LOIN

Les crossing-overs sont très fréquents lors de la méiose, sauf chez la drosophile mâle, chez qui ils sont inexistants. Chez les mammifères, on considère que chaque paire de chromosomes subit au moins un crossing-over lors de la méiose.

La fécondation, en permettant la fusion entre deux cellules haploïdes issues de la méiose, amplifie cette diversité. En effet, chaque gamète ayant hérité d'une combinaison allélique unique, leur réunion sera à l'origine d'un zygote possédant un génotype unique. Lors de la fécondation, les deux noyaux haploïdes, mâle et femelle, appelés respectivement *pronucléus* mâle et femelle, se rapprochent et fusionnent : c'est la *caryogamie*.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

À RETENIR

L'être humain a 23 paires de chromosomes qui portent l'information de plus de 20 000 gènes. Les brassages inter et intrachromosomiques participent donc à la formation de gamètes uniques à l'origine d'individus tous différents, et participent à l'explication que deux frères ou deux sœurs, bien qu'ayant deux mêmes parents, peuvent être très différents.

4 L'étude de la transmission des gènes

La transmission des allèles de générations en générations obéit donc à des lois précises. Cependant, en laboratoire, les chercheurs n'ont pas nécessairement accès aux séquences génétiques de chaque organisme analysé.

PROBLÉMATIQUE

Comment s'effectue l'étude de la transmission des gènes et des allèles ?

4.1 Une étude basée sur les phénotypes

Le suivi d'un phénotype au cours des générations donne de nombreux indices permettant de retracer la transmission des allèles étudiés.

4.1.1 - L'étude d'organismes modèles

Les organismes modèles, espèces étudiées en laboratoire, permettent une étude approfondie de la transmission d'allèles de générations en générations. La plupart du temps, des individus de deux *lignées pures*, c'est-à-dire homozygotes pour les allèles d'intérêt, sont croisés entre eux. Ce premier croisement permet de comprendre les relations de *dominance* et de *récessivité* entre les différents allèles.

Définition 9 : dominant

Allèle qui s'exprime même s'il est présent en une seule copie.

Définition 10 : récessif

Allèle qui ne s'exprime que s'il est présent en deux copies.

Définition 11 : co-dominance

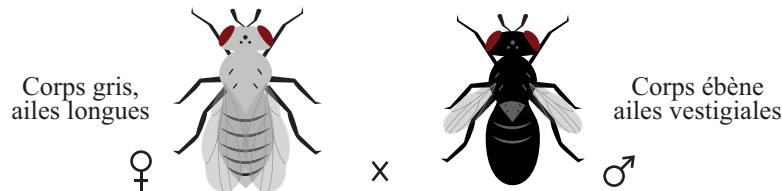
Situation où deux allèles d'un seul gène s'expriment ensemble, générant un phénotype intermédiaire comparé aux individus homozygotes.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Exemple : on réalise le croisement de lignées pures de drosophiles suivant. On considérera les gènes « couleur du corps » dont les allèles sont « corps gris » et « corps ébène » et longueur des ailes dont les allèles sont « ailes longues » et « ailes vestigiales ».



En F1, c'est-à-dire à la première génération formée, on obtient 100% de drosophiles aux corps gris et aux ailes longues. Les parents étant homozygotes pour ces gènes, on en conclut que les individus de F1 sont hétérozygotes. On en déduit donc que l'allèle « ailes longues » est dominant (on le notera « vg^+ ») par rapport à l'allèle « ailes vestigiales » qui est récessif (on le notera « vg »). De la même façon, l'allèle « corps gris » est dominant (on le notera « eb^+ ») par rapport à l'allèle corps ébène qui est récessif (on le notera « eb »).

Une fois les relations de dominance et récessivité entre les différents allèles connues, l'étude peut se poursuivre par la réalisation d'autres croisements.

Par exemple, le *test cross* correspond au croisement d'un organisme hétérozygote présentant un phénotype dominant avec un organisme au phénotype récessif (et donc homozygote). En fonction du phénotype de la descendance, ce croisement additionnel permet de déterminer si les gènes étudiés sont liés ou indépendants. L'intérêt d'un tel croisement est que le phénotype des descendants est à l'image des allèles transmis par l'individu F1, puisque les allèles de l'autre parent sont récessifs. L'étude de la descendance d'un croisement-test révèle donc très exactement les produits de la méiose de F1. Des hypothèses doivent être posées et les tableaux de croisement correspondants doivent être tracés. Les fréquences alléliques obtenues sont comparées aux fréquences théoriques, ce qui permet de valider ou non l'hypothèse de départ.

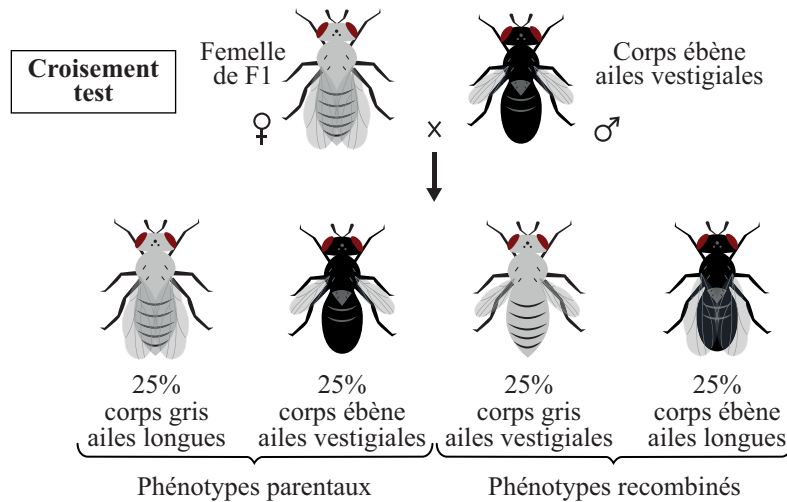
Exemple : on croise une femelle de F1 hétérozygote de phénotype [vg^+ ; e^+] avec un mâle de phénotype [vg ; e].

On étudie au sein de la nouvelle génération les fréquences des phénotypes parentaux ([vg^+ ; e^+] ou [vg ; e]) et des phénotypes *recombinés* ([vg^+ ; e] ou [vg ; e^+]).

Deux cas sont possibles.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

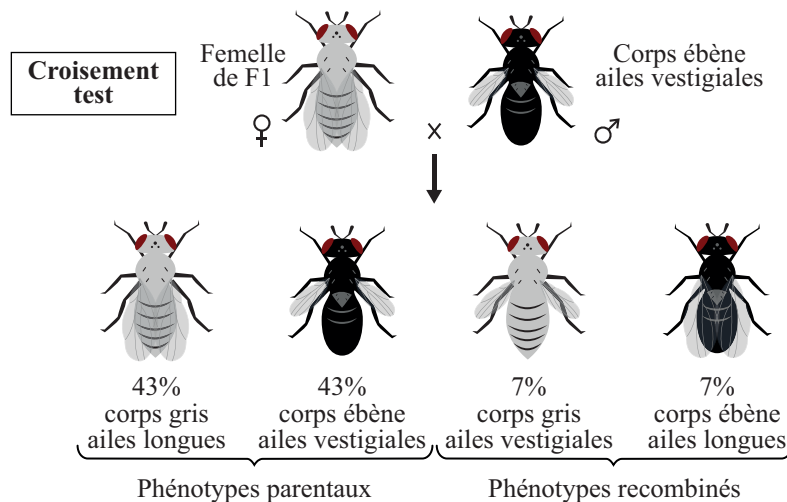
Cas 1 : il y a autant de phénotypes parentaux que de phénotypes recombinés



Les deux gènes sont donc indépendants.

Cas 2 : il y a davantage de phénotypes parentaux que de phénotypes recombinés

Les gènes sont donc liés, et les individus aux phénotypes recombinés proviennent de gamètes ayant subi un crossing-over.



Voir exercices 3, 4, 5, 10 et 11.

4.1.2 - La transmission des allèles chez l'être humain

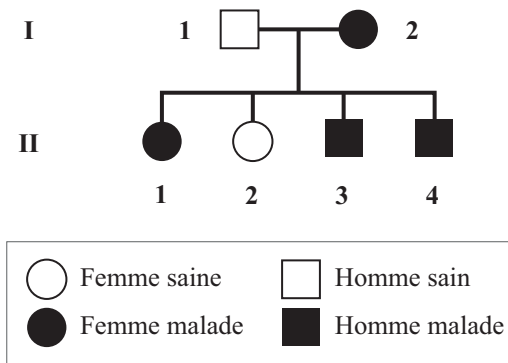
Pour réaliser l'étude des allèles humains et de leur transmission, les chercheurs ne peuvent évidemment pas croiser les individus comme c'est le cas pour l'étude d'organismes modèles en laboratoire.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Les scientifiques étudient donc l'arbre généalogique de familles au sein desquelles se trouvent des individus malades. La réalisation d'un arbre généalogique répond à des normes visibles sur la figure ci-dessous.



À partir de l'étude d'arbres généalogiques, on peut en théorie prédire si l'allèle responsable de la maladie est dominant ou récessif, et s'il est porté par un chromosome sexuel, aussi appelé *gonosome*, ou non, c'est-à-dire par un *autosome*.

Voir exercices 8 et 13.

4.2 Une étude facilitée par l'utilisation des nouvelles technologies

Des nouvelles technologies nous permettent aujourd'hui de séquencer des génomes de manière rapide et accessible. En comparant la séquence d'ADN d'un individu à une base de données pré-existante, il est donc possible de comprendre le phénotype associé, mais aussi sa transmission au cours des générations.

De plus, des décennies de recherche biomédicale ont permis l'élaboration d'énormes bases de données qui permettent par exemple de relier un phénotype à une ou à plusieurs mutations. Par analyse bioinformatique, on peut donc prédire un phénotype ou une maladie à une information génétique, et prévoir sa transmission.

À RETENIR

Le suivi de phénotypes au cours des générations, et les nouvelles technologies de séquençage sont autant d'outils pour réaliser des analyses génétiques aujourd'hui. Ces deux approches sont complémentaires, la première donnant des indices pour retracer les relations entre les différents allèles étudiés, et la seconde permettant de comprendre le lien entre séquence et phénotype associé.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

5 Accidents génétiques lors de la méiose

La méiose associée à la fécondation permet ainsi un brassage génétique, à l'origine d'une diversification du monde vivant. Au cours des générations, il existe donc une instabilité du génotype des individus.

PROBLÉMATIQUE

Des erreurs ou anomalies se produisant lors de la méiose peuvent-elles être également sources d'une diversification génétique ?

5.1 L'apparition d'un crossing-over inégal lors de la prophase 1

Au cours de la première division de méiose, il arrive que deux chromatides de chromosomes homologues s'enchevêtrent de manière imparfaite. Le crossing-over est alors dit *inégal*, car la quantité d'ADN échangée n'est pas la même pour les deux chromosomes.

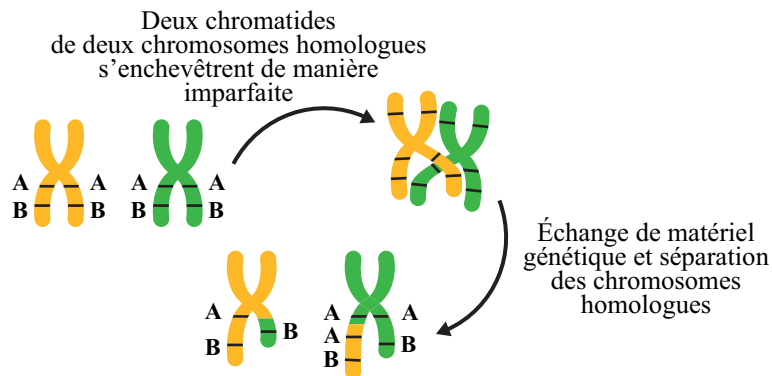


Figure 1.11 – Un crossing-over inégal à l'origine d'une duplication de gène

Bien que pouvant être délétères, les crossing-overs inégaux peuvent être une source de diversification génétique. En effet, alors que les gamètes ayant reçu le chromosome tronqué ne conduisent bien souvent pas à une descendance viable, un crossing-over inégal peut aussi conduire à une duplication de gènes. Si le chromosome correspondant est transmis, les copies dupliquées pourront évoluer plus ou moins indépendamment au grès des mutations. Au cours de l'évolution, *des familles multigéniques* se sont ainsi formées.

Définition 12 : famille multigénique

Ensemble de gènes homologues, c'est-à-dire ayant une origine commune car descendant d'un unique gène qui s'est dupliqué.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

ATTENTION

Il ne faut pas confondre famille multigénique et allèles : un chromosome porte l'ensemble des gènes de la famille multigénique. Chaque gène peut y être présent sous un allèle.

Voir exercices 6 et 7.

5.2 Migrations anormales de chromosomes ou de chromatides au cours des divisions méiotiques

Des pathologies peuvent être dues à une répartition anormale du contenu chromosomique lors de l'anaphase de division 1 ou de division 2 de méiose. Il en résulte la formation d'un gamète avec un chromosome surnuméraire ou manquant, et, après fécondation, une anomalie qualifiée d'*aneuploïdie*.

Définition 13 : aneuploïdie

Anomalie chromosomique engendrant un nombre de chromosomes supérieur ou inférieur à la normale. L'aneuploïdie est visible sur le caryotype.

Chez l'être humain, mises à part pour certaines pathologies bien définies comme les trisomies ou les syndromes liés aux chromosomes sexuels, l'aneuploïdie est létale avant la naissance.

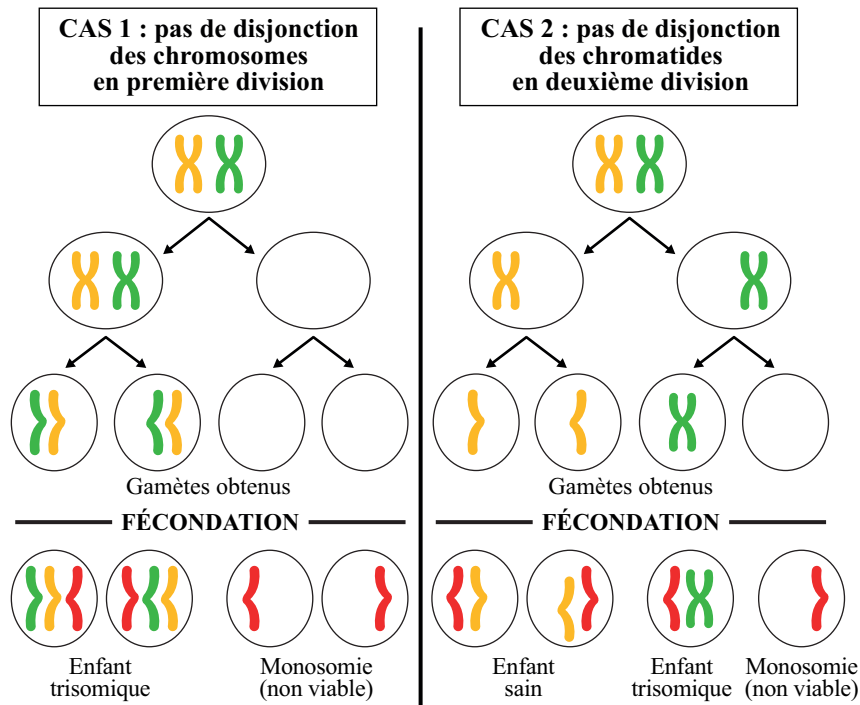


Figure 1.12 – Origine de la trisomie (seuls les chromosomes concernés sont représentés)

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

Remarque : le chromosome schématisé en rouge est celui qui provient de l'autre parent.

Voir exercices 9 et 12.

À RETENIR

La méiose n'est pas infaillible : elle peut être à l'origine d'accidents génétiques comme des crossing-overs inégaux ou des migrations anormales de chromosomes ou de chromatides. Bien que souvent associées à des effets délétères, ces anomalies peuvent aussi engendrer une diversification génétique.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Vérification de connaissances

5 min

Corrigé
p. 29

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1** Les crossing-overs inégaux :
- ☐ a ont toujours un effet délétère ;
 - ☐ b permettent une augmentation de matériel chromosomique pour tous les chromosomes ;
 - ☐ c peuvent conduire à des duplications de gènes ;
 - ☐ d participent au brassage interchromosomique.
- 2** Deux gènes liés :
- ☐ a sont toujours transmis ensemble de générations en générations ;
 - ☐ b codent des protéines qui ont nécessairement une fonction commune ;
 - ☐ c sont deux gènes localisés sur le chromosome X ;
 - ☐ d ont une grande probabilité d'être transmis ensemble, sauf en cas de crossing-over ;
 - ☐ e sont responsables de la trisomie 18.

2 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 29

Qui suis-je ?

- 1** brassage génétique causé par la répartition aléatoire des chromosomes homologues au cours de l'anaphase de la première division de méiose
- 2** gènes présents sur deux chromosomes différents
- 3** anomalie chromosomique visible sur le caryotype de l'individu entraînant un nombre de chromosomes supérieur ou inférieur à la normale.

3 Nombre de gènes en cause



10 min

Corrigé
p. 29

Lycée Victor Hugo, Besançon

Grâce aux informations extraites du document proposé, montrez que l'on peut affirmer que la différence phénotypique concernée n'est pas due à un seul gène.

On croise deux races pures de drosophiles, l'une à œil rouge vif, la seconde à œil rouge brique. En F1, on obtient 100% de drosophiles à œil rouge brique.

On réalise alors un croisement entre une femelle F1 et un mâle à œil rouge vif. On obtient une descendance constituée de 241 individus à œil rouge vif et 83 individus à œil rouge brique.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

4 Croisement - Gène(s)



10 min

Corrigé
p. 30

Lycée Charlemagne, Paris

On formule l'hypothèse que chez les plantes appelées « Belle de nuit », la couleur des fleurs est gouvernée par un seul couple d'allèles. Analysez les croisements présentés dans le document : leurs résultats sont-ils conformes à cette hypothèse ?

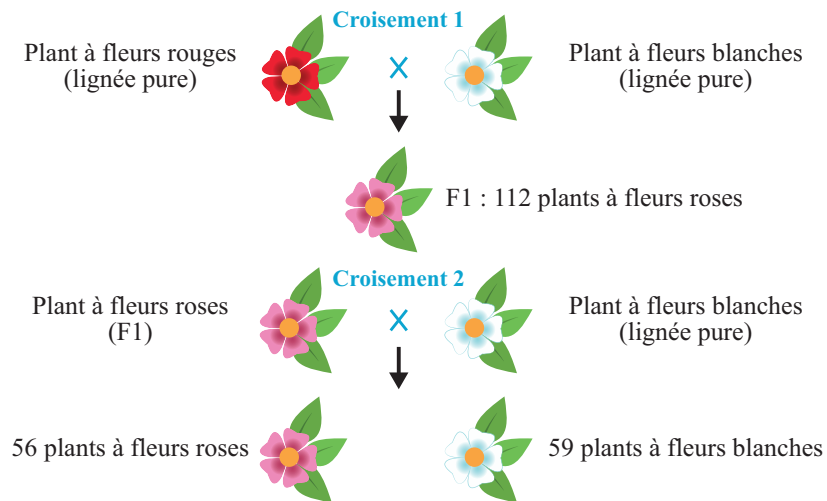


Figure 1.13 – Résultats de croisements chez les Belles de nuit

5 Liaison ou non des gènes



15 min

Corrigé
p. 30

Lycée Vauvenargues, Aix en Provence

Sachant que pour chaque caractère étudié, la différence phénotypique est due à un seul gène, déterminez, à partir des informations extraites du document ci-après, si les deux gènes considérés sont situés sur le même chromosome ou sur des chromosomes différents.

On croise des drosophiles de lignée pure : une drosophile à antennes normales et ailes longues avec une drosophile à antennes courtes et ailes tronquées (phénotype dumpy). On obtient en F1 : 100% de drosophiles à antennes normales et ailes longues.

On croise ensuite des drosophiles de la F1 avec des drosophiles à antennes courtes et ailes tronquées. On obtient la descendance suivante :

- 11% de drosophiles à antennes courtes et ailes longues ;
- 11% de drosophiles à antennes normales et ailes dumpy ;
- 39% de drosophiles à antennes courtes et ailes dumpy ;
- 39% de drosophiles à antennes normales et ailes longues.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

6 Duplications



15 min

Corrigé
p. 31

Lycée Albert de Mun, Nogent-sur-Marne

L'être humain exprime trois hormones hypophysaires d'une longueur de 9 acides aminés. Les séquences en acides aminés et les rôles respectifs de ces hormones sont donnés ci-après.

Vasotocine (AVT)

CYS TYR ILE GLN ASP CYS PRO ARG GLY

Rôle : Contraction des muscles des artères

Ocytocine (OT)

CYS TYR ILE GLN ASP CYS PRO LEU GLY

Rôle : Contraction des muscles des voies génitales femelles (ponte, mise bas)

Hormone antidiurétique (ADH)

CYS TYR PHE GLN ASP CYS PRO ARG GLY

Rôle : Limitation des pertes d'eau par voie urinaire

Figure 1.14 – Caractéristiques des trois hormones hypophysaires de l'Homme

Déterminez l'origine des gènes codant ces hormones ; justifiez votre réponse.

7 Duplications



15 min

Corrigé
p. 32

Lycée Watteau, Valenciennes

On cherche à expliquer l'existence, chez tous les êtres vivants, de l'enzyme LDH (lactico-déshydrogénase), dont les différentes formes présentent quelques différences mais sont globalement très ressemblantes.

Utilisez l'ensemble documentaire proposé et vos connaissances pour justifier le schéma évolutif explicatif (document 2) proposé par les scientifiques.

Document 1a

La lactico-déshydrogénase ou LDH est une enzyme constituée par l'association de quatre chaînes polypeptidiques ; on la trouve chez tous les êtres vivants.

Chez les vertébrés, l'enzyme résulte de la combinaison de trois types de chaînes :

- la chaîne A (ou LDH-A) codée par un gène A ;
- la chaîne B (ou LDH-B) codée par un gène B ;
- la chaîne C (ou LDH-C) codée par un gène C.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

Document 1b

On fournit la localisation des gènes de la LDH chez la Souris (vertébré) .

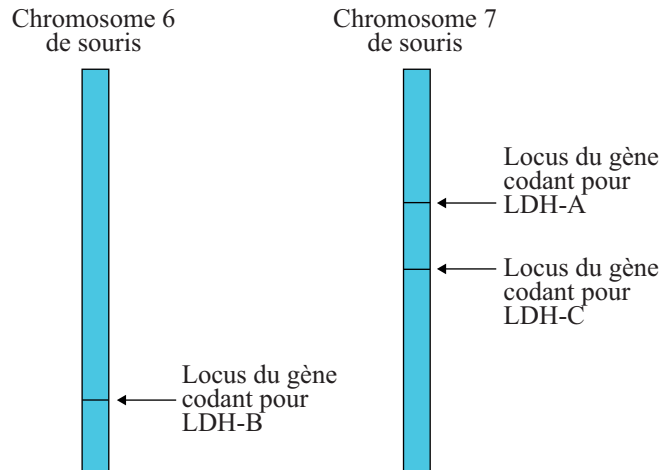


Figure 1.15 – Situation des gènes

Document 2

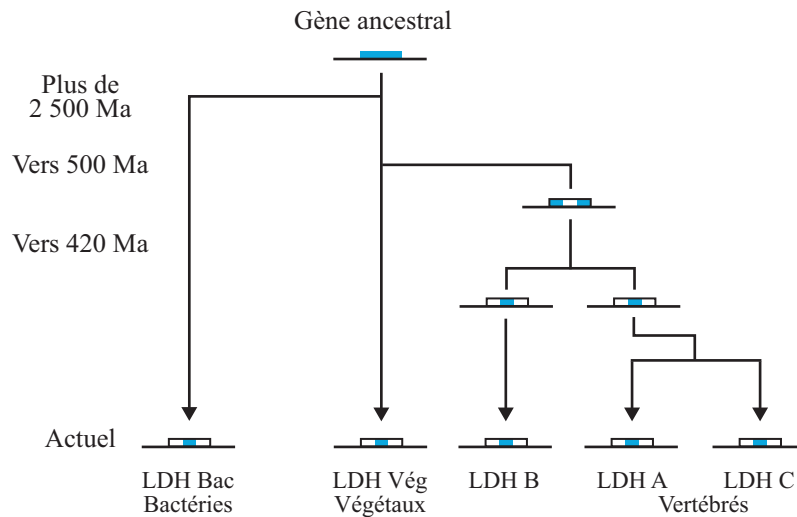


Figure 1.16 – Schéma évolutif explicatif proposé par les scientifiques

On fournit un extrait de l'alignement des séquences d'acides aminés de différentes chaînes constitutives de la LDH (voir page suivante). On constate d'autre part que les séquences d'ADN concernant les gènes LDH-A et le gène LDH-B sont très proches, alors que la séquence du gène LDH-C présente davantage de différences avec les deux autres.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

LDH de bactérie	NPVDI	LTYAT	WKL	SGFP	KN	RVV	GSG
LDH de végétal (riz)	NPVDV	LTYVA	WKL	SGFP	AS	RVI	GSG
LDH-C de souris	NPVDI	LTYVV	WKI	SGFP	VG	RVI	GSG
LDH-A de souris	NPVDI	LTYVA	WKI	SGFP	KN	RVI	GSG
LDH-B de souris	NPVDI	LTYVT	WKL	SGLP	KH	RVI	GSG

Figure 1.17 – Alignement des séquences d'acides aminés

8 Arbre généalogique



20 min

Corrigé
p. 32

Nouveau programme

La myopathie de Duchenne est une maladie génétique grave qui provoque à terme une dégénération des fibres musculaires, aussi bien respiratoires que cardiaques. Les patients de cette maladie sont à 99,9% des garçons. Un arbre généalogique d'une famille avec plusieurs cas de myopathie de Duchenne est présenté ci-dessous :

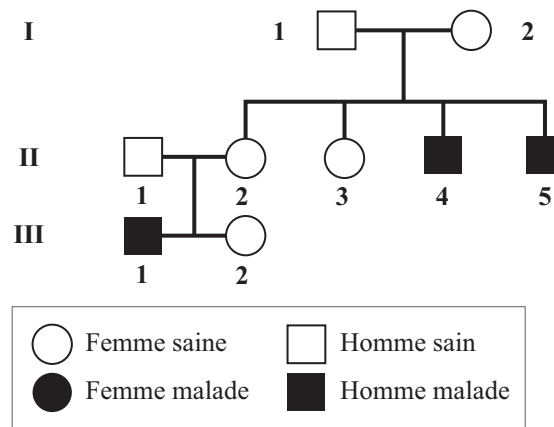


Figure 1.18 – Arbre généalogique de la famille

À partir de l'étude de l'arbre généalogique, expliquez pourquoi la myopathie de Duchenne touche principalement les garçons.

Il est conseillé de poser des hypothèses quant au mode de transmission : gène par un autosome ou par un gonosome (X ou Y), et allèle dominant ou récessif, et d'appliquer ces hypothèses à l'arbre généalogique afin de prouver si elles sont possibles ou non.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

9 Caryotype anormal



20 min

Corrigé
p. 33

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Le syndrome de Turner est une anomalie qui touche uniquement les filles et dont les symptômes sont : une petite taille, un développement incorrect des caractères sexuels secondaires à la puberté, ainsi qu'une stérilité.

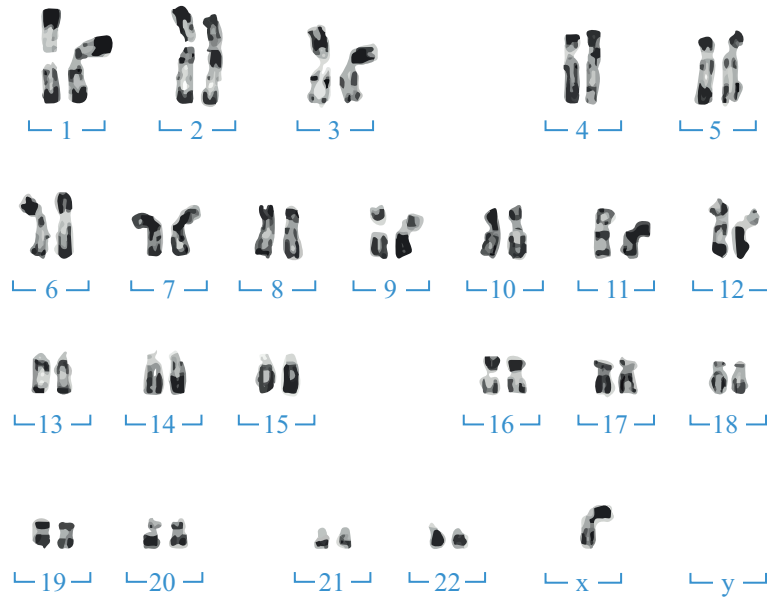


Figure 1.19 – Caryotype d'une femme atteinte du syndrome de Turner

Après avoir observé le caryotype d'une personne atteinte du syndrome de Turner puis envisagé la (les) cause(s) possible(s) de l'anomalie, choisissez la (ou les) proposition(s) exacte(s).

Le nombre inhabituel de chromosomes d'une personne atteinte du syndrome de Turner pourrait être dû à :

- ☐ a une absence de séparation des deux chromosomes homologues de la paire 21 en anaphase 1 de méiose ;
- ☐ b une absence de séparation des deux chromosomes homologues de la paire XY en anaphase 1 de méiose ;
- ☐ c une absence de séparation des deux chromosomes homologues de la paire XX en anaphase 1 de méiose ;
- ☐ d une absence de séparation des deux chromatides du chromosome X en anaphase 2 de méiose.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

10 Brassage génétique



30 min

Corrigé
p. 34

Lycée Pasteur, Neuilly

Chez la Souris, l'aspect du poil est sous la dépendance d'un gène dont on étudie ici deux allèles : l'allèle « poil raide » et l'allèle « poil frisé ». On admettra que le caractère « aspect du poil » est sous la dépendance d'un seul gène. L'aspect de l'œil est sous la dépendance d'un autre gène dont on étudie ici deux allèles : l'allèle « œil normal », et l'allèle « œil mal formé ». On admettra que le caractère « aspect de l'œil » est sous la dépendance d'un seul gène.

À partir des résultats de deux croisements décrits dans le document, démontrez qu'il y a eu brassage génétique au cours de la formation des gamètes chez les individus F1 puis schématisez et commentez le comportement des chromosomes qui, au cours de la méiose, permet d'expliquer ce brassage.

Le croisement d'une souris de race pure de phénotype sauvage [poil raide, œil normal] avec une autre souris de race pure de type [poil frisé, œil mal formé] donne une première génération (F1) dans laquelle toutes les souris ont le phénotype [poil raide, œil normal]. On croise alors des souris de la génération F1 avec des souris de phénotype [poil frisé, œil mal formé]. Les résultats statistiques de ce type de croisement sont les suivants :

- 55 souris à poil frisé et œil normal ;
- 56 souris à poil frisé et œil malformé ;
- 54 souris à poil raide et œil normal ;
- 56 souris à poil raide et œil malformé.

11 Les chats calico



60 min

Corrigé
p. 35

Lycée Notre-Dame de Boulogne, Boulogne-Billancourt

Certains chats possèdent un pelage composé d'une mosaïque de tâches blanches, rousses et noires. On les appelle des « calico ».

Chacune de ces mosaïques forme un motif unique qui permet de reconnaître un individu calico aussi sûrement qu'avec des empreintes digitales.

On a découvert que tous les chats calico sont des femelles.

À l'aide de l'exploitation des documents proposés et de vos connaissances :

- montrer que la méiose et la fécondation permettent d'expliquer les résultats du croisement présenté dans le document 2 ;
- expliquer comment des chattes calico possédant un même génotype peuvent avoir des pelages différents.

On ne cherchera pas à expliquer la présence de poils blancs : ce travail ne porte que sur le déterminisme des tâches rousses et noires.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

Document 1 : relation entre les allèles (O^+ et O^-) portés par les chromosomes sexuels et la couleur du pelage chez le chat.

Chat mâle		Chat femelle	
Génotype	Phénotype	Génotype	Phénotype
O^+  X Y	poils roux	$O^+ O^+$  X X	poils roux
O^-  X Y	poils noirs	$O^- O^-$  X X	poils noirs
		$O^+ O^-$  X X	calico

Figure 1.20 – Relation entre les allèles (O^+ et O^-)

D'après A. Jaraud-Darnault, thèse, 2015

La paire de chromosomes sexuels subit la même méiose que les autres chromosomes.

Document 2 : résultat d'un croisement.

On croise un chat roux avec une chatte calico. Le tableau suivant présente le résultat de ce croisement.

Proportions	25% des descendants	25% des descendants	25% des descendants	25% des descendants
Phénotype	calico	poils roux	poils roux	poils noirs
Sexe	femelles	femelles	mâles	mâles



Figure 1.21 – Aspects du pelage de trois des chatons femelles calico

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Document 3 : la coloration d'un poil

Les mélanocytes sont des cellules qui fabriquent les pigments responsables de la coloration d'un poil. Les mélanocytes de chat produisent tous un pigment roux appelé trichochrome. Mais les mélanocytes peuvent aussi former un autre pigment, l'eumélanine, qui masque le trichochrome et rend le poil noir.

On a découvert que l'expression de l'allèle O+ empêche la biosynthèse d'eumélanine.

Document 4 : le corpuscule de Barr

Document 4.a : l'hypothèse de Mary Lyon

En 1949, le docteur Murray Barr découvre que le noyau de certaines cellules contient un amas d'ADN qu'il baptise « corpuscule de Barr ». Douze ans plus tard, la généticienne Mary Lyon propose que le corpuscule de Barr corresponde à un chromosome X inactivé. Les gènes de ce chromosome ne pourraient plus s'exprimer et seuls les gènes portés par l'autre chromosome X seraient utilisés par la cellule.

Selon cette hypothèse, dans une cellule embryonnaire possédant deux chromosomes X, c'est le hasard qui déterminerait lequel des deux se transforme en corpuscule de Barr. Toutes les cellules filles de la cellule embryonnaire conserveraient ensuite le même chromosome X inactivé.

Document 4.b : aspect du noyau d'un mélanocyte de chat mâle (A) et du noyau d'un mélanocyte de chatte calico (B)

Sur ce type d'image un corpuscule de Barr apparaît sous la forme d'une tache blanche.

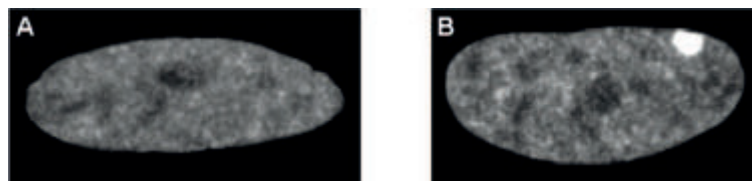


Figure 1.22 – aspect du noyau d'un mélanocyte de chat mâle (A) et du noyau d'un mélanocyte de chatte calico (B)

D'après B. Hong et al., PNAS, 2001.

On retrouve les mêmes résultats dans tous les mélanocytes responsables des poils roux ou noirs des femelles.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

12 Brassage génétique



30 min

Corrigé
p. 37

Lycée Vauvenargues, Aix en Provence



Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

Expliquez les résultats des croisements décrits dans le document ci-après.
Vous illustrerez votre réponse par des schémas.

- On croise deux races pures de souris :
 - des femelles à pelage agouti (poils gris avec une bande jaune localisée) et à coloration non uniformément répartie (présence de taches blanches : ce phénotype est appelé piebald),
 - des mâles à pelage noir (non agouti) et à coloration uniformément répartie (non piebald).

On obtient en F1 100% d'individus agouti sans taches. Le croisement réciproque (femelle à pelage noir et à coloration uniformément répartie avec mâle à pelage agouti et à coloration non uniformément répartie) donne le même résultat.

- On croise ensuite des mâles de F1 avec des femelles non agouti piebald. On obtient 4 phénotypes différents : 25% d'individus noirs à coloration uniformément répartie, 25% de noirs piebald, 25% d'agouti à coloration uniformément répartie et 25% d'agouti piebald.

13 Caryotype - Anomalie



20 min

Corrigé
p. 38

Lycée Charlemagne, Paris

Une femme, après plusieurs avortements spontanés, donne enfin naissance à un enfant mais on découvre rapidement qu'il est atteint d'une trisomie 21.

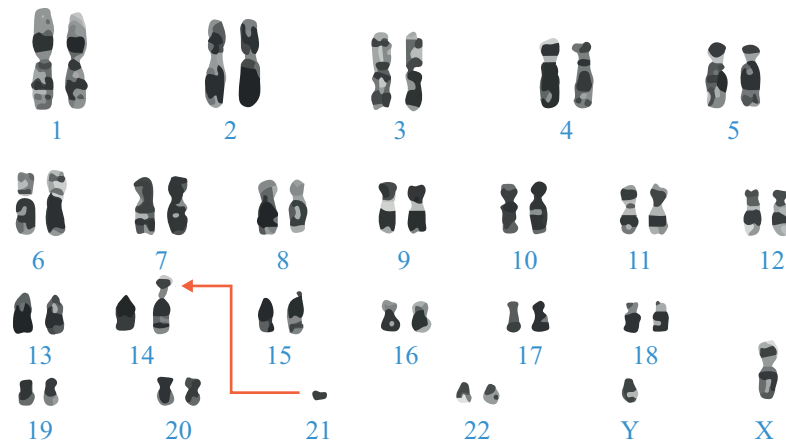


Figure 1.23 – Caryotype du père

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Les médecins soupçonnent une anomalie caryotypique chez un des parents. Ils effectuent un caryotype du père et de la mère ; celui de la mère est normal, celui du père présente une translocation d'un chromosome 21 sur un chromosome 14 (flèche).

Expliquez comment ce couple a pu donner naissance à un enfant trisomique ; précisez la raison pour laquelle la femme a subi auparavant des avortements spontanés.

14 Arbre généalogique



25 min

Corrigé
p. 39

Nouveau programme

Une dame (III.1 sur l'arbre généalogique) consulte un médecin car son père et ses frères et sœurs ont une maladie génétique à l'origine d'une surdité et d'une mutité. Souhaitant avoir un enfant, elle est inquiète que son enfant soit atteint de la même maladie. L'arbre généalogique de la famille est présenté ci-dessous.

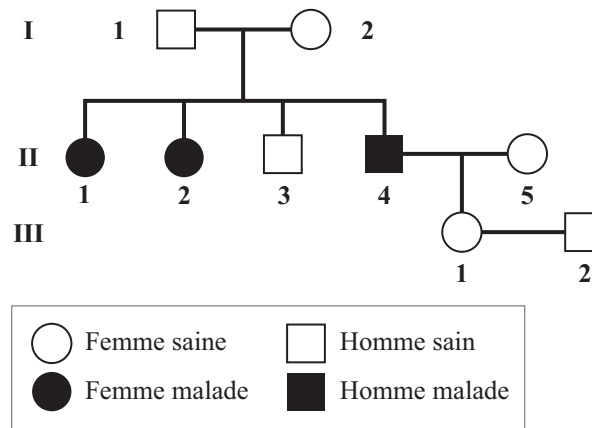


Figure 1.24 – Arbre généalogique de la famille

- 1 À partir de l'étude de l'arbre généalogique, déterminez le mode de transmission de cette maladie.

Il est conseillé de poser des hypothèses quant au mode de transmission : gène par un autosome ou par un gonosome (X ou Y), et allèle dominant ou récessif, et d'appliquer ces hypothèses à l'arbre généalogique afin de prouver si elles sont possibles ou non.

- 2 Sachant que dans la population, une personne sur trente possède l'allèle associé à cette maladie à l'état hétérozygote, quelle est la probabilité que l'enfant de la personne soit également malade ?

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

1 **QCM** Vérification de connaissances

→ Énoncé
p. 18

- 1 Réponse **c**.
- 2 Réponse **d**.

2 Vérification des connaissances

→ Énoncé
p. 18

- 1 Le brassage interchromosomique.
- 2 Des gènes indépendants.
- 3 L'aneuploïdie.

3 Nombre de gènes en cause

→ Énoncé
p. 18

Lycée Victor Hugo, Besançon

MÉTHODE

On demande ici de démontrer que la différence phénotypique est due à plus d'un gène. On ne demande donc pas le nombre exact de gènes impliqués. Il suffit donc de montrer que l'hypothèse selon laquelle un seul gène est impliqué est fausse.

Émettons l'hypothèse qu'un seul gène, noté V , est impliqué dans la couleur rouge de l'œil de drosophile.

Soient v l'allèle associé à la couleur rouge vive, et v^+ , à la couleur rouge brique.

Tout d'abord, deux races pures, donc homozygotes sont croisées entre elles. À partir des phénotypes, on peut donc écrire que le croisement est :

$$(v//v) \times (v^+//v^+).$$

En F1, toutes les drosophiles, de génotype $(v^+//v)$, présentent le phénotype [œil rouge vif]. L'allèle v^+ , associé à ce phénotype, est donc dominant par rapport à l'allèle v .

On réalise un second croisement (croisement test) entre une femelle F1 et un mâle à œil rouge vif, qui est donc de génotype $(v//v)$ (phénotype associé à l'allèle récessif). Le croisement est donc le suivant :

Mâle \ Femelle	v^+	v
v	$(v^+//v)$	$(v//v)$
v	$(v^+//v)$	$(v//v)$

En théorie, on devrait donc obtenir 50% de drosophiles [œil rouge brique] et 50% de [œil rouge vif]. Ce n'est pas le cas selon l'énoncé. Notre hypothèse de départ n'était donc pas correcte, il y a donc plus d'un gène impliqué ici.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

4 Croisement - Gène(s)

Énoncé
p. 19

Lycée Charlemagne, Paris

On souhaite comprendre si la couleur des Belles de nuit est gouvernée par un seul couple d'allèles.

Émettons l'hypothèse qu'un seul gène, noté R, est impliqué ici.

Soient r^+ et r, les deux allèles sous lesquels le gène R est présent, respectivement associés aux phénotypes [couleur rouge] et [couleur blanche].

Le premier croisement correspond à un croisement de deux lignées pures donc homozygotes, noté : $(r^+/r^+) \times (r/r)$.

Avec la F1, de génotype (r^+/r) , naît un nouveau phénotype intermédiaire, [couleur rose]. On peut donc en déduire que les allèles r^+ et r sont codominants, s'exprimant tous deux à l'état hétérozygote et participant à ce phénotype intermédiaire.

Les plantes à fleurs roses sont hétérozygotes avec comme génotype (r^+/r) et les fleurs blanches homozygotes avec comme génotype (r/r) . On peut donc écrire l'échiquier du deuxième croisement (croisement test) :

		Fleurs blanches	
		r	r
Fleurs roses	r^+	r^+/r [rose]	r^+/r [rose]
	r	r/r [blanche]	r/r [blanche]

On est donc censé obtenir 50% de fleurs au phénotype [couleur blanche] et 50% de fleurs au phénotype [couleur rose]. Cela concorde avec les chiffres de l'énoncé (59 et 56), ce qui suggère que notre hypothèse de départ est vraie, selon laquelle un seul gène est impliqué dans la couleur des fleurs des Belles de nuit.

5 Liaison ou non des gènes

Énoncé
p. 19

Lycée Vauvenargues, Aix en Provence

MÉTHODE

Comme pour tous les exercices de ce type, deux croisements sont réalisés. Le premier permet d'étudier les notions de dominance et de récessivité entre les différents allèles. Le deuxième croisement permet d'observer si les gènes sont liés ou non. Pour ce dernier point, on émet une hypothèse, qui sera vérifiée ou non en fonction des effectifs obtenus. Apprenez à reconnaître les pourcentages pour poser l'hypothèse, cela vous permettra de gagner du temps ! Par exemple, quatre phénotypes présents à 25% chacun seront majoritairement associés à des gènes indépendants.

On étudie deux caractères chez la drosophile : la taille des antennes et celle des ailes. Soit N, le gène responsable de la taille des antennes, présent sous

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

deux allèles : n^+ , associé à une taille normale, et n , associé à des antennes courtes.

De même, soit T , le gène responsable de la taille des ailes, présent sous deux allèles : t , associé à des ailes tronquées, et t^+ , associé à des antennes longues.

On croise des drosophiles de lignées pures, donc homozygotes :

$$(n^+/n^+, t/t) \times (n/n, t^+/t^+).$$

On obtient donc des individus de génotype $(n^+/n, t^+/t)$ qui sont selon l'énoncé de phénotype [antennes normales, ailes longues]. Les allèles associés à ce phénotype, n^+ et t^+ , sont donc dominants par rapports aux allèles n et t .

On croise ensuite des individus de F1 avec des individus de phénotype [antennes courtes, ailes tronquées], donc de génotype $(n/n, t/t)$. On émet ici l'hypothèse que les deux gènes sont indépendants.

On a donc le croisement test :

	n^+, t^+	n^+, t	n, t^+	n, t
n, t	$(n^+/n, t^+/t)$	$(n^+/n, t/t)$	$(n/n, t^+/t)$	$(n/n, t/t)$

On serait donc censé avoir 25% de chaque phénotype existant. Or, ce n'est pas le cas, notre hypothèse est donc fausse.

De plus, si les gènes étaient liés, les phénotypes [antennes normales, ailes tronquées] et [antennes courtes, ailes longues] ne pourraient exister, sauf en cas de crossing-over. Les deux phénotypes [antennes normales, ailes longues] et [antennes courtes, ailes tronquées] seraient donc majoritaires, et les deux autres phénotypes, correspondant aux recombinants seraient moins présents. D'après l'énoncé, c'est le cas.

On a donc prouvé ici que les deux gènes sont liés, avec toutefois présence d'une certaine proportion de gamètes subissant des crossing-overs au cours de la méiose.

6 Duplications

Énoncé
p. 20

Lycée Albert de Mun, Nogent-sur-Marne

L'être humain exprime trois molécules, la vasotocine, l'ocytocine et l'hormone antidiurétique, dont on souhaite comprendre l'origine.

En comparant les séquences des trois protéines, on observe qu'ils ont des séquences en acides aminés très proches : un seul acide aminé sur neuf diffère entre la vasotocine et l'ocytocine et entre l'ocytocine et l'hormone antidiurétique. De plus, deux acides aminés sont différents entre l'ocytocine et l'hormone antidiurétique.

Cette proximité n'est pas le fruit du hasard. Ces trois gènes sont homologues et appartiennent probablement à une même famille multigénique, provenant d'un seul gène qui a subi des duplications lors de crossing-overs inégaux. Les trois gènes auraient ainsi divergé, et auraient acquis des rôles qui leur sont propres aujourd'hui.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

7 Duplications

Énoncé
p. 20

Lycée Watteau, Valenciennes

On souhaite expliquer la présence de l'enzyme LDH chez tous les êtres vivants.

D'après le document 1a, la LDH des vertébrés résulte de l'association de trois types de chaînes, les chaînes A, B et C. Selon le document 1b, les trois chaînes sont codées par trois gènes différents, qui sont chez la souris, sur le chromosome 6 pour la chaîne B et sur le chromosome 7 pour les chaînes A et C.

L'alignement des séquences du document 3 montre que les trois chaînes A, B et C sont très proches les unes des autres. Cette proximité ne peut être due au hasard. Les trois gènes sont donc homologues, ils appartiennent à une famille multigénique provenant d'un gène unique qui s'est dupliqué lors de crossing-overs inégaux. Deux duplications se sont donc déroulées. On remarque que la séquence de la chaîne C est plus proche de celle de la chaîne A que de la chaîne B. Cela suggère, comme présenté dans le document 2, qu'une première duplication a conduit à la formation du gène de la chaîne B et d'un second gène, qui s'est lui-même dupliqué pour donner les deux autres chaînes.

De plus, les alignements de séquences montrent aussi une très forte similarité entre les gènes des vertébrés et les gènes de bactéries et de végétaux. Toutes ces séquences proviennent donc d'un gène ancestral, et ont ainsi subi des mutations au sein des différentes lignées.

Grâce à cet ensemble documentaire, on a donc pu montrer que le gène de la LDH provient d'un gène ancestral, qui s'est différencié en accumulant des mutations au sein des différentes lignées. Chez les vertébrés, ce gène a subi deux duplications, ceci explique pourquoi trois gènes sont présents chez ces organismes.

8 Arbre généalogique

Énoncé
p. 22

Nouveau programme

MÉTHODE

Lors de l'étude d'arbres généalogiques, il faut émettre des hypothèses que vous réfuterez ou non. Les hypothèses concernent les chromosomes portant le gène (autosome ou gonosome) ainsi que la dominance ou la récessivité de l'allèle concerné.

Nous souhaitons comprendre la transmission de la myopathie de Duchenne.

- *Hypothèse 1 : l'allèle à l'origine de la maladie est dominant par rapport à l'allèle sain.*

Cette hypothèse peut d'emblée être écartée : aucun des grands-parents n'est malade. De plus, pour avoir transmis la maladie à son fils, la personne II.2 aurait dû être malade.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

- *Hypothèse 2 : le gène est porté par un autosome et l'allèle est récessif par rapport à l'allèle sain.* Cette hypothèse est peu probable. Il faudrait que les deux grands-parents ainsi que l'individu II.1 soient hétérozygotes, alors que la maladie est rare, et que les trois individus sont indépendants génétiquement.
- *Hypothèse 3 : le gène est porté par le chromosome Y.* Cette hypothèse est fausse, le grand-père serait malade, et la personne II.2 n'aurait pas pu transmettre la maladie à son fils.
- *Hypothèse 4 : le gène est porté par le chromosome X et l'allèle est récessif par rapport à l'allèle sain.* Cette hypothèse s'avère vérifiée par l'arbre généalogique. La grand-mère était en effet porteuse de l'allèle associé à la maladie, et l'a transmis à ses fils et à sa fille II.2, qui elle-même l'a transmise à son fils.

La myopathie de Duchenne est donc liée à un allèle récessif présent sur le chromosome X. Ceci explique pourquoi cet allèle s'exprime chez les garçons, étant X/Y. Chez les filles X/X, cet allèle, récessif, ne s'exprime pas.

9 Caryotype anormal

Énoncé
p. 23

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

MÉTHODE

À partir du caryotype, précisez dans un premier temps l'anomalie présente ici. Puis, au brouillon, schématisez les différentes propositions de l'énoncé pour conclure si elles conduisent à l'anomalie identifiée.

Sur le caryotype, on observe que la personne ne possède qu'une copie du chromosome X. On a donc une aneuploïdie.

La proposition **a** est fausse, puisqu'aucune anomalie affectant les chromosomes 21 n'est visible ici.

La présence d'une seule copie du chromosome X sur le caryotype est due à la formation d'un gamète sans chromosome sexuel. Ceci peut être la conséquence d'une absence de séparation des deux chromosomes sexuels (XX ou XY) lors de l'anaphase de la première division de méiose, ou d'une absence de séparation des deux chromatides du chromosome X pendant l'anaphase de méiose 2. Les trois propositions **b**, **c** et **d** sont donc correctes.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

10 Brassage génétique

Énoncé
p. 24

Lycée Pasteur, Neuilly

MÉTHODE

On souhaite ici comprendre quel type de brassage est impliqué dans l'apparition des phénotypes des souris. Autrement dit, on se demande si les gènes sont liés ou indépendants et dans le premier cas, s'il y a eu des crossing-overs.

Soit R, le gène causal de l'aspect du poil présent sous deux allèles, r^+ l'allèle associé au phénotype [poil raide] et r , l'allèle associé au phénotype [poil frisé]. De même, soit N, le gène causal de l'aspect de l'œil présent sous deux allèles, n^+ l'allèle associé au phénotype [œil normal] et n , l'allèle associé au phénotype [œil mal formé].

Tout d'abord, on croise deux lignées pures, donc homozygotes :

$$(r^+/r^+, n^+/n^+) \times (r/r, n/n).$$

On obtient uniquement des souris [poil raide, œil normal]. Les allèles associés à ce phénotype r^+ et n^+ sont donc dominants par rapport aux allèles r et n , les souris étant de génotype $(r^+/r, n^+/n)$.

On réalise ensuite un croisement d'une de ces souris avec une souris de phénotype [poil frisé, œil mal formé]. Les allèles associés à ces phénotypes sont récessifs, cette souris est donc homozygote et de génotype $(r/r, n/n)$. Émettons l'hypothèse que les deux gènes sont indépendants.

On a alors le croisement test suivant :

	r^+, n^+	r^+, n	r, n^+	r, n
r, n	$(r^+/r, n^+/n)$	$(r^+/r, n/n)$	$(r/r, n^+/n)$	$(r/r, n/n)$

On est alors censé obtenir 25% de souris [poil raide, œil normal], 25% de souris [poil raide, œil mal formé], 25% de souris [poil frisé, œil normal] et 25% de souris [poil frisé, œil mal formé]. Selon l'énoncé, ces pourcentages correspondent aux effectifs obtenus. Ces deux gènes sont donc indépendants, ils sont ainsi sur des chromosomes différents. Lors de l'anaphase de méiose 1, la répartition des chromosomes homologues est aléatoire, ce qui participe à la création de nouvelles associations d'allèles qui sont visibles avec la naissance de nouvelles associations de phénotypes (ici [poil raide, œil mal formé] et [poil frisé, œil normal]). C'est ce qu'on appelle le brassage interchromosomique.

Le schéma attendu correspond à la figure 8 de ce chapitre, en remplaçant les noms des allèles par ceux étudiés ici.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

11 Les chats calico

Énoncé
p. 24

Lycée Notre-Dame de Boulogne, Boulogne-Billancourt

Les chats calico, c'est-à-dire avec un pelage composé d'une mosaïque de taches blanches, rousses et noires, sont toutes des femelles. Cette mosaïque est unique et particulière à chaque chatte comme les empreintes digitales. Comment expliquer que seules des femelles présentent cette caractéristique du pelage ? Est-ce dû à la reproduction sexuée et donc à la méiose et à la fécondation ? On cherche également à expliquer pourquoi cette mosaïque est unique à chaque chatte. On ne s'intéressera qu'aux taches rousses et noires du pelage.

Les mécanismes à l'origine de la couleur du pelage des chats.

Le document 1 permet d'expliquer la relation entre les allèles O^+ et O^- et la couleur du pelage. Un gène O porté par les chromosomes sexuels est responsable de la couleur roux ou noir. Cet allèle n'est porté que par le chromosome X et non par le chromosome Y . Ainsi :

- les mâles ne possèdent qu'un seul allèle du gène et donc vont l'exprimer dans leur phénotype. S'ils possèdent l'allèle O^+ , ils auront des poils roux (phénotype : $[O^+]$). S'ils possèdent l'allèle O^- , ils auront des poils noirs (phénotype : $[O^-]$);
- les femelles possèdent deux chromosomes X et donc deux allèles du gène : si celles-ci sont homozygotes $XO^+//XO^+$, elles auront les poils roux (phénotype : $[O^+]$). Si celles-ci sont homozygotes $XO^-//XO^-$, elles auront des poils noirs (phénotype : $[O^-]$). Si elles sont hétérozygotes $XO^+//XO^-$, elles auront des poils calico (phénotype $[O^+; O^-]$).

Le document 2 permet de mettre en évidence un croisement entre un chat roux $[O^+]$ (de génotype $(XO^+//Y)$) avec une chatte calico de phénotype $[O^+; O^-]$ (de génotype $XO^+//XO^-$).

Mâle $[O^+]$ ($XO^+//Y$) $\times$ Femelle $[O^-]$ ($XO^+//XO^-$).

La méiose est un mode de division à l'origine des gamètes haploïdes à partir d'une cellule mère diploïde. Au cours de la division réductionnelle de la méiose (division méiotique 1), les chromosomes homologues sont séparés, et donc les chromosomes sexuels également. Le mâle produira donc deux types de gamètes en quantités équiprobables (XO^+) et (Y) et la femelle produira aussi deux types de gamètes en quantités équiprobables (XO^+) et (XO^-). Au cours de la fécondation, un gamète mâle fusionne avec un gamète femelle, aboutissant à un zygote diploïde à l'origine d'un nouvel individu. Cette rencontre est aléatoire à l'origine de la diversité des individus issus de cette reproduction.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

On peut représenter les résultats théoriques du croisement sous la forme d'un échiquier de croisement :

		Gamètes mâles	
		XO ⁺	Y
Gamètes femelles	XO ⁺	XO ⁺ //XO ⁺ femelle [roux]	XO ⁺ //Y mâle [roux]
	XO ⁻	XO ⁺ //XO ⁻ femelle [calico]	XO ⁻ //Y mâle [noir]

On obtient donc 50% de femelles (dont 25% de rousses et 25% de calico) et 50% de mâles (dont 25% de roux et 25% de noirs).

Les résultats théoriques sont identiques aux résultats du croisement, ce qui montre que méiose et fécondation permettent d'expliquer les résultats du croisement. Toutes les femelles calico ont donc le même génotype (XO⁺//XO⁻) et pourtant leur pelage a une mosaïque unique. Comment expliquer cette particularité.

L'origine du pelage différent des femelles calico.

Le document 3 montre que la coloration d'un poil est due à la présence de pigments produits dans le mélanocyte. Tous les mélanocytes produisent un pigment roux appelé trichochrome. Certains mélanocytes produisent aussi un pigment noir, l'eumélanine qui masque le pigment roux et le poil est alors noir. La synthèse de ce pigment est contrôlée par le gène O porté par le chromosome X. Donc chez les mâles qui n'ont qu'un seul allèle du gène et chez les femelles homozygotes :

- si l'allèle est O⁻ : le pigment noir est synthétisé et le poil est noir ;
- si l'allèle est O⁺ : le pigment noir n'est pas synthétisé et le poil est roux.

On peut alors se demander ce qui se passe chez les femelles hétérozygotes. Le document 4a met en évidence que les amas d'ADN observés dans certaines cellules correspondent à un chromosome X inactif. Dans ce cas, seuls les gènes portés par l'autre chromosome X s'exprimeraient dans la cellule. En ce qui concerne le gène O porté par le chromosome X, un seul allèle s'exprimerait chez les femelles hétérozygotes, soit O⁺ et le poil est roux, soit O⁻ et le poil est noir.

Le document 4B montre que le corpuscule de Barr apparait sous la forme d'une tache blanche dans le noyau de la cellule. Cette tache est absente des mélanocytes du mâle, par contre elle est présente dans tous les mélanocytes de chattes calico. Selon cette hypothèse, certains mélanocytes chez la chatte calico expriment l'allèle O⁺ et d'autres l'allèle O⁻. Ainsi en mettant en relation les documents 3 et 4, on peut dire que l'inactivation d'un chromosome X serait le résultat du hasard. Cette inactivation aurait lieu dans une cellule embryonnaire et ainsi toutes les cellules issues de cette cellule par mitoses auraient le même chromosome X inactif. Donc les poils issus de ces mélanocytes auront tous la même couleur rousse ou noire, d'où un aspect du pelage par taches rousses et noires.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

Ainsi les chattes hétérozygotes ayant donc toutes le même génotype auront un pelage différent et unique. Seul le hasard détermine la localisation et la répartition des mélanocytes avec un chromosome XO^+ inactif (tâche rousse) et celle avec un chromosome XO^- inactif (tâche noire).

12 Brassage génétique

→ Énoncé
p. 27

Lycée Vauvenargues, Aix en Provence



On souhaite comprendre les bases génétiques des croisements effectués.

Émettons l'hypothèse que le gène responsable de la couleur du pelage est présent sous deux allèles, n associé à un pelage noir, et n^+ associé à un pelage agouti. Émettons également l'hypothèse que le gène qui régit la répartition de la couleur est présent sous deux allèles, r^+ associé à un pelage uniformément réparti (non piebald), et r associé à un pelage non uniformément réparti avec des tâches (piebald).

Dans un premier temps, on croise deux races pures de souris, donc homozygotes :

$$\text{Parent 1 } (n^+/n^+ ; r/r) \times \text{Parent 2 } (n/n, r^+/r^+).$$

À l'issue de ce croisement, on obtient une génération F1 de souris de génotype $(n^+/n ; r^+/r)$. Selon l'énoncé, les souris sont $[n^+ ; r^+]$, ce qui suggère que les allèles associés à ce phénotype sont dominants par rapport aux allèles n et r .

On réalise un second croisement (croisement test) de mâles F1, donc de génotype $(n^+/n, r^+/r)$, avec des femelles non agouti piebald, donc de phénotypes associés aux allèles récessifs. Ces femelles sont donc homozygotes et de génotype $(n/n, r/r)$. Émettons l'hypothèse que ces deux gènes sont indépendants.

On a alors le tableau de croisement suivant :

	n^+, r^+	n^+, r	n, r^+	n, r
n, r	$(n^+/n, r^+/r)$	$(n^+/n, r/r)$	$(n/n, r^+/r)$	$(n/n, r/r)$

On est ainsi censé obtenir 25% de souris [non agouti, non piebald], 25% de souris [non agouti, piebald], 25% de souris [agouti, non piebald] et 25% de souris [agouti, piebald]. Ces pourcentages correspondent aux effectifs obtenus selon l'énoncé. Les deux gènes sont donc effectivement indépendants. Ils sont localisés sur des chromosomes qui se répartissent aléatoirement lors de l'anaphase de méiose 1 : c'est le brassage interchromosomique.

Le schéma attendu correspond à la figure 8 de ce chapitre, en remplaçant les noms des allèles par ceux étudiés ici.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

13 Caryotype - Anomalie

Énoncé
p. 27

Lycée Charlemagne, Paris

On souhaite comprendre pourquoi la mère a subi des avortements spontanés, avant de donner naissance à un enfant trisomique, à partir des caryotypes des parents. On sait que le caryotype de la mère est normal. Celui du père, toutefois, présente une anomalie. En effet, un des deux chromosomes 21 s'est transloqué sur un chromosome 14. Comme il n'y a aucun gain, ni perte d'information génétique, cela explique le fait que le père l'ignorait.

Cependant, suite à la méiose, des gamètes anormaux peuvent donc être formés, comme présenté ci-dessous.



Figure 1.25 – Répartitions possibles pour les chromosomes 14 et 21 après la méiose

Dans le premier cas, les chromosomes normaux 14 et 21 sont rassemblés dans le spermatozoïde, le gamète est normal et conduirait à la naissance d'un enfant sain.

Cependant, le deuxième gamète possible ne possède pas de chromosome 21. Après la fécondation avec un ovocyte, la potentielle cellule œuf présenterait alors une monosomie pour le chromosome 21. Or, les monosomies ne sont pas viables chez l'être humain. Ce cas conduirait alors à la mort prématurée de l'embryon, ce qui explique donc les avortements spontanés subits par la mère.

Le troisième gamète voit le rassemblement du chromosome 14-21 et du chromosome 21. Après fécondation, le chromosome 21 sera donc présent en trois exemplaires (dont celui transloqué sur le chromosome 14). Ceci explique donc la trisomie qui touche l'enfant des deux parents.

Enfin, le dernier gamète possède le chromosome 14-21, et pas de chromosome 21 seul partenel. Après fécondation, l'individu sera probablement sain, présentant un chromosome 14-21 paternel, un 14 et un 21 maternels.

L'ORIGINE DU GÉNOTYPE DES INDIVIDUS • CHAP. 1

14 Arbre généalogique

Énoncé
p. 28

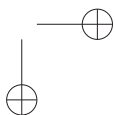
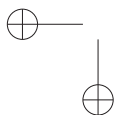
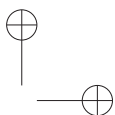
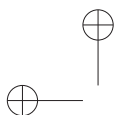
Nouveau programme

- 1 Nous souhaitons comprendre la transmission de cette maladie.
- *Hypothèse 1 : le gène est porté par le chromosome Y.*
Cette hypothèse est impossible car des femmes présentent la maladie.
 - *Hypothèse 2 : le gène est porté par le chromosome X et l'allèle est dominant par rapport à l'allèle sain.*
Nous pouvons écarter cette hypothèse, aucun des grands-parents n'est malade, et l'individu II.4 aurait transmis la maladie à sa fille en lui transmettant son chromosome X.
 - *Hypothèse 3 : le gène est porté par le chromosome X et l'allèle est récessif par rapport à l'allèle sain.*
Cette hypothèse est fausse. En effet, pour que les femmes de la génération II aient été malades, il faut que chaque parent leur ait transmis un chromosome X portant l'allèle associé à la maladie. Ceci indique donc que le grand-père devrait être malade.
 - *Hypothèse 4 : le gène est porté par un autosome et l'allèle est dominant par rapport à l'allèle sain.*
Ceci n'est pas possible car aucun des grands-parents n'est malade.
 - *Hypothèse 5 : le gène est porté par un autosome et l'allèle est récessif par rapport à l'allèle sain.*
Cette hypothèse est possible, les deux grands-parents sont alors hétérozygotes et les malades sont ainsi homozygotes.
- 2 Le père de la dame III.1 est malade, il porte donc deux copies de la mutation associée à la maladie, dont il en a transmis une copie à sa fille. Cette dernière n'est pas malade, elle est donc hétérozygote. Il y a donc une chance sur deux pour qu'elle transmette cet allèle à son futur enfant. Son mari n'est pas malade, il ne porte donc pas deux allèles associés à la maladie. Selon l'énoncé, la probabilité pour qu'il soit hétérozygote est de $1/30$. S'il est hétérozygote, la probabilité qu'il transmette l'allèle causal de la maladie est de $1/2$. Donc la probabilité qu'il soit hétérozygote et qu'il transmette la maladie est de $1/2 \times 1/30 = 1/60$.
- La probabilité pour que leur enfant soit malade est donc de :
- (probabilité que la mère transmette un allèle associé à la maladie)
 $\times$ (probabilité que le père transmette un allèle associé à la maladie)
c'est-à-dire :
- $$\left(1 \times \frac{1}{2}\right) \times \left(\frac{1}{30} \times \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{120}.$$
- Il y a donc un risque sur 120 pour que le futur enfant soit malade.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre

2

La complexification des génomes

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Les transferts horizontaux
3. Échanges génétiques et association permanente : les endosymbioses

1 Introduction

Les différents évènements qui se produisent lors de la méiose et de la fécondation ne suffisent pas à expliquer la totalité de la diversification des êtres vivants. En effet, d'autres mécanismes comme les transferts horizontaux ou les endosymbioses peuvent être à l'origine d'une diversification du vivant. Ces mécanismes reposent, entre autres, sur l'universalité de l'ADN et de sa structure dans le monde vivant. Ainsi, cette propriété permet des échanges d'ADN entre des individus, qu'ils soient, ou non, de la même espèce.

? PROBLÉMATIQUE

En quoi les transferts horizontaux ou les endosymbioses participent-ils à une diversification génétique en dehors des mécanismes liés à la reproduction sexuée ?

2 Les transferts horizontaux

Lors de la reproduction sexuée, du matériel génétique est transmis de manière verticale des parents aux descendants. Cependant, des transferts, appelés *transferts horizontaux*, sont également possibles en dehors de toute filiation, entre individus de la même espèce ou non.

Définition 1 : transfert horizontal

Mécanisme par lequel une portion d'ADN est transmise d'un organisme à un autre sans faire appel à la reproduction sexuée.

? PROBLÉMATIQUE

En quoi les transferts horizontaux sont-ils à l'origine d'une diversification du vivant, et donc de l'évolution des populations et des écosystèmes ?

2.1 Les mécanismes de transferts horizontaux de gènes

Les transferts horizontaux peuvent avoir lieu chez les eubactéries. Le matériel génétique reçu provient d'autres eubactéries, ou de virus. Il existe trois processus majoritaires.

La *conjugaison* correspond à la transmission d'une bactérie à une autre d'un plasmide, c'est-à-dire d'une portion d'ADN cyclique cytoplasmique indépendante du chromosome bactérien. Les plasmides sont porteurs de gènes. Au cours de la conjugaison, la bactérie donneuse réplique le plasmide, en garde un exemplaire et en transfère un à la bactérie receveuse.

Le second mécanisme, la *transduction*, est l'intégration du génome d'un phage, virus infectant une bactérie, au sein de l'ADN de la bactérie hôte. Ce mécanisme permet la synthèse des protéines du virus, en utilisant la machinerie de transcription et de traduction de la bactérie, et donc la multiplication du virus.

Enfin, le dernier mécanisme est la *transformation*. De l'ADN libre dans le milieu, pouvant provenir d'autres bactéries mortes, peut être récupérée par une bactérie et s'intégrer à son génome.

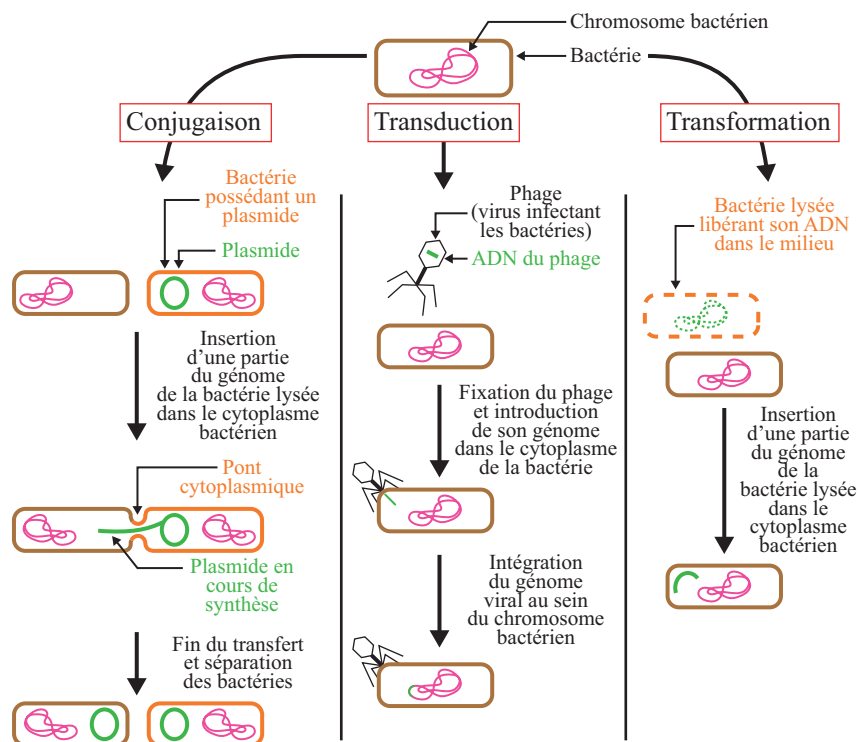


Figure 2.1 – Mécanismes des différents transferts horizontaux

Voir exercice 4 page 49.

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

Il existe également des transferts naturels, où les bactéries (comme celles de notre microbiote intestinal) reçoivent des gènes de résistance aux antibiotiques. Si, dans un premier temps, cela ne présente pas de danger pour l'organisme car ces bactéries ne sont pas pathogènes (ne provoquant pas de maladies), cela peut avoir des conséquences à plus long terme, notamment dans le cadre d'une prise exagérée d'antibiotiques. En effet, après la prise d'antibiotiques, la majorité des bactéries seront éliminées.

En outre, les bactéries possédant un gène de résistance aux antibiotiques survivront et auront la possibilité de le transmettre par transfert horizontal à d'autres bactéries, pouvant être potentiellement pathogènes. La population de bactéries résistantes pourra alors augmenter et rendre le corps moins réceptif aux antibiotiques et donc plus sensible aux infections bactériennes. C'est pourquoi la prise d'antibiotiques est contrôlée, afin d'éviter la propagation de gènes de résistance aux antibiotiques.

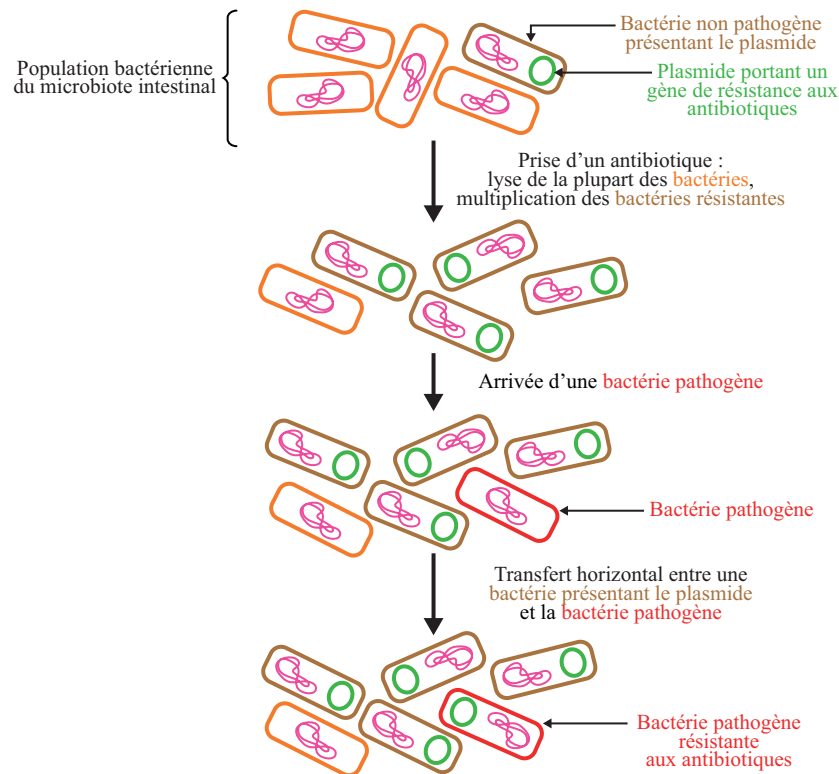


Figure 2.2 – Propagation d'un gène de résistance aux antibiotiques au sein d'une population bactérienne du microbiote intestinal



Voir une vidéo de l'INSERM sur la résistance aux antibiotiques avec 

Voir exercice 5.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

2.2 Les transferts horizontaux à l'échelle de l'histoire du vivant

Les transferts horizontaux de gènes sont des événements assez rares à l'échelle d'un individu. Cependant à l'échelle de l'histoire des espèces, ils ont lieu à de nombreuses reprises. On a ainsi observé des transferts chez des espèces très éloignées phylogénétiquement. Par exemple, il a été démontré que l'ADN humain contient près de 10% de gènes d'origine virale.

Voir exercices 3, 8, 9, 10 et 11.

2.3 L'utilisation de ces mécanismes dans les biotechnologies

Les transferts horizontaux peuvent être utilisés en biotechnologies. En effet, s'ils apportent un avantage aux individus qui les portent, les gènes nouveaux acquis par transfert horizontal peuvent être favorisés par la sélection naturelle et ainsi se répandre chez tous les individus de l'espèce concernée, qui acquiert ainsi un nouveau caractère. C'est pourquoi il est possible de modifier le génome de certaines bactéries afin de pouvoir leur conférer une nouvelle propriété. Ces transferts peuvent également permettre aux chercheurs d'étudier les propriétés d'un gène d'intérêt. Pour réaliser ce transfert, des vecteurs viraux peuvent être utilisés.

Définition 2 : vecteurs viraux

Virus utilisés en biotechnologie et porteurs d'un ou plusieurs gènes d'intérêts, qui peuvent être délivrés à d'autres cellules.

Lorsque l'on cherche à caractériser un gène d'intérêt, les chercheurs transfèrent souvent deux gènes en même temps : le gène d'intérêt et un gène de résistance aux antibiotiques. Les bactéries sont ensuite traitées avec un antibiotique, ainsi, seules celles ayant reçu le gène de résistance (et donc également le gène d'intérêt) survivront, ce qui permettra d'obtenir des résultats fiables.

► POUR ALLER PLUS LOIN

La thérapie génique est une application des transferts horizontaux qui fait aujourd'hui débat. Elle correspond à l'isolation de cellules d'un patient souffrant d'une maladie génétique pour remplacer l'allèle muté par un allèle sain, avant de lui réinjecter les cellules modifiées génétiquement.

Voir exercice 6.

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

À RETENIR

Le génome de nombreux organismes comporte des gènes qui ont été hérités à l'occasion de transferts entre espèces. Ces transferts sont dits horizontaux, par opposition aux transferts verticaux liés à la reproduction sexuée. Ils se produisent entre individus, qui n'appartiennent pas forcément à la même espèce et touchent généralement les eubactéries. Ils peuvent se faire selon différents mécanismes (conjugaison, transduction et transformation). En apportant de nouveaux éléments à l'espèce receveuse, ils contribuent à une diversification du vivant. Les propriétés de ces transferts sont également utilisées par les biotechnologies et doivent être prises en considération dans les pratiques de santé humaine (propagation des résistances aux antibiotiques).

3 Échanges génétiques et association permanente : les endosymbioses

L'endosymbiose est un autre processus à l'origine d'une diversification génétique sans recours à la reproduction sexuée.

Définition 3 : endosymbiose

Symbiose (association à bénéfice réciproque et durable entre deux organismes d'espèces différentes) au sein de laquelle un organisme se retrouve à l'intérieur de l'autre organisme.

PROBLÉMATIQUE

En quoi la théorie endosymbiotique est-elle un mécanisme participant à la diversification du vivant ?

Selon la théorie endosymbiotique, la cellule eucaryote se serait formée par intégration de cellules procaryotes autonomes à l'origine des chloroplastes (pour les cellules végétales) et des mitochondries (présentes dans les cellules animales et végétales)

La théorie endosymbiotique suggère que la mitochondrie et le chloroplaste sont tous les deux le résultat d'un processus similaire. Un organisme eucaryote unicellulaire aurait phagocyté une eubactérie, c'est-à-dire l'aurait ingérée afin de la digérer, à visée nutritive. Toutefois, la digestion n'aurait pas eu lieu, l'eubactérie ingérée serait restée au sein du cytoplasme de l'organisme eucaryote, et se serait divisée en même temps que son hôte, se transmettant donc aux descendants. D'ailleurs, mitochondries et chloroplastes se divisent indépendamment du noyau, appuyant l'hypothèse d'une très probable origine différente.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

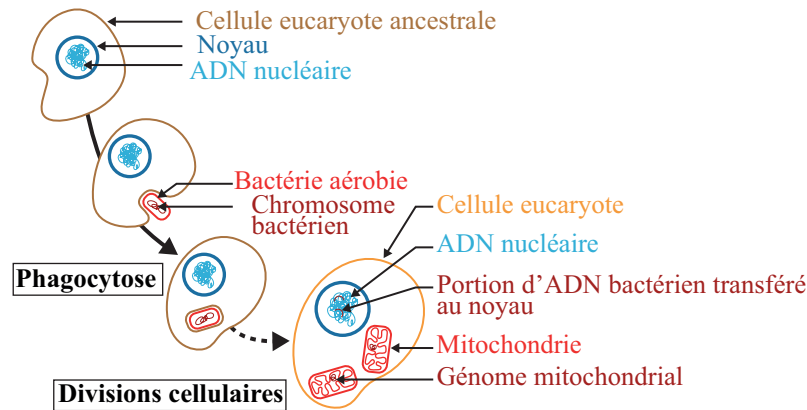


Figure 2.3 – Théorie de l'endosymbiose et naissance d'organites : exemple de la mitochondrie

La connaissance des caractéristiques des mitochondries et des chloroplastes ont permis d'émettre des hypothèses concernant les eubactéries phagocytées. L'ancêtre des mitochondries était probablement *une eubactérie aérobie*, c'est-à-dire présentant un métabolisme basé sur l'utilisation du dioxygène, tout comme le sont les mitochondries actuelles des cellules eucaryotes. Celui des chloroplastes était probablement un ancêtre *des cyanobactéries* que l'on rencontre aujourd'hui, qui sont des eubactéries capables de réaliser la photosynthèse.

De plus, les mitochondries et les chloroplastes possèdent un génome hérité des eubactéries dont ils descendent. Au cours de l'évolution, des modifications de ces génomes ont eu lieu : ils ont régressé et une partie a été intégrée au génome nucléaire. Aujourd'hui, tous deux possèdent un génome circulaire, codant une partie des protéines dont ils ont besoin pour leur fonctionnement, le reste étant codé par le génome nucléaire. Ce sont *des organites semi-autonomes*.

Définition 4 : organe semi-autonome

Organite possédant de l'ADN, capable d'exprimer une partie des protéines nécessaires à son fonctionnement.

Les événements d'endosymbioses ont donc donné aux cellules qui en sont issues des caractéristiques nouvelles concernant notamment les voies métaboliques dont elles dépendent. L'endosymbiose fut un véritable moteur de l'évolution, permettant l'expansion des eucaryotes. Elle explique notamment le fait que les végétaux, organismes eucaryotes présentant des chloroplastes, sont autotrophes au carbone.

Définition 5 : autotrophie au carbone

Capacité pour un organisme de produire sa propre matière organique, par exemple *via* la photosynthèse, à partir de lumière et de dioxyde de carbone. L'autotrophie est le contraire de l'hétérotrophie.

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

Une majeure partie des réseaux trophiques dépend de cette matière organique formée. Elle est en effet consommée par les organismes hétérotrophes, comme l'être humain. De plus, la présence de mitochondries au sein des cellules a permis la réalisation de nouvelles voies métaboliques efficaces comme *la respiration cellulaire*.

Ces deux organites, issus d'anciens organismes procaryotes, contiennent donc un matériel génétique qui leur est spécifique.

Exemple : il existe des maladies mitochondriales, portées par des gènes présents dans les mitochondries.

Lors des divisions cellulaires, ces deux organites cytoplasmiques sont transmis à la descendance tout comme les gènes contenus dans les organites : c'est *l'hérédité cytoplasmique*. Cette hérédité ne suit donc pas les mêmes lois que celles qui affectent le génome nucléaire.

Exemple : chez les Mammifères, c'est la femelle qui fournit les mitochondries contenues dans l'ovocyte. Toutes les mitochondries d'un individu proviennent donc de la division des mitochondries maternelles.

Voir exercices 7 et 10.

➡ À RETENIR

Les endosymbioses transmises entre générations sont fréquentes dans l'histoire des eucaryotes. Elles jouent un rôle important dans leur évolution. En effet, ces processus sont à l'origine d'organites comme les mitochondries ou les chloroplastes au sein des cellules eucaryotes. Ces organites contiennent un ADN qui leur est propre. Ainsi, ces mécanismes illustrent l'exemple d'une symbiose ancestrale à l'origine d'une association de génomes.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 **QCM** Vérification de connaissances

5 min

Corrigé
p. 60

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1 La conjugaison permet :
 - a la transmission de gènes viraux à une bactérie ;
 - b la transmission d'un plasmide d'une bactérie à une autre, seulement si elles appartiennent à la même espèce ;
 - c l'acquisition de portions d'ADN provenant d'une bactérie morte ;
 - d la transmission d'un plasmide d'une bactérie à une autre, le plasmide pouvant porter des gènes de résistance aux antibiotiques.
- 2 La mitochondrie :
 - a descend d'une cyanobactérie, phagocytée par une cellule eucaryote ;
 - b a permis aux cellules eucaryotes d'acquérir de nouvelles voies métaboliques ;
 - c descend d'une bactérie anaérobie, phagocytée par une cellule eucaryote ;
 - d est l'unique organite de toutes les cellules eucaryotes dont l'origine est endosymbiotique ;
 - e est uniquement transmise par le père.

2 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 60

Qui suis-je ?

- 1 Type de compartiment d'une cellule eucaryote contenant son propre génome.
- 2 Suite d'évènements au cours desquels un génome viral est intégré au sein du génome d'une bactérie hôte.
- 3 Théorie selon laquelle la mitochondrie et le chloroplaste descendraient d'eubactéries phagocytées par une cellule eucaryote, sans être digérés.

3 Transfert horizontal - Phylogénies



5 min

Corrigé
p. 60

Nouveau programme

Afin d'étudier les liens de parenté entre différentes espèces, les chercheurs utilisent les apports de la phylogénie moléculaire. Cette méthode repose sur la comparaison de séquences nucléotidiques : plus les séquences possèdent des similitudes, plus le degré de parenté est important.

À partir de vos connaissances, rédigez un paragraphe argumenté où vous discuterez si l'utilisation de cette méthode est pertinente pour établir des liens de parenté des eubactéries.

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

4 L'expérience de Griffith



10 min

Corrigé
p. 60

Nouveau programme

Bien avant la découverte de la structure en double hélice de l'ADN par Watson et Crick en 1953, de nombreux scientifiques se sont posés la question de la nature du support de l'information génétique.

L'un d'eux, Griffith (1877-1941), étudia la virulence de pneumocoques, bactéries pouvant causer des pneumonies chez l'Homme. Il avait remarqué que deux souches de pneumocoques existaient, la souche rugueuse (souche R), et la souche lisse (souche S). Il injecta l'une de ces souches à des souris, et observa que celles injectées avec la souche lisse développaient des symptômes avant de mourir, alors que la souche rugueuse ne semblait pas avoir d'effets sur les souris.

Il décida alors de traiter les souris avec des pneumocoques de la souche lisse inactivées (bactéries tuées par la chaleur), et n'observa aucun effet. Enfin, il co-injecta des bactéries de la souche lisse inactivées, et des bactéries de la souche rugueuse. Les souris développèrent des symptômes puis moururent. Griffith fut de plus capable d'isoler des pneumocoques vivants des deux souches du sang des souris.

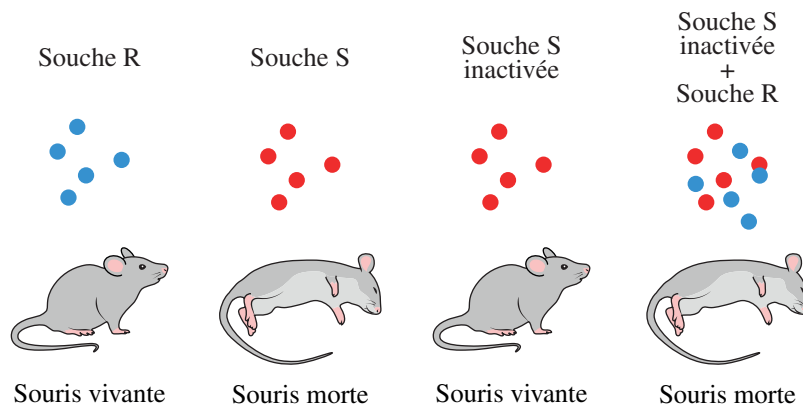


Figure 2.4 – Théorie de l'endosymbiose et naissance d'organites ; l'exemple de la mitochondrie.

Selon vous, quelles conclusions Griffith a-t-il pu tirer de cette expérience ?

5 Résistance aux antibiotiques



15 min

Corrigé
p. 61

Nouveau programme

« Les antibiotiques, c'est pas automatique » peut-on entendre dans des spots publicitaires. En effet, aujourd'hui, la résistance aux antibiotiques est une des préoccupations majeures en terme de santé publique.

Elle semble se transmettre rapidement au sein des populations bactériennes,

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

ce qui est assez inattendu, car les bactéries ne sont pas capables de reproduction sexuée.

Pour tenter de comprendre comment des transferts de gènes peuvent s'effectuer au sein de populations bactériennes, des chercheurs ont mis en place les expériences présentées ci-dessous.

Deux souches bactériennes mutantes ont été étudiées, la première étant résistante à un antibiotique A et la seconde, à un antibiotique B. Des bactéries ont été étalées sur des boîtes de Pétri contenant ces deux antibiotiques selon les modalités présentées sur le schéma suivant :

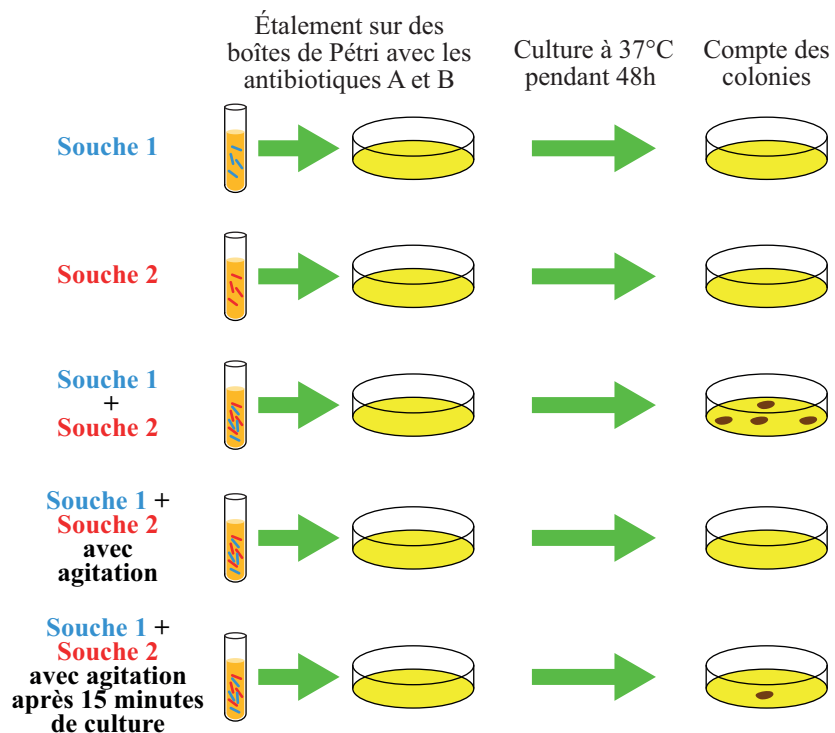


Figure 2.5 – Plan expérimental et résultats obtenus

À partir de cette expérience, expliquez les modalités de transfert de gènes de résistance entre souches bactériennes.

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

6 À vous les chercheurs !



15 min

Corrigé
p. 62

Nouveau programme

Le diabète de type 1 est une maladie touchant principalement des jeunes patients. Elle est caractérisée par une carence en insuline, hormone responsable de la régulation de la glycémie. Les patients sont traités par injection d'insuline, qu'il est donc nécessaire de produire en laboratoire. En détournant le principe de la transduction bactérienne, proposez un protocole permettant la production d'insuline.

Vous disposerez de phages dont vous aurez préalablement modifié le génome et de bactéries (cibles des phages), dont la croissance est optimale à 37 degrés. On notera que pour isoler uniquement des bactéries à partir d'une culture de bactéries et de virus, on peut réaliser une centrifugation (rotation à très grande vitesse faisant tomber les éléments les plus lourds au fond d'un tube, les éléments les plus légers restant en suspension).

7 Unicité de l'endosymbiose



15 min

Corrigé
p. 62

Nouveau programme

Les euglènes sont des organismes unicellulaires eucaryotes souvent présentes dans les étendues d'eau douce. Dotée de deux flagelles, l'euglène est capable de se déplacer dans l'eau, mais également de percevoir la lumière à l'aide d'un complexe moléculaire, appelé le stigma. Les euglènes se multiplient par reproduction asexuée, en se divisant longitudinalement. Contrairement à d'autres groupes comme les Straménopiles, les Avéolobiontes ou les Rhizariens, les euglènes possèdent des chloroplastes.

Document 1

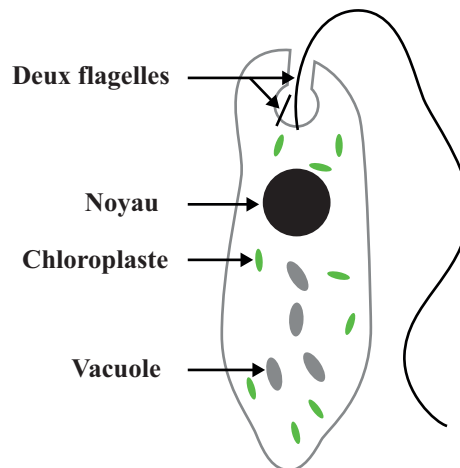


Figure 2.6 – Croquis d'une euglène

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Document 2

Ci-dessous est partiellement représenté une partie de l'arbre phylogénétique des eucaryotes, les euglènes appartenant aux Excavobiontes.

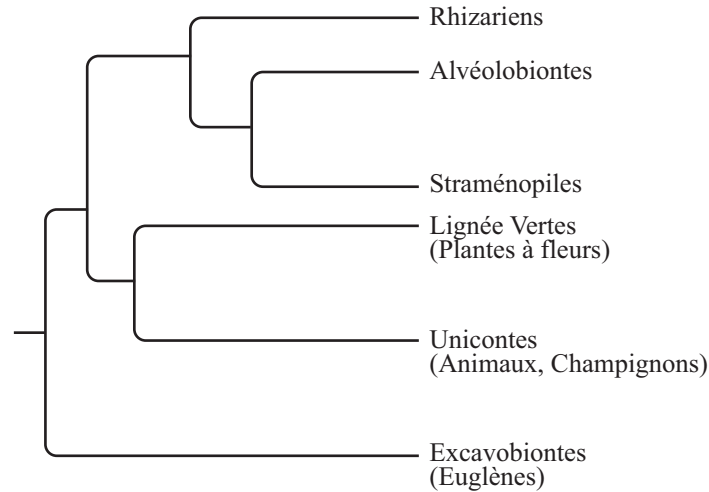


Figure 2.7 – Représentation partielle de l'arbre phylogénétique des eucaryotes

Déduire des deux documents ci-dessus et de vos connaissances si la formation des chloroplastes fut un événement unique au cours de l'évolution.

8 Transfert de gènes



20 min

Corrigé
p. 63

Nouveau programme

On s'intéresse ici à la porphyranase, une enzyme de *Zobellia galactanivorans*, une bactérie qui est capable de dégrader certaines algues marines (algues nori). Des scientifiques ont démontré que les Japonais, qui se nourrissent d'algue nori depuis des centaines d'années, sont également capables de la dégrader, alors que les Nord-Américains, par exemple, en sont incapables. À l'aide des deux documents ci-dessous, vous discuterez de l'origine de cette faculté, propre aux Japonais.

Document 1

*Qu'ont en commun *Zobellia galactanivorans*, petite bactérie des fonds marins, et les Japonais ? La capacité de dégrader un sucre spécifique de certaines algues marines, le porphyrane... et leur goût pour ces algues. Si la bactérie utilise le porphyrane des algues comme source de carbone, les Japonais consomment en moyenne 14,2 grammes par jour de nori, algue rouge traditionnellement utilisée dans la préparation des sushis makis.*

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

*En recherchant les molécules responsables de la dégradation du porphyrane chez *Z. galactanivorans*, des biologistes du CNRS et de l'Université Pierre et Marie Curie basés à la station biologique de Roscoff ont mis en évidence chez ces bactéries une nouvelle famille d'enzymes, les porphyranases, qui dégradent spécifiquement ce sucre. (...)*

Au VIII^e siècle, les algues nori avaient une grande importance culturelle au Japon, servant non seulement de nourriture, mais aussi d'impôt régional. Dégustées crues, elles ont probablement transmis aux Japonais les microbes marins qu'elles portaient.

Source : Pour la Science - Avril 2010.

Document 2

Des flores intestinales de 5 Japonais et de 18 Nord-Américains ont été isolées. La séquence du gène de la porphyranase y a été recherchée.

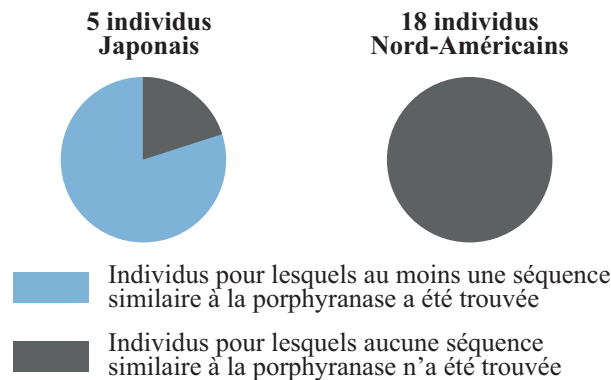


Figure 2.8 – Recherche de séquences similaires à la porphyranase dans la flore intestinale de 5 individus Japonais et de 18 individus Nord-Américains

Il faut noter qu'aucune *Zobellia galactanivorans* n'a été décelée dans aucune des flores intestinales étudiées.

9 Transfert horizontal - Phylogénies



10 min

Corrigé
p. 63

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

La découverte des transferts horizontaux de gènes vient « brouiller les pistes » en ce qui concerne les phylogénies (relations de parenté) établies entre les espèces à partir de la comparaison de leurs séquences moléculaires.

On s'intéresse ici à la contradiction entre les données rapportées par différentes comparaisons moléculaires.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

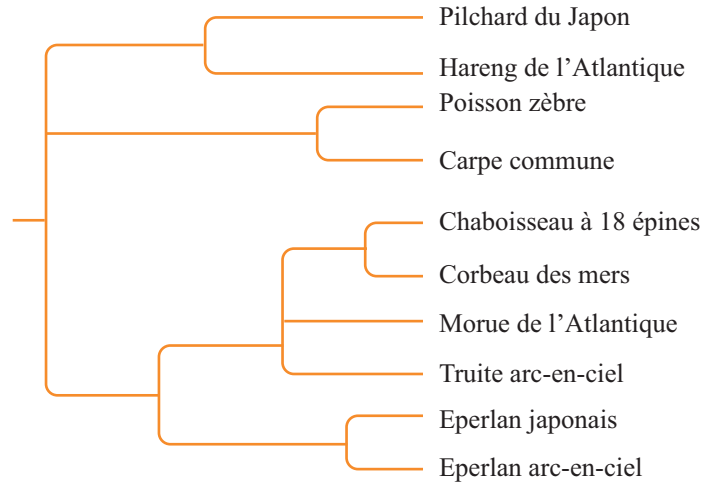


Figure 2.9 – Arbre de parenté déduit de la comparaison de l'ARN16S de différentes espèces

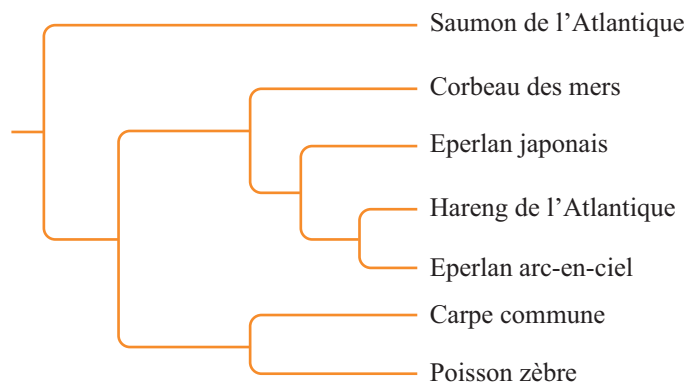


Figure 2.10 – Arbre de parenté déduit de la comparaison du gène de la lectine II-AFP

- 1 Mettez en évidence la contradiction entre les deux arbres.
- 2 La lectine II-AFP (« antifreeze protein ») est présente chez certains poissons de mer. Son rôle physiologique est de protéger les fluides corporels contre le gel. Les scientifiques supposent que le gène de la lectine II-AFP, initialement présent chez le Corbeau des mers, a été ensuite transmis horizontalement à d'autres espèces. Expliquez en quoi l'hypothèse des scientifiques permettrait d'expliquer la contradiction entre les deux arbres.

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

10 Limites de la théorie



20 min

Corrigé
p. 65

Nouveau programme

Dans cet exercice, nous cherchons à comprendre l'origine de la présence des mitochondries dans une cellule. La théorie endosymbiotique suggère qu'elles seraient issues d'une phagocytose (sans digestion) d'eubactéries par une cellule eucaryote, cependant l'étude de bactéries *M. Mitochondrii* pourrait remettre en question cette théorie.

Consigne : à partir de l'analyse des différents documents, montrez en quoi l'étude de *M. Mitochondrii* a remis en question la théorie endosymbiotique.

Document 1 : le génome de *M. Mitochondrii*

De récentes études ont montré que le génome de *M. Mitochondrii* était assez proche de celui des mitochondries des cellules eucaryotes. De plus, les scientifiques ont mis en évidence la présence de 26 gènes codant des protéines qui participent à la formation de flagelles. Les flagelles sont des filaments formés de protéines, jouant un rôle dans la mobilité des bactéries. Ces gènes sont également présents chez d'autres bactéries appelées alpha-protéobactéries, mais pas chez les espèces proches des mitochondries.

Document 2 : arbres phylogénétiques des alpha-protéobactéries

Ci-dessous sont représentés deux arbres phylogénétiques des alpha-protéobactéries, groupe d'eubactéries ayant un ancêtre commun avec les mitochondries. Le premier correspond à l'arbre autrefois admis, le second, en prenant en compte *M. mitochondrii*.

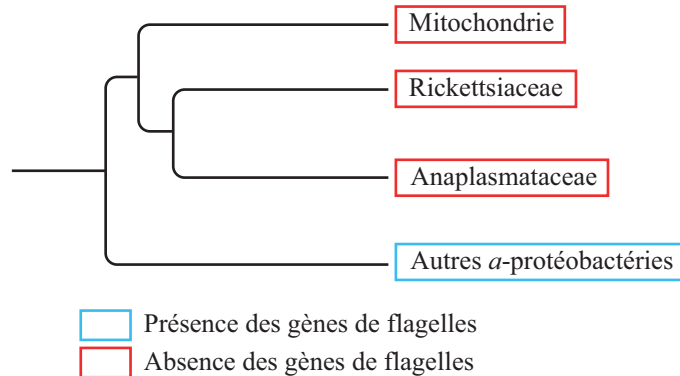


Figure 2.11 – Arbre phylogénétique des alpha-protéobactéries et des mitochondries sans tenir compte de *M. mitochondrii*. La présence ou l'absence de gènes permettant la formation de flagelles est indiquée.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

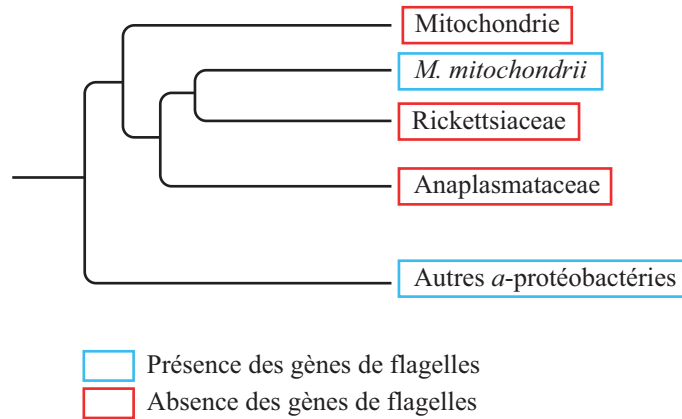


Figure 2.12 – Arbre phylogénétique des alpha-protéobactéries et des mitochondries en tenant compte de *M. mitochondrii*. La présence ou l'absence de gènes permettant la formation de flagelles est indiquée.

Document 3 : le rôle du flagelle

Les flagelles permettent aux bactéries de se mouvoir. Ils sont surtout présents chez des alpha-protéobactéries prédatrices et parasites. Les flagelles permettent d'augmenter les chances de rencontre avec les proies ou les futures cellules hôtes.

Bactérie à flagelle

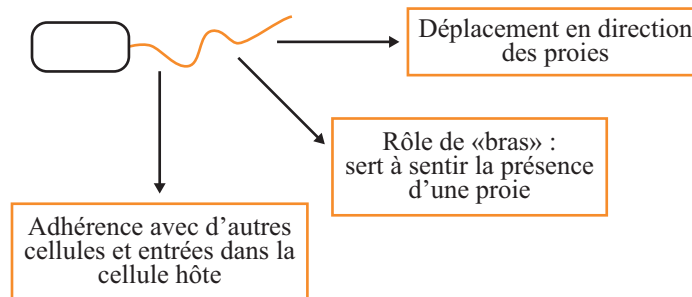


Figure 2.13 – Rôles des flagelles chez les alpha-protéobactéries prédatrices et parasites

En quoi l'étude de *M. mitochondrii* a remis en question les modalités de rencontre entre la cellule eucaryote et l'eubactérie ancêtre des mitochondries ?

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

11 Transfert de gènes



25 min

Corrigé
p. 67

Nouveau programme



Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

L'Homme produit de nombreuses protéines, dont la syncytine, impliquée dans la formation du placenta. Des chercheurs se sont intéressés à l'origine de ce gène.

À partir des différents documents, déterminez le rôle de la syncytine lors de la formation du placenta humain et son origine.

Document 1

La syncytine est une protéine exprimée chez l'humain, mais également chez les autres espèces de grands singes mis à part le gibbon.

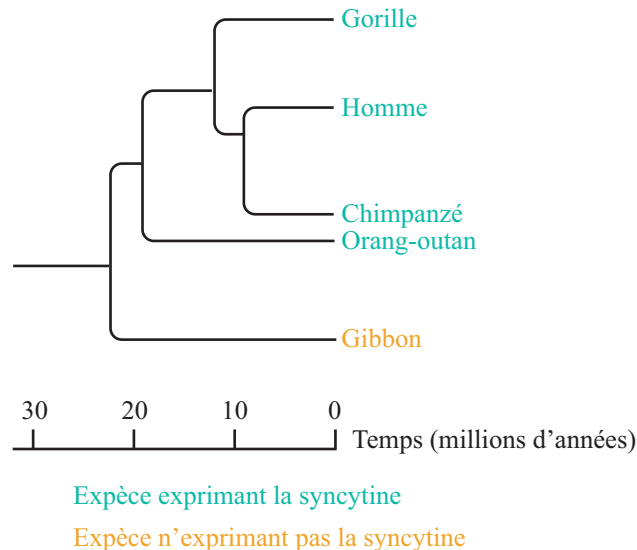


Figure 2.14 – Arbre phylogénétique des grands singes. Les espèces exprimant la protéine syncytine-1 sont indiquées.

Document 2

En laboratoire, il a été possible de séquencer ce gène, ainsi que les régions l'entourant. On remarque la présence de séquences LTR et du gène ENV, inattendus dans le génome humain. Ils sont d'habitude rencontrés dans des génomes de virus, comme le rétrovirus endogène humain W (HERV-W). Le génome de ce dernier est également représenté et est constitué de quatre gènes entourés de séquences LTR.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Le rétrovirus endogène humain W est un rétrovirus à enveloppe. Il est en effet entouré d'une membrane qui fusionnera dans un premier temps avec la membrane de la cellule cible.

Le génome du virus sera alors libéré dans le cytoplasme de la cellule, et après une suite d'évènements, s'intégrera dans le génome de la cellule hôte.

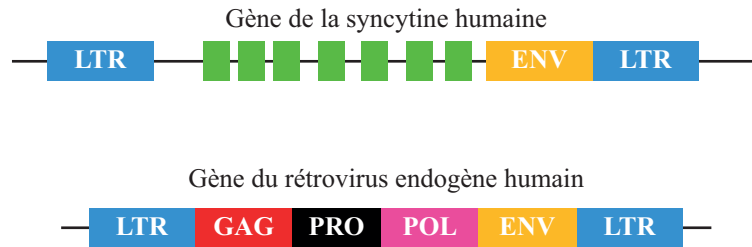
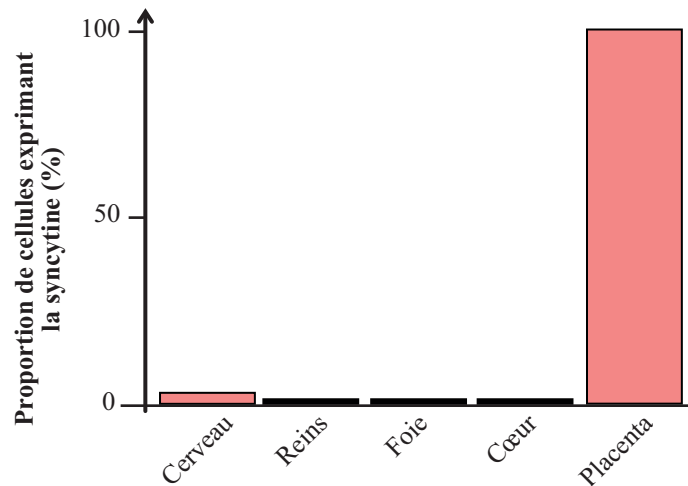


Figure 2.15 – Organisation du gène de la syncytine humaine (les exons sont représentés en vert) et du génome du rétrovirus endogène humain W (HERV-W).

Document 3

Chez l'Humain, l'expression de la syncytine a été analysée. La proportion de cellules exprimant ce gène est représentée pour chaque organe étudié dans la figure suivante :



LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

Document 4

Lors de la grossesse, le mécanisme de formation du placenta est singulier. En effet, ce sont des cellules de l'embryon qui fusionnent. En résulte la formation d'une structure avec plusieurs noyaux, qui donnera le placenta.

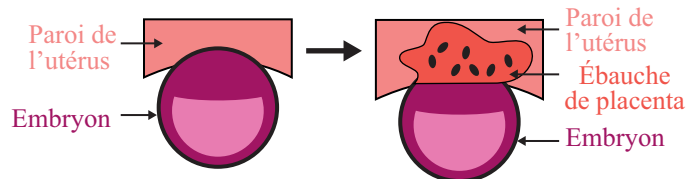


Figure 2.16 – Mécanisme de formation du placenta chez l'humain.

Document 5

Le mécanisme d'entrée dans les deux figures suivantes du génome du rétrovirus dans le cytoplasme de la cellule cible est présenté.

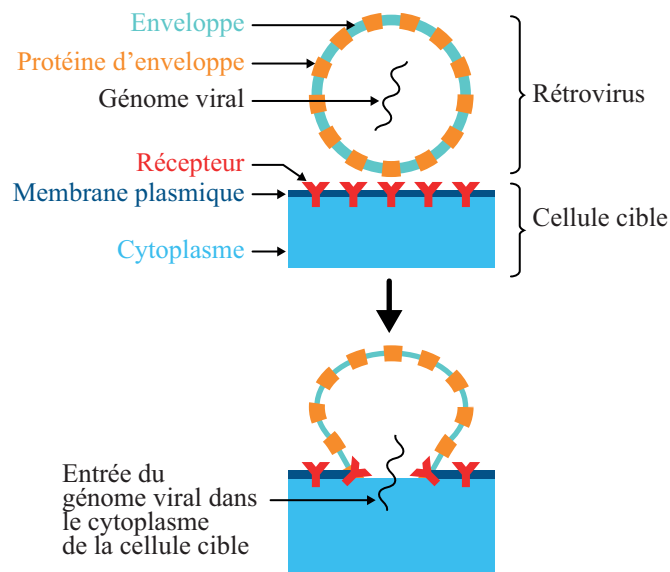


Figure 2.17 – Mécanisme d'entrée du génome d'un rétrovirus dans une cellule cible.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Vérification de connaissances

→ Énoncé
p. 48

- 1 Réponse **d**.
- 2 Réponse **b**.

2 Vérification des connaissances

→ Énoncé
p. 48

- 1 Un organe semi-autonome.
- 2 La transduction.
- 3 La théorie endosymbiotique.

3 Transfert horizontal - Phylogénies

→ Énoncé
p. 48

Nouveau programme

Nous savons qu'il existe de nombreux transferts horizontaux chez les eubactéries. Ces transferts correspondent à des échanges de portions d'ADN entre organismes pouvant appartenir à des espèces différentes. Ainsi, il est courant d'observer des portions supplémentaires d'ADN provenant d'espèces différentes. Pour cette raison, observer des similitudes dans les séquences nucléotidiques peut s'expliquer par ces transferts horizontaux de gènes et pas forcément par un degré de parenté important.

4 L'expérience de Griffith

→ Énoncé
p. 49

Nouveau programme

⚠ ATTENTION

Il est expliqué dans l'énoncé que la nature de l'ADN n'était pas connue à l'époque de Griffith. On vous demande d'imaginer les conclusions de Griffith. Il faut donc éviter les anachronismes, et décrire un mécanisme précis impliquant l'ADN.

En injectant la souche R à des souris, il n'y a aucun symptôme, aucune souris ne meurt. La souche R n'est donc pas virulente. Le contraire est observé pour la souche S, qui l'est. On peut donc émettre l'hypothèse que les pneumocoques de la souche S présentent un facteur de virulence, que n'ont pas les bactéries de la souche R.

Suite à l'inactivation des pneumocoques de la souche S et à leur injection, aucune souris ne meurt. On en déduit donc que, en plus du facteur de virulence suggéré précédemment, les pneumocoques ont besoin d'être vivants pour être virulents.

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

La co-injection de pneumocoques de la souche S inactivés et de pneumocoques de la souche R entraîne la mort des souris. La présence de pneumocoques de la souche S vivants dans le sang des souris nous suggère donc que ce sont des pneumocoques de la souche R non virulents, qui se sont "transformés" en pneumocoques virulents de la souche S. Ce facteur de virulence aurait été acquis à partir des pneumocoques inactivés de la souche S.

Ce « principe de transformation », suggéré par Griffith, a ainsi été mis en évidence alors que le support de l'information génétique n'était pas connu.

5 Résistance aux antibiotiques

Énoncé
p. 49

Nouveau programme

On souhaite étudier les transferts de gènes à l'origine de la propagation de la résistance aux antibiotiques chez les bactéries.

Pour ce faire, deux souches bactériennes, la première résistante à un antibiotique A, et la seconde, à un antibiotique B, sont étalées seules sur une boîte de Pétri dont le milieu contient les deux antibiotiques. Après 48 heures à 37°C, ni la souche 1, ni la souche 2 n'ont formé de colonies visibles. Ce résultat était attendu, étant donné que la souche 1 (respectivement la souche 2) n'est pas résistante à l'antibiotique B (respectivement l'antibiotique A).

Cependant, lorsque les deux souches bactériennes sont mélangées puis mises en culture, des colonies sont visibles après deux jours de culture à 37°C. Des bactéries résistantes aux deux antibiotiques sont donc présentes dans ces boîtes de Pétri. Des transferts de gènes de résistance aux antibiotiques ont donc probablement eu lieu entre les deux souches bactériennes, par conjugaison.

En revanche, si le mélange des deux souches subit une agitation lors du mélange avant l'étalement, plus aucune colonie n'est présente après deux jours. Deux hypothèses peuvent être formulées. L'agitation peut avoir empêché les transferts de gènes. Elle peut également avoir empêché les bactéries de se multiplier, possiblement en les tuant.

Pour choisir entre ces deux hypothèses, les deux souches de bactéries sont mélangées, laissées 15 minutes puis soumises à une agitation, avant d'être étalées. Le fait de les laisser 15 minutes leur laisse donc le temps de réaliser des transferts génétiques, avant l'agitation. Dans ce cas, en fin d'expérience, une colonie est visible, prouvant donc que l'agitation en elle-même n'empêche pas les bactéries de se multiplier, mais bel et bien de réaliser des conjugaisons. Pour expliquer ce point, on peut suggérer que les transferts entre bactéries nécessitent l'établissement d'un lien physique, lien qui ne peut être mis en place à cause des mouvements si les bactéries subissent une agitation.

Ainsi, les transferts horizontaux permettent le transfert de gènes de résistance aux antibiotiques au sein de populations bactériennes. Cette conjugaison nécessite probablement un lien physique entre les deux bactéries, lien qui ne peut s'effectuer en présence d'une agitation.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

6 À vous les chercheurs !

Énoncé
p. 51

Nouveau programme

Tout d'abord, il convient de construire le génome du phage, qui sera intégré au génome des bactéries. Bien évidemment, il faut que ce génome comporte le gène de l'insuline. De plus, il faut ajouter un moyen de sélectionner les bactéries ayant reçu l'ADN viral. Souvent, on ajoute donc un gène de résistance à un antibiotique.

Ces phages acquis, on les met en présence des bactéries pendant un certain temps afin de permettre l'introduction du génome viral au sein des bactéries. Puis, la suspension est centrifugée. Elle subit une rotation à très grande vitesse, permettant de récupérer uniquement les bactéries, plus lourdes, dans le culot au fond du tube. Les phages resteront dans le surnageant.

Les bactéries isolées sont mises en culture à 37 degrés afin qu'elles commencent à produire de l'insuline. On ajoute au milieu de culture l'antibiotique choisi. Ceci permettra de tuer toutes les bactéries n'ayant pas reçu d'ADN des phages, sélectionnant donc les bactéries productrices d'insuline. On suit la croissance bactérienne et après un certain temps, on peut purifier l'insuline produite.

7 Unicité de l'endosymbiose

Énoncé
p. 51

Nouveau programme

On observe sur le premier document que les euglènes présentent des chloroplastes, qui leur permettent de réaliser la photosynthèse. La théorie endosymbiotique nous suggère donc que ces derniers descendent probablement d'une cellule eucaryote qui aurait phagocyté une ancêtre des Cyanobactéries, sans le digérer.

On sait que les euglènes ne sont pas les seuls organismes possédant des chloroplastes. Les plantes à fleurs, par exemple, en sont dotées. Selon le second document, les plantes à fleurs appartiennent à la Lignée Verte et les euglènes, aux Excavobiontes. Si l'endosymbiose à l'origine des chloroplastes ne s'était déroulée qu'une seule fois, les plantes à fleurs et les euglènes auraient un ancêtre commun ayant, lui aussi, des chloroplastes. Or, selon l'arbre du vivant, cet ancêtre commun est également partagé par les Stramenopiles, les Alvéolobiontes, les Rhizariens et les Unicomtes, qui sont dépourvus de chloroplastes. Cela indiquerait que les chloroplastes auraient disparu lors de la formation de ces groupes, ce qui est peu probable, vue la quantité d'évènements nécessaires.

Ainsi, au vu de ces différentes observations, nous pouvons établir que l'endosymbiose s'est déroulée à plusieurs reprises : lors de l'apparition de la lignée verte avec intégration des chloroplastes dans les cellules chlorophylliennes des plantes à fleurs et pour les euglènes appartenant à une autre lignée. Ainsi, il ne s'agit pas d'un évènement unique au cours de l'évolution.

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

8 Transfert de gènes

Énoncé
p. 52

Nouveau programme

On souhaite comprendre l'origine de la faculté des Japonais à dégrader les algues nori.

Le document 1 nous apprend qu'une bactérie marine, *Zobellia galactanivorans*, exprime la porphyranase. Cette enzyme jusqu'à lors inconnue, permet de dégrader certains sucres des algues nori. Il est également discuté que les algues nori, sur lesquelles sont situées des bactéries *Zobellia galactanivorans*, sont depuis le VIII^e siècle mangées crues par les Japonais. Il est donc possible de suggérer que des *Zobellia galactanivorans* sont entrées en contact avec le tube digestif de Japonais, et ont, d'une manière ou d'une autre, transmis le gène de la porphyranase.

Dans un second temps, dans le document 2, des flores intestinales de Japonais (capables de dégrader les algues nori) et de Nord-Américains (qui en sont incapables) sont isolées. Les scientifiques ont tenter d'y mettre en évidence des séquences du gène de la porphyranase. Alors qu'aucun des 18 Nord-Américains testés ne présente cette séquence, le gène de la porphyranase a été trouvée dans la flore intestinale de 4 des 5 Japonais. Ces derniers sont donc probablement capables de dégrader les algues nori grâce à leur flore intestinale. Or, il nous est indiqué qu'aucune *Zobellia galactanivorans* n'a été décelée dans aucune des flores intestinales étudiées. Ceci suggère que ce sont d'autres bactéries qui expriment cette enzyme.

Alors que la porphyranase semble être spécifique de *Zobellia galactanivorans*, comment expliquer que d'autres bactéries expriment cette enzyme ? On peut émettre l'hypothèse que suite à la consommation d'algues nori crues, des *Zobellia galactanivorans* ont également été ingérées. Dans la flore intestinale, des transferts horizontaux ont eu lieu, avec transfert du gène de la porphyranase à d'autres bactéries. À long terme, les *Zobellia galactanivorans* ont été éliminées, mais le gène de la porphyranase a été conservée au cours des générations bactériennes par la flore intestinale, expliquant que les Japonais sont capables de dégrader les algues nori.

9 Transfert horizontal - Phylogénies

Énoncé
p. 53

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

- 1 Deux contradictions existent dans ces arbres de parenté. Tout d'abord, on observe la présence d'espèces présentes dans un seul des deux arbres (le Pilchard du Japon, le Chaboisseau à 18 épines, la Morue de l'Atlantique, la Truite arc-en-ciel et le Saumon de l'Atlantique).

Pour faciliter la comparaison entre les espèces partagées par les deux arbres, il est possible de tracer les arbres en les prenant seules en compte.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

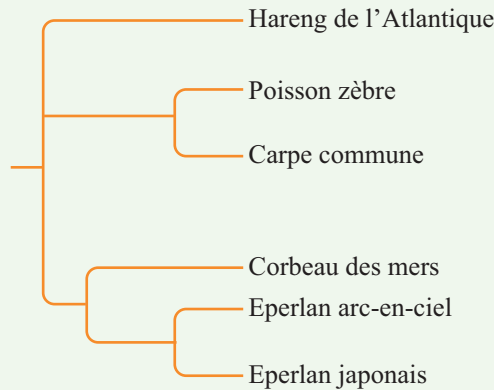


Figure 2.18 – Arbre de parenté déduit de la comparaison de l'ARN16S des six espèces d'intérêt

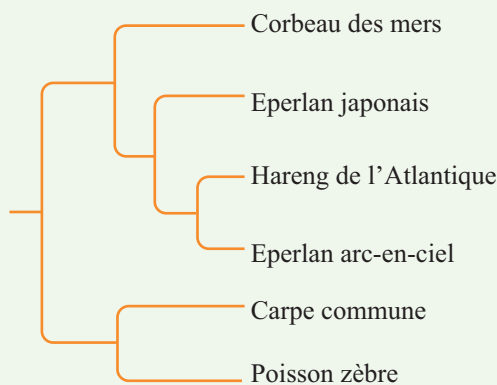


Figure 2.19 – Arbre de parenté déduit de la comparaison du gène de la lectine II-AFP des six espèces d'intérêt

La comparaison des arbres nous indique que le Hareng de l'Atlantique n'est pas localisé de la même manière pour les deux gènes. À partir de l'ARN16S, cette espèce est située à distance des autres espèces. À partir du gène de la lectine II-AFP, toutefois, le Hareng de l'Atlantique s'insère entre les deux espèces d'Eperlans et est très proche de l'Eperlan arc-en-ciel. Une contradiction existe donc entre les deux arbres.

- 2 Selon les chercheurs, le gène de la lectine II-AFP était initialement présent chez le Corbeau des mers, et a ensuite été transmis horizontalement à d'autres espèces. La construction d'un arbre de parenté en utilisant ce gène permettrait donc de retracer l'histoire des transferts horizontaux, et pas celle des espèces. Ceci explique donc les contradictions entre les deux arbres de parenté.

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

10 Limites de la théorie

Énoncé
p. 55

Nouveau programme

La question qui est tout d'abord posée est celle de la présence ou non d'un flagelle chez l'ancêtre des mitochondries. Avant la connaissance du génome de *M. mitochondrii*, la réponse était supposément négative.

En effet, l'ancêtre commun des alpha-protéobactéries aurait donné deux groupes, le premier, contenant l'ancêtre des mitochondries, sans flagelle et le second, avec.

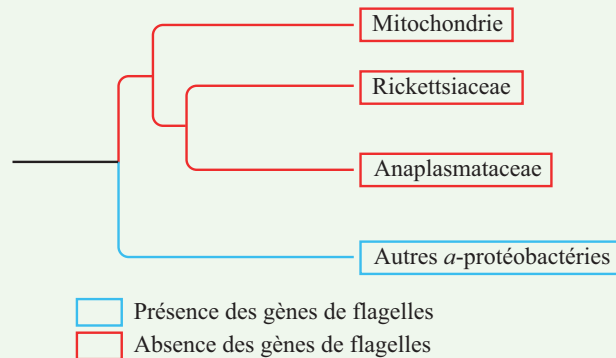


Figure 2.20 – Arbre phylogénétique des alpha-protéobactéries et des mitochondries sans tenir compte de *M. mitochondrii*. La présence ou l'absence de gènes permettant la formation de flagelles est indiquée.

Toutefois, la connaissance du génome de *M. mitochondrii* rend plus difficile l'analyse. Deux hypothèses peuvent être posées :

- **Hypothèse 1 : l'ancêtre des alpha-protéobactéries disposait d'un flagelle.** Dans ce cas, au cours de l'évolution, les descendants de l'alpha-protéobactérie ingérée auraient peu à peu perdu les gènes codant les protéines du flagelle. Il en va de même pour deux autres groupes, les Rickettsiaceae et les Anaplasmataceae.

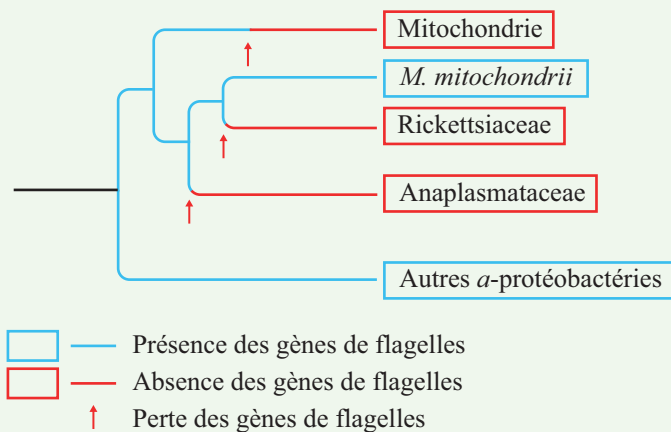


Figure 2.21 – Arbre phylogénétique des alpha-protéobactéries présentant l'hypothèse 1

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- *Hypothèse 2 : l'ancêtre des mitochondries ne disposait pas de flagelle.*
Dans ce cas, le flagelle serait apparu deux fois, une fois pour *M. mitochondrii* et une fois pour le reste des alpha-protéobactéries.

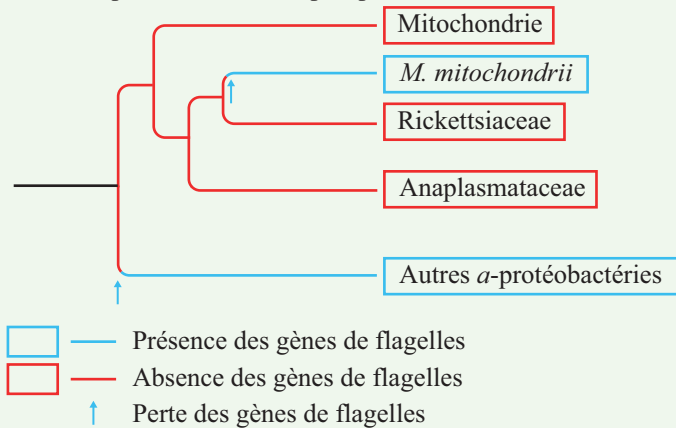


Figure 2.22 – Arbre phylogénétique des alpha-protéobactéries présentant l'hypothèse 2.

Dans le cas où l'ancêtre des mitochondries aurait disposé d'un flagelle, le document 2 permet d'émettre de nouvelles suppositions quant à son comportement. En effet, chez les eubactéries, les flagelles sont souvent présents chez bactéries prédatrices ou parasites. Il leur permet en effet de se déplacer et ainsi d'augmenter les probabilités de rencontre avec la proie ou l'hôte. De plus on apprend que les flagelles peuvent permettre aux eubactéries de sentir la présence d'une proie ou d'un hôte, mais aussi d'adhérer à ces dernières et d'entrer au sein d'une cellule hôte. Si l'ancêtre de la mitochondrie présentait un flagelle, on peut ainsi émettre l'hypothèse qu'il était en réalité prédateur ou parasite.

Ces connaissances remettent donc en question le modèle selon lequel l'eubactérie aurait été la proie, phagocytée par la cellule eucaryote. L'eubactérie aurait pu être parasite grâce à un flagelle, et sa cellule hôte, la cellule eucaryote. Dans ce cas, les relations de parasitisme auraient évolué en l'endosymbiose que nous connaissons aujourd'hui.

⚠ ATTENTION

Au sein du monde scientifique, la question de la présence d'un flagelle reste débattue encore aujourd'hui.

LA COMPLEXIFICATION DES GÉNOMES • CHAP. 2

11 Transfert de gènes

Énoncé
p. 57

Nouveau programme



Dans cet exercice, nous tentons de comprendre le rôle de la syncytine dans la formation du placenta humain, ainsi que son origine.

Le document 1 nous apprend que la syncytine est exprimée par le gorille, le chimpanzé, l'être humain et l'orang-outan, mais pas par le gibbon. Cela laisse supposer qu'un événement génétique a eu lieu chez l'ancêtre commun de ces quatre espèces, à l'origine du gain de ce gène. Selon le document 1, cet événement aurait donc eu lieu il y a entre 19 et 22 millions d'années.

En comparant la séquence entourant le gène de la syncytine et le génome du rétrovirus endogène humain W grâce au document 2, on remarque de grandes similitudes. Les régions LTR, mais également le gène viral ENV, sont localisés à proximité du gène de la syncytine, ce qui est inattendu pour un organisme non viral. On peut donc émettre l'hypothèse que ces deux séquences auraient une origine similaire.

On apprend de plus que le rétrovirus est capable d'intégrer son génome dans le génome de la cellule hôte. On peut donc suggérer qu'il y aurait entre 19 et 22 millions d'années, un ancêtre commun des gorilles, chimpanzés, humains et orang-outans s'est fait infecter par un rétrovirus. Ce dernier aurait intégré son génome dans le génome de la cellule hôte. Ce génome se serait alors transmis à toute sa descendance, jusqu'aux espèces d'aujourd'hui. Pour être capable de se transmettre de générations en générations, on peut supposer que la cellule cible était une cellule germinale, c'est-à-dire appartenant à la lignée reproductrice.

On s'intéresse dans un second temps au rôle de la syncytine. Le document 3 nous informe que cette protéine est surtout exprimée par les cellules du placenta (quasiment 100% des cellules), et très peu voire pas du tout dans le cerveau, le foie, les reins et le cœur. On peut donc suggérer que cette molécule joue un rôle dans la formation du placenta.

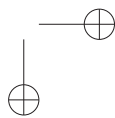
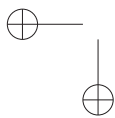
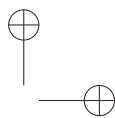
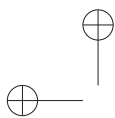
Les mécanismes de formation du placenta, et d'entrée du génome viral d'un rétrovirus dans la cellule cible sont ensuite présentés dans les documents 4 et 5. On observe que chez l'Humain, le placenta est formé de cellules de l'embryon qui fusionnent, donnant une structure à plusieurs noyaux. De plus, afin d'infecter une cellule, le rétrovirus endogène humain W doit reconnaître la cellule cible grâce à des protéines qui sont dans son enveloppe. Il y a alors fusion entre son enveloppe et la membrane plasmique de la cellule cible. On remarque que ces deux processus font appel à une fusion, c'est-à-dire à une mise en commun de deux membranes plasmiques.

À partir de ces documents, on peut ainsi émettre l'hypothèse que la syncytine est une protéine acquise par suite à une infection par un rétrovirus il y a entre 19 et 22 millions d'années. Elle est exprimée par les cellules du placenta et joue un rôle dans la formation de ce dernier en engageant la fusion des cellules de l'embryon.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre

3

L'inéluctable évolution des populations

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Les populations sont soumises à des forces évolutives
3. L'évolution des populations peut se faire sans modification génétique

1 Introduction

De nouveaux allèles, constitutifs du génome des organismes, sont constamment formés et sont transmis de génération en génération au cours de la reproduction sexuée. Ceci participe à la diversification des individus, et à plus grande échelle, à l'évolution des populations.

? PROBLÉMATIQUE

Quels sont les facteurs qui conduisent à l'évolution des génomes au sein des populations ?

2 Les populations sont soumises à des forces évolutives

Définition 1 : population

Ensemble d'individus d'une même espèce, présents en même temps dans un même territoire, et pouvant se reproduire entre eux.

Pour prédire la transmission d'allèles de générations en générations, les scientifiques ont souvent recours à des modélisations mathématiques.

? PROBLÉMATIQUE

Comment prédire, mathématiquement, l'évolution des fréquences d'allèles au sein d'une population ?

2.1 Une stabilité théorique : l'équilibre de Hardy Weinberg

Au sein d'une population, se trouvent des individus de génomes différents à l'origine d'un polymorphisme. La reproduction sexuée va favoriser la rencontre aléatoire de gamètes permettant de combiner les allèles des deux parents. Ainsi, les fréquences alléliques peuvent varier au fil des générations. Le modèle théorique de Hardy Weinberg prévoit une stabilité des fréquences alléliques et génotypiques d'une génération à l'autre. Il se présente ainsi :

Soit une population d'organismes eucaryotes appartenant à la même espèce. Soit un gène présent uniquement sous deux allèles A et a, avec des fréquences respectives p et q . On a $p + q = 1$.

Chaque gamète a ainsi une probabilité p de porter l'allèle A, et q de porter a. On a donc le tableau de croisement ci-dessous :

	A(p)	a(q)
A(p)	AA(p^2)	Aa(pq)
a(q)	Aa(pq)	aa(q^2)

Tableau 3.1 – Tableau de croisements pour le gène étudié.

Les fréquences des génotypes (AA), (Aa) et (aa) sont alors respectivement p^2 , $2pq$ et q^2 . Pour cette nouvelle génération, la fréquence de A est donc :

$$f(A) = (p^2) + pq = p(p + q) = p \times 1 = p.$$

De même,

$$f(a) = (q^2) + pq = q(p + q) = q \times 1 = q.$$

À la génération suivante, les fréquences des allèles A et a sont donc les mêmes que chez les parents. Nous avons donc démontré le principe d'Hardy-Weinberg, selon lequel les fréquences alléliques au sein d'une population isolée sont stables au cours des générations.

Ce modèle repose ainsi sur trois conditions théoriques :

- la panmixie (de pan = tout et mixie = mélange), selon laquelle les couples d'une même génération se forment au hasard, permettant un brassage complètement aléatoire ;
- la population doit être de taille infinie afin d'appliquer différentes lois mathématiques et notamment considérer que la fréquence d'un évènement est alors égale à sa probabilité ;
- la population étant considérée comme infinie, l'effet des forces évolutives est négligé.

Or ces conditions purement théoriques ne se retrouvent pas dans la nature, l'équilibre d'Hardy Weinberg n'est donc jamais atteint. Différentes forces peuvent impacter l'évolution des populations et donc exercer une pression sur les fréquences alléliques des différents gènes.

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

À RETENIR

L'équilibre de Hardy-Weinberg stipule que les fréquences des allèles et des génotypes ne varient pas d'une génération à l'autre. Ainsi, le polymorphisme génétique se maintient dans la durée. Cependant, dans les populations réelles, cet équilibre théorique n'est pas atteint.

Voir exercice 4.

PROBLÉMATIQUE

Quelles forces expliquent qu'un équilibre génétique n'est pas atteint dans les populations comme l'aurait prédit la théorie d'Hardy-Weinberg ?

2.2 Des facteurs empêchent d'atteindre cet équilibre théorique

2.2.1 - La dérive génétique

Dans une population réelle, l'effectif est limité et non infini. Ainsi, il se produit lors de la reproduction un échantillonnage aléatoire des allèles d'une génération à l'autre. De la même façon, tous les organismes n'ont pas le même nombre de descendants : il existe donc une certaine variabilité dans la manière dont les génomes sont transmis. Ce phénomène est appelé *la dérive génétique*.

Définition 2 : dérive génétique

Mécanisme causant la variation aléatoire des fréquences des différents allèles au sein d'une population au cours des générations. La dérive génétique est due au hasard des rencontres entre les gamètes portant les allèles mais aussi du nombre de descendants par parents.

Il est possible de modéliser le suivi des fréquences alléliques grâce au logiciel *Dérive génétique*. Pour cela, nous prenons l'exemple d'une population de 2500 individus et un allèle d'intérêt A. Choisissons une fréquence initiale de A de 0.5. La modélisation est réalisée huit fois et le résultat est présenté page suivante.

On voit effectivement que malgré l'absence de modification des paramètres, chaque modélisation donne un résultat différent.

Voir illustration page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

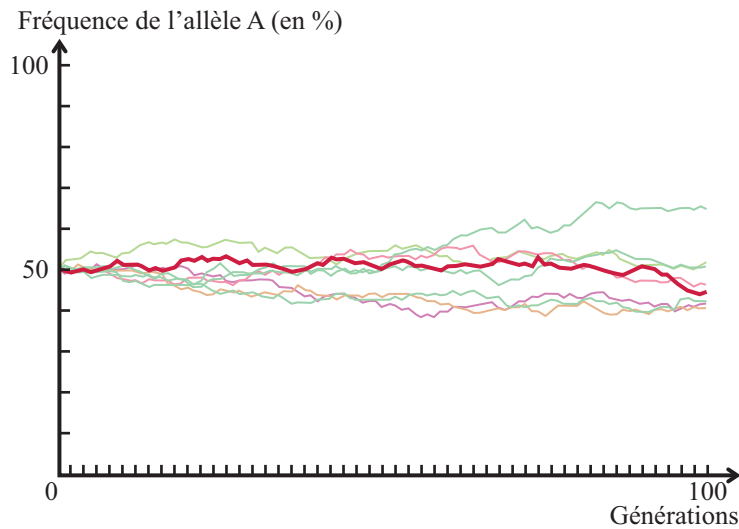


Figure 3.1 – Modélisations du suivi de la fréquence de A pendant 100 générations avec un effectif de 2 500 individus en utilisant le logiciel dérive génétique

Toutefois, en réduisant la taille de la population (par exemple 100 individus), nous pouvons voir que l'effet de la dérive génétique est d'autant plus marqué. Ainsi, la dérive génétique est d'autant plus forte si les populations sont de faible effectif.

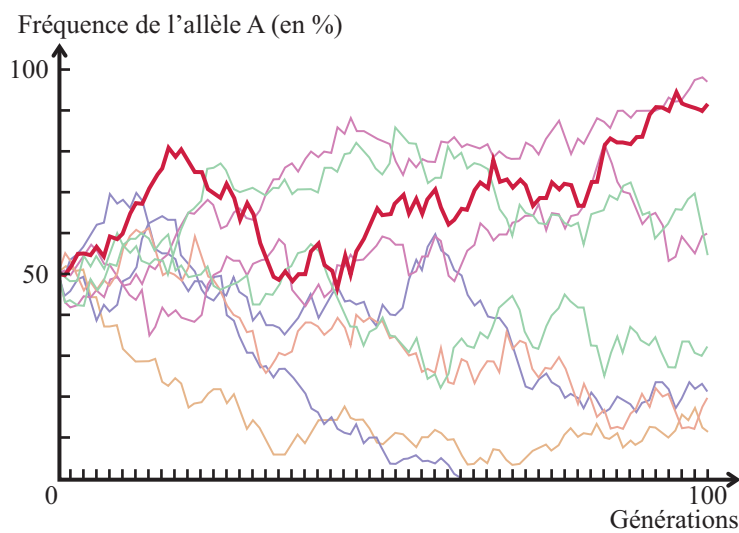


Figure 3.2 – Modélisations du suivi de la fréquence de A pendant 100 générations avec un effectif de 100 individus en utilisant le logiciel dérive génétique

Voir exercice 5.

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

2.2.2 - La sélection naturelle

Au sein d'une population, il est possible d'observer les effets d'une autre force évolutive : *la sélection naturelle*. Ce concept, historiquement défini par Charles Darwin, repose sur le fait que certains individus ont hérité de caractères avantageux pour leur vie, par rapport à leur environnement biotique (constitué d'êtres vivants) et abiotique (facteurs physico-chimiques de l'environnement). Ainsi ces individus se reproduiront davantage et transmettront plus facilement ces allèles à leurs descendants. Les fréquences alléliques de ces caractères sont alors de plus en plus élevées au sein de la population au détriment des caractères moins avantageux : ils sont sélectionnés. En accumulant des modifications avantageuses, la sélection naturelle se traduit donc par une adaptation parfois très étroite des espèces à leur milieu et à leurs conditions de vie.

De la même manière chez un certain nombre d'espèces, au moins un des deux sexes choisit son partenaire en fonction d'attributs qui lui sont propres. Par exemple, chez le guppy, les femelles choisissent préférentiellement les mâles qui présentent une queue très colorée : c'est la préférence sexuelle. Les allèles à l'origine de cette préférence sont donc sélectionnés au cours des générations.

Définition 3 : sélection naturelle

Mécanisme par lequel sont sélectionnés au cours des générations les allèles conférant un avantage aux individus d'une population, étant mieux adaptés à leur environnement (sélection de survie) ou ayant un meilleur succès reproductif (sélection sexuelle).

Par ailleurs, l'être humain peut aussi être facteur d'évolution à l'origine d'une sélection, par exemple, en sélectionnant artificiellement les organismes les plus intéressants pour lui. Cette sélection artificielle s'accompagne souvent d'une domestication (comme la domestication des plantes – voir le chapitre 8, ou la domestication de certains animaux comme le chien par rapport à son ancêtre sauvage : le loup).

Tous ces facteurs expliquent que l'équilibre de Hardy Weinberg n'est pas atteint.
Voir exercices 5, 6, 8, 9 et 11.

2.3 Les mutations entraînent une diversification génétique

Le polymorphisme est en partie lié à la présence d'allèles différents au sein d'une population d'individus d'une même espèce. Alors que la sélection naturelle tend à réduire la diversité génétique, la survenue de *mutations*, en formant de nouveaux allèles, permet de la conserver.

Cependant, pour avoir une conséquence sur les générations suivantes, les mutations doivent être transmises : elles doivent donc toucher les cellules de la lignée germinale (reproductrice).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

2.4 Les migrations ajoutent une dimension spatiale à l'évolution

La théorie de Hardy-Weinberg considère une population comme étant isolée. Toutefois, des individus d'une population peuvent être amenés à migrer vers une autre population, emportant avec eux des caractéristiques génétiques de leur population d'origine (fréquences d'allèles par exemple). En se reproduisant, ils peuvent alors transmettre des allèles nouveaux pour la population d'accueil.

Les migrations permettent donc aux allèles de voyager au cours des générations, par un processus que l'on appelle *flux génétiques*.

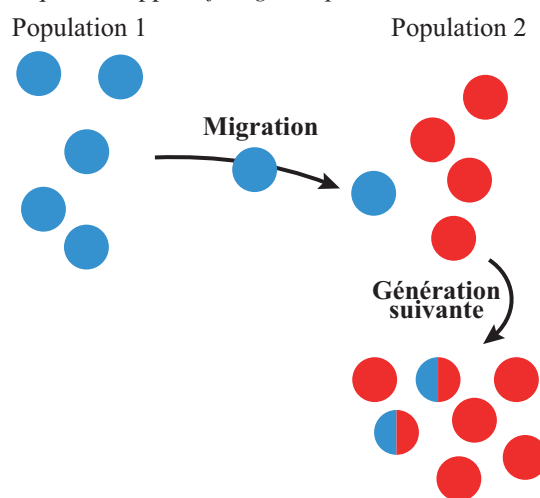


Figure 3.3 – Conséquences génétiques d'une migration théorique d'un individu d'une population 1 vers une population 2. Les génotypes des individus sont représentés par les ronds de couleurs.

Les migrations permettent ainsi une augmentation de la diversité génétique.

À RETENIR

La transmission d'allèles et donc de caractères de générations en générations façonne l'évolution des espèces. Elle possède plusieurs moteurs comme la dérive génétique, l'apparition de mutations et la migration de populations ou d'individus. Elle est cependant limitée par la sélection naturelle, qui entraîne une conservation des allèles conférant un avantage sélectif au porteur. Ces différents facteurs conduisent à une inéluctable évolution des génomes, ce qui empêche d'atteindre l'équilibre théorique d'Hardy-Weinberg.

? PROBLÉMATIQUE

Comment ces forces évolutives participent-elles à la naissance de nouvelles espèces ?

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

2.5 La spéciation, naissance de nouvelles espèces

Du fait que les environnements biotique et abiotique des organismes ne sont pas stables, les pressions de sélection auxquelles sont soumises des populations peuvent changer au cours du temps et ne sont pas les mêmes en fonction de leur localisation. Ainsi, deux populations plus ou moins isolées géographiquement divergeront génétiquement. La dérive génétique affectant différemment les populations, la différenciation génétique augmente et les échanges entre les populations sont davantage limités. Il est donc possible de voir les espèces comme des ensembles de populations plus ou moins isolées, plus ou moins hétérogènes génétiquement et évoluant de manière conjointe ou non. La séparation des populations au cours du temps peut ne pas être que géographique : elle peut aussi être comportementale.

À terme, les populations peuvent se différencier assez pour ne plus être considérées comme appartenant à la même espèce ; c'est ce qu'on appelle *la spéciation*.

Définition 4 : spéciation

La *spéciation* est la naissance de deux nouvelles espèces à partir de deux populations d'une même espèce initiale, dû à leur isolement géographique et/ou comportemental entraînant leur différenciation génétique.

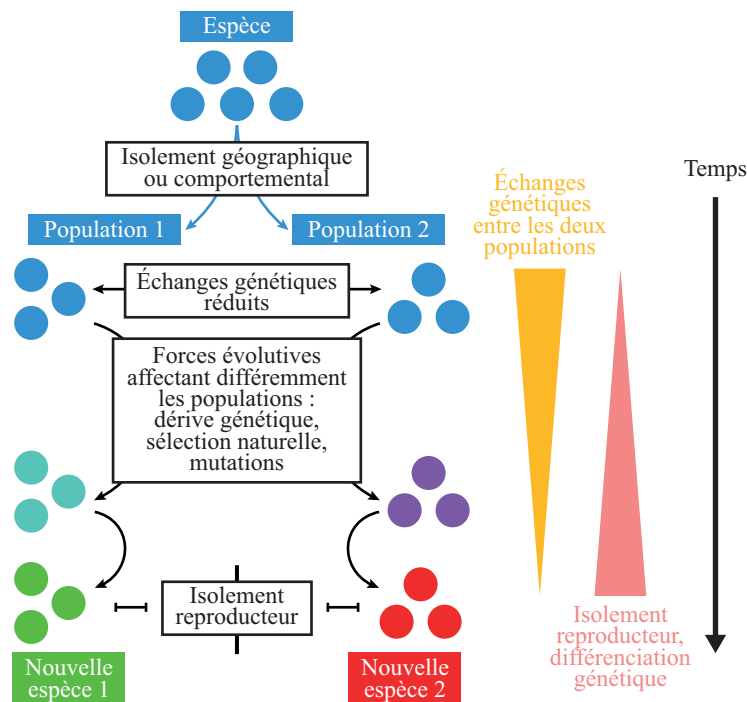


Figure 3.4 – La spéciation



Retrouvez une explication détaillée de ce schéma et de la spéciation avec 

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

▶ POUR ALLER PLUS LOIN

La naissance et l'extinction d'espèces sont deux événements normaux participant à l'évolution. Toutefois, depuis 1900, les extinctions s'accroissent en raison de l'activité humaine. Selon certaines prévisions alarmistes, il est considéré que 75% des espèces pourraient avoir disparu avant 2200.

La spéciation pose ainsi la question de la définition de l'espèce.

? PROBLÉMATIQUE

À partir de quels critères peut-on considérer que deux populations n'appartiennent plus à la même espèce ?

Le premier critère, classiquement utilisé pour définir une espèce, est le critère morphologique : deux organismes appartiennent à la même espèce s'ils se ressemblent. Cependant, pour un certain nombre d'espèces, il existe une grande diversité de phénotypes. Il est fréquent que les scientifiques réalisent que deux espèces supposément différentes ne sont en réalité qu'une unique espèce.

Le second critère est le critère d'interfécondité ; deux individus pouvant se reproduire et donner une descendance féconde appartiennent à la même espèce. Cette définition est toutefois restreinte aux individus ayant recours à la reproduction sexuée. Par exemple, elle ne peut pas être appliquée aux eubactéries.

Enfin, plus récemment, le développement des techniques de biologie moléculaire a permis la mise en place du dernier critère, le critère génétique. Une espèce est définie selon une proximité génétique. Il faut toutefois garder à l'esprit que des transferts horizontaux peuvent avoir lieu, comme vu dans le chapitre 2.

Chaque critère présente donc des limites, et ne peut pas être utilisé pour l'ensemble des populations. Il faut donc constamment définir précisément ce que l'on considère comme étant une espèce.

Voir exercice 7.

3 L'évolution des populations peut se faire sans modification génétique

La découverte de l'ADN et de son rôle dans le support de l'information génétique a réformé la vision de la biologie. On a alors cherché à expliquer la plupart des phénomènes par la génétique. Toutefois, les scientifiques se sont heurtés à la conclusion que tout ne peut être attribué au patrimoine génétique. Les populations peuvent en effet se diversifier sans que la cause ne soit génétique. Le comportement de l'individu et son environnement sont autant de variables à prendre en compte.

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

PROBLÉMATIQUE

Comment les populations peuvent-elles se diversifier sans modification des génomes ?

3.1 Des associations entre êtres vivants à l'origine d'une diversification des êtres vivants

Le monde vivant est constitué d'une multitude d'espèces qui interagissent. Ces associations peuvent être des symbioses, c'est-à-dire à bénéfices réciproques durables pour les individus, ou du parasitisme, lorsqu'un individu vit au dépens d'un autre.

Exemple : L'être humain est constamment associé à environ 10^{13} organismes microscopiques, bactéries, champignons ou encore virus, soit dix fois plus que le nombre de cellules à l'état adulte. Ces organismes sont rassemblés sous le nom de microbiote. L'être humain est colonisé juste après sa naissance, et la composition du microbiote évolue tout au long de sa vie, en fonction de nombreux facteurs comme son environnement, son hygiène ou encore sa nourriture. Le microbiote n'est pas forcément pathogène. Au contraire, il joue des rôles divers et surtout primordiaux dans nos vies, comme dans la digestion, ou dans la lutte contre des agents pouvant causer des maladies. De plus, certains types de microbiotes ont pu être associés à l'autisme, ou encore à certaines pathologies intestinales.

Voir exercice 10.

3.2 La modulation du phénotype en fonction de l'environnement

Au cours de sa vie, le bernard-l'hermite, quitte plusieurs fois sa coquille, devenue trop étroite pour lui. Il entre alors dans une nouvelle coquille qu'il trouve dans son environnement. Des organismes de diverses espèces sont en effet capables de moduler leurs propres caractéristiques à partir d'éléments inertes.

De la même manière, le nid des oiseaux, les barrages des castors, les toiles d'araignées ou encore les termitières sont autant d'exemples qui suggèrent que les environnements peuvent également être modifiés par les individus. Ces comportements peuvent être contrôlés génétiquement et ainsi être hérités. Ils sont alors soumis à la sélection naturelle : on parle de *phénotype étendu*.

Définition 5 : phénotype étendu

Concept selon lequel le phénotype d'un organisme n'est pas seulement défini par ses caractères individuels. Il faut également prendre en compte les caractéristiques de l'environnement qui sont influencées par son génotype.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

3.3 La transmission de caractères comportementaux

Au sein du règne animal (notamment le groupe des vertébrés), il est courant d'observer des comportements culturels spécifiques de certaines populations. Ces comportements peuvent être transmis au contact d'autres individus. On parle de transmission culturelle.

Définition 6 : transmission culturelle

Apprentissage d'un savoir-faire, d'une compétence ou de connaissances au sein d'une même espèce. La transmission culturelle peut avoir lieu aussi bien verticalement (d'un parent aux enfants), horizontalement (au sein de la même génération), qu'obliquement (d'une génération à une autre, sans lien de parenté entre les individus).

Ces apprentissages ne dépendent donc pas des informations génétiques des individus, mais peuvent toutefois conduire à une diversification des espèces et du vivant. D'autres espèces sont capables de transmission culturelle. Il a été remarqué que des espèces d'oiseaux peuvent apprendre des chants ou encore pour d'autres animaux, à se servir d'outils. Dans le cas où la connaissance est transmise, elle peut être modifiée au cours du temps. C'est ce qu'on appelle *l'évolution culturelle*. Les règles de l'évolution s'appliquent, sauf que l'élément transmis est le savoir et non pas des gènes.

L'évolution culturelle a une influence certaine sur l'évolution biologique en modifiant les pressions de sélection. Chez l'être humain par exemple, la domestication de la vache et l'utilisation de son lait dans l'alimentation se sont généralisées, ce qui est une évolution culturelle. Cela a conduit à une sélection des individus capables de digérer le lactose, et donc à une sélection biologique.

Voir exercice 12.

À RETENIR

La diversification du monde vivant n'est pas obligatoirement associée à une diversification des génomes mais peut être par exemple liée à une transmission culturelle et donc un apprentissage. Des associations durables entre organismes (symbioses, parasitisme) ou avec des éléments inertes (parures, constructions) façonnent également les espèces et leur environnement.

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

1 QCM Vérification de connaissances

5 min

Corrigé
p. 93

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1 La théorie d'Hardy-Weinberg :
 - a explique que la sélection naturelle est nécessaire pour que les fréquences alléliques évoluent ;
 - b démontre que les génomes évoluent de génération en génération ;
 - c suggère que dans une population isolée, les fréquences des différents allèles restent stables de génération en génération ;
 - d montre que des mutations, à la base de la naissance de nouveaux allèles, sont un des moteurs de l'évolution.
- 2 La transmission culturelle :
 - a peut avoir lieu aussi bien verticalement, horizontalement, qu'obliquement ;
 - b peut faire intervenir des individus d'espèces différentes ;
 - c est totalement indépendante de l'évolution biologique ;
 - d n'est possible que chez l'être humain.

2 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 93

Qui suis-je ?

- 1 Association durable entre deux organismes appartenant à deux espèces différentes, leur apportant à tous deux un bénéfice.
- 2 Mécanisme selon lequel les organismes les plus aptes à survivre et à se reproduire transmettent davantage leurs allèles à l'origine de leur phénotype.
- 3 Processus au cours duquel les êtres humains ont sélectionné des organismes présentant des avantages, conduisant à long terme à leur domestication.

3 V/F Vérification des connaissances

5 min

Corrigé
p. 93

Répondez par vrai ou faux et corrigez les propositions inexactes.

- 1 Seuls les caractères héréditaires peuvent être soumis à la sélection naturelle.
- 2 Les migrations sont le seul moyen d'augmenter le polymorphisme d'une population donnée.
- 3 L'apparence d'un individu est uniquement gouvernée par ses gènes.
- 4 L'être humain a dix fois moins de cellules que d'organismes microscopiques qui le colonisent.
- 5 Le phénotype étendu indique qu'en s'exprimant, le génotype d'un organisme peut aussi l'amener à façonner son propre environnement, comme les oiseaux et leurs nids, ou les castors et les barrages.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

4 Principe de Hardy-Weinberg



10 min

Corrigé
p. 93

Nouveau programme

Le DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane) est un insecticide qui fut largement utilisé dans le sud de la France pour lutter contre le moustique. Aujourd'hui il est interdit, sauf dans certaines régions tropicales.

Après un certain temps d'utilisation de l'insecticide, des moustiques résistants sont apparus dans la population. Après une analyse en laboratoire, des chercheurs ont remarqué que ces moustiques étaient porteurs d'un allèle A^R , leur conférant leur résistance à l'état homozygote (par rapport aux autres moustiques porteurs de l'allèle A^+).

Des chercheurs ont capturé des moustiques de région tropicale toujours soumis au DDT et ont testé la résistance des moustiques. Ils ont comptabilisé 329 moustiques résistants et 2 380 moustiques sensibles.

- 1 Sachant que, dans une population, les fréquences alléliques p et q de deux allèles A et a se calculent ainsi :

Génotype	(A//A)	(A//a)	(a//a)
Fréquence	p^2	$2pq$	q^2

Tableau 3.2 – Fréquences alléliques des différents génotypes

Calculez les fréquences alléliques de A^+ et de A^R .

- 2 À partir des données de l'énoncé, la population est-elle à l'équilibre de Hardy-Weinberg ?

5 Dérive génétique - Sélection naturelle



10 min

Corrigé
p. 95

Lycée Frison-Roche, Chamonix

Des élèves de Terminale souhaitent expérimenter à propos des mécanismes de l'évolution. Pour cela, des populations de drosophiles sont élevées au laboratoire dans des « cages à populations ». Les drosophiles ont un cycle de reproduction très court, propice à leur élevage.

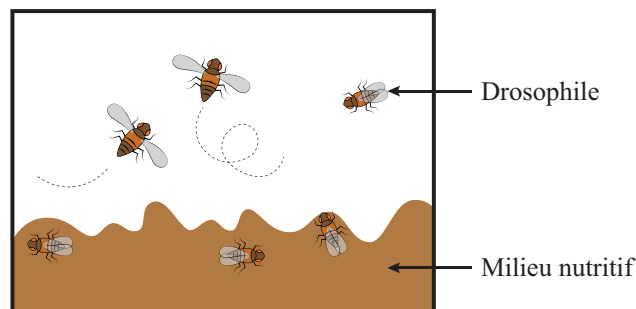


Figure 3.5 – Schéma d'une cage à population

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

Pour chaque expérience détaillée dans le document ci-dessous, trouvez le protocole pertinent et justifiez votre réponse.

Document

Expérience 1 : on veut mettre en évidence le phénomène de dérive génétique en suivant le devenir d'un gène représenté par deux allèles.

Choix de protocoles :

- (1.1) compter régulièrement pour chaque cage la fréquence de chacun des deux allèles ;
- (1.2) élever dans une cage des drosophiles possédant un allèle et dans une autre cage des drosophiles possédant l'autre allèle de manière à éviter leur croisement ;
- (1.2) faire varier la quantité de nourriture dans les différentes cages et comparer les effectifs obtenus.

Expérience 2 : on s'intéresse au phénomène de sélection naturelle. On veut savoir si un facteur de l'environnement comme la luminosité peut faire fluctuer la fréquence des allèles.

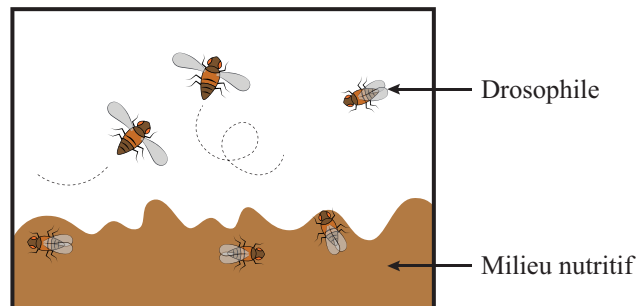


Figure 3.6 – Cage à population permettant de tester l'influence de la luminosité

Choix de protocoles :

- (2.1) élever des drosophiles dans différentes cages en choisissant pour chaque cage une alimentation différente. Compter, au bout du même temps, pour chaque cage la fréquence de chacun des deux allèles ;
- (2.2) élever des drosophiles dans différentes cages en choisissant pour chaque cage une luminosité différente. Compter, au bout du même temps, pour chaque cage la fréquence de chacun des deux allèles ;
- (2.3) élever des drosophiles dans différentes cages en choisissant pour chaque cage une luminosité différente et une fréquence initiale différente pour les allèles. Compter, au bout du même temps, pour chaque cage la fréquence de chacun des deux allèles.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

6 Population - Sélection naturelle



10 min

Corrigé
p. 95

Lycée Jean-Pierre Vernant, Pins Justaret

Le géomètre du bouleau est un papillon nocturne. Le jour, il se repose sur des troncs d'arbre. Il est alors exposé aux prédateurs (oiseaux). La couleur du corps du géomètre est un caractère héréditaire. En 1848, on remarqua pour la première fois, dans la région de Manchester (Angleterre), l'existence d'une forme de ce papillon au corps sombre. Sa fréquence augmenta progressivement, jusqu'à constituer 98% des individus aux alentours de 1900. De 1960 à 1975, la fréquence de la forme claire augmenta, alors que celle de la forme sombre diminua, passant de 95% à 82%. On précise que forme sombre et forme claire peuvent se reproduire entre elles.

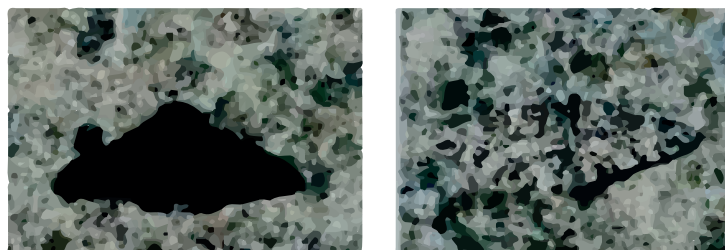


Figure 3.7 – Une forme sombre (à gauche) et une forme claire (à droite) du géomètre du bouleau posées sur un tronc non pollué

L'Angleterre fut le premier pays au monde à connaître l'industrialisation, dès la fin du XVIII^e siècle. On utilisait alors massivement le charbon comme source d'énergie. Au milieu du XIX^e siècle, la pollution de l'air était déjà importante, et se traduisait notamment par le dépôt de particules sombres sur les troncs des arbres. A partir de 1960, des mesures ont été prises pour réduire cette pollution.

Après avoir décrit l'évolution de la fréquence de chacune des formes (claire et sombre) au cours de la période 1848-1975, vous expliquerez l'origine des changements de couleur des populations de papillons depuis 1848.

7 Comportement - Diversification



10 min

Corrigé
p. 96

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Cet exercice est décliné en deux versions : une version QCM et une version « question ouverte ». Les deux versions utilisent la même base documentaire.

Document 1 : une utilisation encore plus sophistiquée des outils par les chimpanzés (Futura-Sciences, février 2006)

Le Professeur Whiten étudie la transmission culturelle du comportement au sein des groupes de primates et les indications que celle-ci peut fournir sur

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

la diffusion de la culture humaine. En Afrique, certains comportements observés au sein de différents groupes de chimpanzés sont propres à ces groupes. Les chimpanzés d'Afrique de l'Ouest utilisent des pierres et des branches pour casser les noix. Et ceci est essentiel pour eux. Cette technique n'est par contre utilisée ni par les chimpanzés d'Afrique de l'Est, ni - ce qui est plus intéressant encore - par ceux d'Afrique de l'Ouest qui vivent sur la rive Est d'une grande rivière. (...)

Les observations montrent que la transmission du savoir d'un individu à l'autre se fait aisément chez les chimpanzés. En captivité, le Professeur Whiten a noté que lorsqu'une nouvelle connaissance est acquise, elle se transmet rapidement aux autres membres du groupe.

Document 2 : des outils de pierre découverts au Parc National de Taï, Côte d'Ivoire (Article tiré du site « homonides.com », 14/02/07)

L'université de Calgary (Canada) vient de publier dans les PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences) une étude sur l'utilisation de pierres par des chimpanzés il y a 4 300 ans. L'équipe d'archéologues dirigée par Julio Mercader a effectué des recherches sur 3 sites de la forêt de Taï. Il ont ainsi pu découvrir, à dix mètres de profondeur, des pierres utilisées comme percuteurs. Une analyse approfondie a permis de déceler des restes d'amidon provenant de noix locales.

La taille des pierres et les restes d'amidon permettent d'éliminer une origine humaine :

- Les outils sont trop gros pour avoir été utilisés par nos ancêtres ;
- Les noix ne correspondent pas au régime alimentaire des *Homo sapiens* de la région.

(...) Les chimpanzés actuellement présents sur les lieux continuent d'utiliser des pierres comme percuteurs pour consommer des noix.

1 Version QCM : choisissez la (ou les) proposition(s) exacte(s).

Les informations contenues dans les documents permettent d'affirmer que :

- ☐ a les pierres retrouvées dans la forêt de Taï ont été utilisées par *Homo sapiens* ;
- ☐ b le comportement consistant à utiliser des pierres comme percuteurs pour casser des noix s'est transmis au cours de nombreuses générations ;
- ☐ c le comportement consistant à utiliser des pierres comme percuteurs pour casser des noix ne résulte pas d'une modification de l'information génétique.

2 Version « question ouverte ».

À partir d'informations extraites des deux articles, démontrez que de nouveaux phénotypes comportementaux peuvent apparaître et se transmettre dans une population par voie non génétique.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

8 Sélection naturelle



15 min

Corrigé
p. 97

Nouveau programme

Au cours des années 1830, Darwin partit étudier la biodiversité dans les îles Galapagos. Ces îles, à environ 1 000 kilomètres au large de l'Équateur, sont en effet habitées par une grande diversité d'espèces, dont des oiseaux appartenant à la famille des pinsons. Ces derniers sont notamment étudiés car selon les espèces, ils présentent des becs de tailles et de formes plus ou moins variables. Les pinsons ont une alimentation variée, allant de fruits et graines secs, à des fruits plus juteux.

Les années 1975 et 1976 ont été marquées par une sécheresse intense dans les îles Galapagos. Une population de pinsons a été suivie de 1975 à 1979 sur un site d'intérêt. Ci-dessous sont représentés l'effectif de la population, et la taille moyenne du bec des pinsons au cours du temps.

Date	Nombre d'individus	Taille moyenne du bec (unités arbitraires)
1 ^{er} juin 1975	1350	1
1 ^{er} janvier 1976	1100	0.9
1 ^{er} avril 1976	1400	0.9
1 ^{er} juin 1976	1260	0.8
1 ^{er} janvier 1977	850	1
1 ^{er} juin 1977	520	1.3
1 ^{er} août 1977	400	1.7
1 ^{er} janvier 1978	230	2.4
1 ^{er} août 1978	400	2.9
1 ^{er} août 1979	250	3.2

Tableau 3.3 – Nombre de pinsons et taille moyenne de leur bec entre le 1^{er} juin 1975 et le 1^{er} août 1979

On sait qu'un bec plus large et donc plus puissant est un avantage pour se nourrir de fruits secs.

- 1 Quelle force évolutive est limitée dans les îles des Galapagos ?
- 2 Représentez sur un graphique l'évolution du nombre des pinsons et de la taille moyenne de leur bec entre le 1^{er} juin 1975 et le 1^{er} août 1979.
- 3 Émettez une hypothèse permettant d'expliquer les tendances des deux courbes.

9 Population - Sélection naturelle



25 min

Corrigé
p. 98

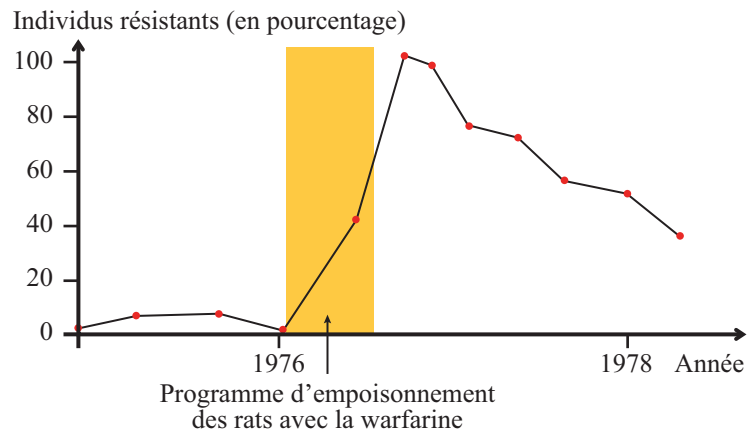
Lycée Jean de la Fontaine, Paris

La résistance aux pesticides de nombreux organismes considérés comme nuisibles (insectes, rats etc.) est enregistrée depuis plusieurs années. Pour éliminer les rats, la warfarine a été utilisée dans les années 1950 à 1980.

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

Document 1

La warfarine (encore appelée « mort aux rats ») est un anticoagulant puissant. Elle bloque l'enzyme VKOR permettant la réduction de la vitamine K, réaction indispensable à la coagulation sanguine. Les rats meurent alors d'hémorragie. Des études menées sur de nombreux rats ont permis de suivre l'évolution du pourcentage de résistance à la warfarine dans une population de rats entre 1975 et 1978 au pays de Galles.



Document 2

Le gène VKOR1 permet la synthèse de l'enzyme VKOR impliqué dans la réduction de la vitamine K. La warfarine est inactive sur l'enzyme VKOR des rats résistants.

Le document ci-dessous présente la comparaison de la séquence de l'enzyme VKOR codée par ce gène chez des rats sensibles ou résistants à la warfarine.

	110	115	120	125	130
Traitement					
Identités	*	*	*	*	*
VKOR rat sensible	Ser	Leu	Val	Ser	Val
VKOR rat résistant 1	-	-	-	-	-
VKOR rat résistant 2	-	-	-	-	-

Choisissez la proposition exacte pour chaque question.

- 1** Le document 1 montre que :
- ☐ a les rats sensibles à la warfarine ont disparu après 1976 ;
 - ☐ b tous les rats étaient sensibles à la warfarine avant 1976 ;
 - ☐ c des rats résistants à la warfarine existaient avant 1976 ;
 - ☐ d la résistance à la warfarine est apparue à partir de 1976.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 2** Le document 1 montre que :
- a** la vitamine K réduite inhibe la coagulation ;
 - b** l'enzyme VKOR est nécessaire à la coagulation ;
 - c** l'enzyme VKOR réduite est nécessaire à la coagulation ;
 - d** l'enzyme VKOR inhibe la vitamine K.
- 3** Le document 2 montre que :
- a** il y a apparition de nouveaux gènes chez des rats résistants ;
 - b** le nucléotide 120 est différent chez VKOR des 3 rats ;
 - c** le nucléotide 120 est différent entre VKOR du rat sensible et VKOR du rat résistant 2 ;
 - d** au moins une mutation du gène VKOR1 est responsable de la résistance à la warfarine.
- 4** L'ensemble des documents montre :
- a** l'apparition d'une nouvelle espèce de rats ;
 - b** l'évolution des rats ;
 - c** l'apparition d'une nouvelle population de rats ;
 - d** l'évolution de la population de rats.
- 5** L'ensemble des documents montre :
- a** un exemple de dérive génétique ;
 - b** un exemple de spéciation ;
 - c** un exemple de sélection naturelle ;
 - d** un exemple d'effet fondateur.
- 6** L'ensemble des documents montre que :
- a** la warfarine a fait disparaître certaines espèces de rats en 1976 ;
 - b** l'utilisation de la warfarine en 1976 est responsable de l'apparition de la résistance des rats ;
 - c** en 1976, certains rats ont évolué pour s'adapter à leur milieu ;
 - d** les rats résistants à la warfarine se reproduisent mieux que les autres.
- 7** L'utilisation de la warfarine :
- a** est efficace pour lutter contre les rats mais vraisemblablement à très court terme ;
 - b** provoque des mutations ;
 - c** est responsable de l'apparition de nouveaux allèles de résistance à la warfarine ;
 - d** est inefficace puisqu'elle entraîne une augmentation du nombre de rats.

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

8 L'ensemble des documents montre que :

- a** il y a isolement reproducteur entre les rats résistants à la warfarine et ceux qui y sont sensibles ;
- b** les individus résistants à la warfarine ont un avantage sélectif par rapport aux autres ;
- c** l'évolution est orientée vers un but : ici, devenir résistant à la warfarine ;
- d** l'enzyme VKOR mutée a joué un rôle de facteur sélectif.

10 Association entre espèces



15 min

Corrigé
p. 99

Lycée Notre Dame du Grand Champ, Versailles

À partir de l'exploitation méthodique des documents proposés, identifiez le mécanisme à l'origine des caractéristiques de la salamandre ponctuée et expliquez en quoi il participe à la diversification du vivant.

La salamandre ponctuée (*Amblystoma maculatum*) est un vertébré qui vit enfoui sous terre et ne sort qu'au printemps pour pondre dans une mare ou sur les bords d'un lac. Les oeufs se développent dans des eaux peu profondes.

Oophila amblystomatis est une algue verte unicellulaire qui doit son nom au fait qu'elle se développe dans les oeufs des salamandres. L'algue n'a jamais été observée à l'état libre dans le milieu.

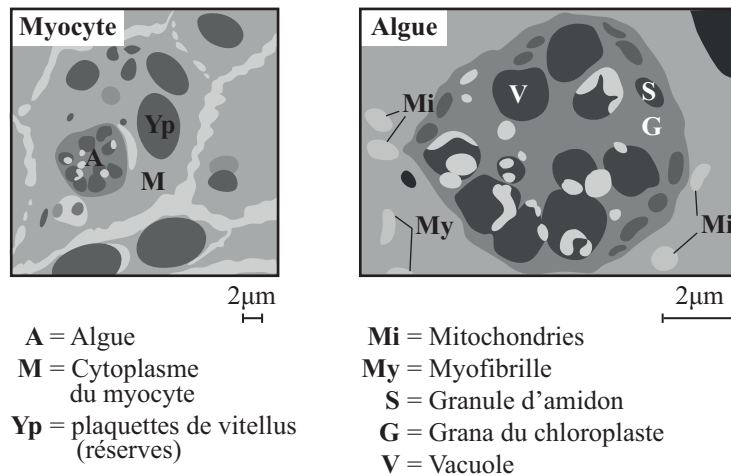


Figure 3.8 – Observations microscopiques de cellules musculaires d'embryon de salamandre

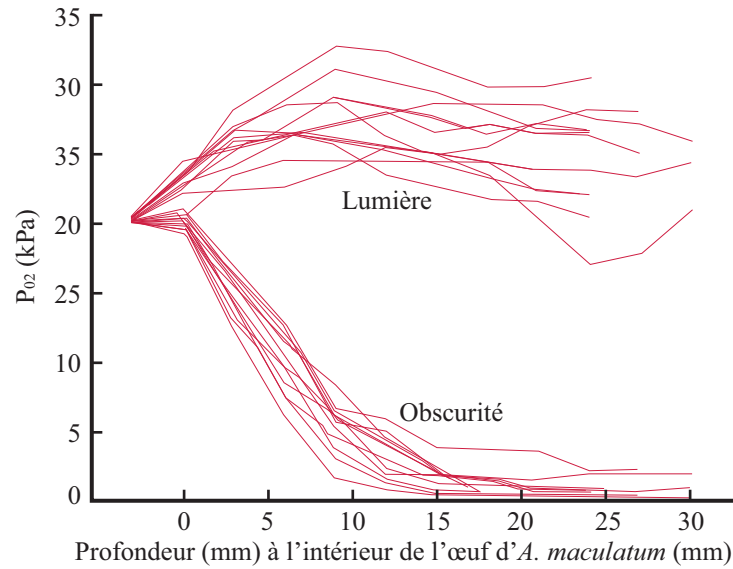
Myocyte : Cellule musculaire

Myofibrille : Protéine des cellules musculaires

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Pression de dioxygène mesurée dans 11 œufs d'*A. maculatum* aux stades 38 à 42 du développement après au moins 10 heures d'obscurité ou de lumière.

Figure 3.9 – Mesure de la pression de dioxygène dans les oeufs de salamandre (expérience 1)

Trois lots de 300 œufs de salamandre présentant l'association avec l'algue *Oophila* sont placés dans des conditions différentes (expérience 2).

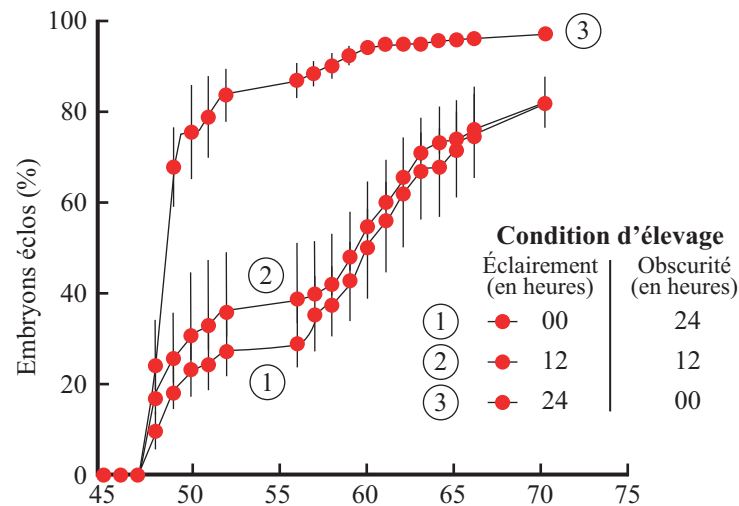


Figure 3.10 – Résultats d'une expérience (expérience 2)

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

- le premier lot est élevé en absence de lumière ;
- le second avec une alternance de 12h de lumière et de 12h d'obscurité ;
- le troisième lot est placé dans un environnement avec 24h de lumière par jour.

Si l'embryon est extrait de l'œuf et qu'il ne reste que la masse gélatineuse, les algues ne se multiplient pas.

Les chercheurs pensent que les algues *Oophila* ont besoin des déchets produits par l'embryon (déchets azotés, CO₂ ...) pour se multiplier.

11 Diversité allélique - Sélection naturelle



30 min

Corrigé
p. 100

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Theba pisana est une espèce d'escargot vivant en différents endroits des dunes littorales. On observe chez cette espèce des variations phénotypiques au niveau de la coquille.

Vous avez à votre disposition différents documents afin d'expliquer l'origine des variations de la fréquence des phénotypes d'escargots observés sur la dune au cours du temps.

- 1 À partir des données du document 1, présentez la diversité allélique chez *Theba Pisana*.
- 2 À partir des données du document 2, comparez la répartition des différents phénotypes entre 1960 et 2007. Proposez une explication aux différences constatées.
- 3 Précisez votre explication à l'aide d'informations tirées du document 3.
- 4 Nommez le mécanisme révélé par cette étude et définissez-le.

Document 1a : différents phénotypes observés chez *Theba pisana*

Sur les différents végétaux de la dune, on peut observer des gastéropodes de la famille des Hélicidés (*Theba pisana*). Ils possèdent une coquille blanche-jaune, sur laquelle on peut observer différents motifs de bandes en spirales. La couleur des bandes détermine les motifs présents sur la coquille.



Figure 3.11 – Présentation des phénotypes

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Document 1b : variabilité du gène responsable de la couleur de la coquille chez *Theba pisana*

On admet qu'il existe un gène responsable de la couleur des bandes et que ce gène existe sous deux formes alléliques différentes : l'allèle B qui donne naissance à des bandes claires, et l'allèle N qui donne naissance à des bandes sombres. Les deux allèles B et N sont codominants.

Document 2

*Répartition quantitative des différents phénotypes de *Theba pisana* sur une dune à deux époques différentes.*

Document 2a : données pour l'année 1960

En 1960 la dune n'est pas exploitée ni piétinée. Elle est peuplée uniquement par des oyats. On a recensé en 1960 les différents types de phénotypes d'escargots sur la dune dans la zone où poussent les oyats.

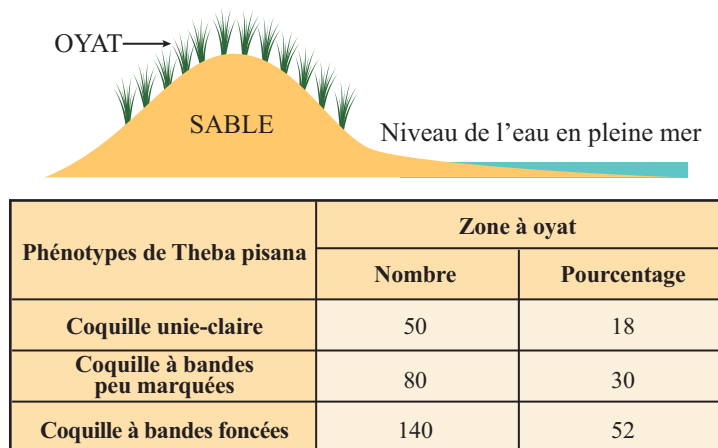


Figure 3.12 – Nombre et pourcentage de chaque phénotype de *Theba pisana* recensé dans la zone à oyats de la dune en 1960

Document 2b : données pour l'année 2007

Après 1960, une partie de la dune a été aménagée en plage pour répondre à une demande touristique. La dune est désormais subdivisée en deux zones. On a recensé en 2007 les escargots sur la dune dans la zone 1 et dans la zone 2.

(voir illustration page ci-contre)

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

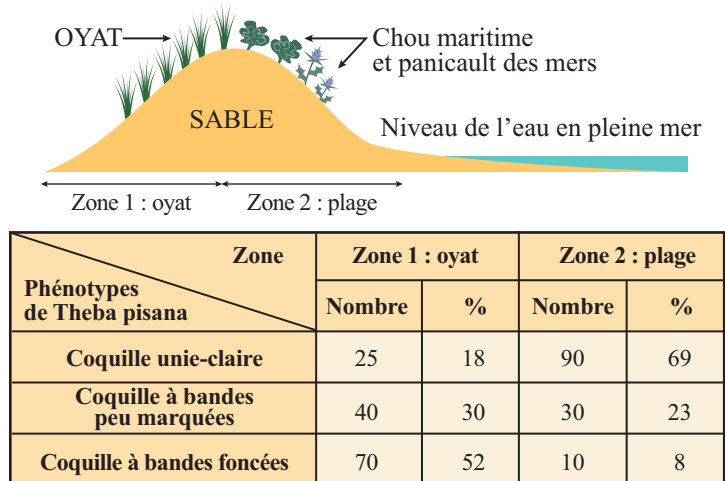


Figure 3.13 – Nombre et pourcentages de chaque phénotype de *Theba pisana* recensé dans les zones 1 et 2 de la dune en 2007

Document 3 : les prédateurs de *Theba pisana*

Certains oiseaux comme les Grives du bord de mer se nourrissent de *Theba pisana*. Des études ont été réalisées pour déterminer les phénotypes des individus consommés par ces prédateurs dans les différentes zones de la dune.

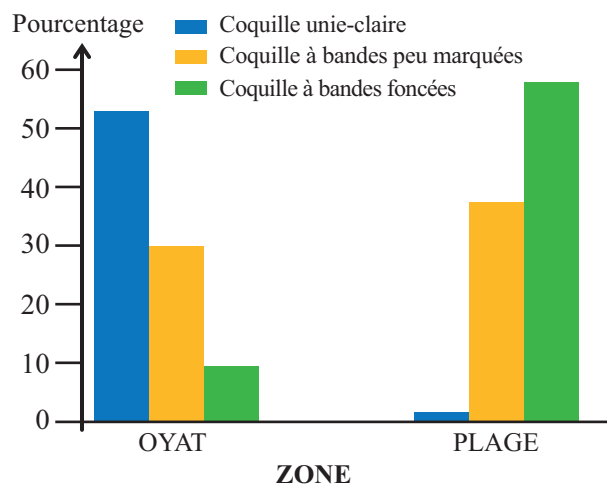


Figure 3.14 – Pourcentage de chaque phénotype de *Theba pisana* consommé par les Grives

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

12 Spéciation



30 min

Corrigé
p. 101

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

« La processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa*, est une chenille qui se développe aux dépens du genre *Pinus* dans une partie de l'Europe et dans le bassin Méditerranéen. Dans un massif forestier du Portugal (le parc national de Leiria), des individus ayant un cycle biologique très différent ont été détectés en 1997 : les adultes émergent en mai et le développement larvaire a lieu en été, alors que dans la même forêt, des individus à développement "normal" (émergence des adultes fin août et développement larvaire en automne-hiver) existent. Les études ont montré que les flux de gènes étaient très faibles entre les deux groupes d'individus, et que la différence de cycle biologique était vraisemblablement apparue in situ à partir de quelques individus "mutants". Chacun des groupes d'individus pourra continuer à diverger puisqu'ils ne sont plus soumis aux mêmes conditions de sélection (température, état physiologique de l'hôte, ennemis naturels...) et que la différence de cycle biologique empêche la reproduction entre adultes de groupes différents. »

Source : Études de la spéciation chez les insectes, INRA, novembre 2009.

À partir des informations contenues dans la publication de l'INRA :

- 1 Argumentez l'idée qu'une spéciation est en cours chez les chenilles processionnaires du parc national de Leiria.
- 2 Explicitez les modalités de cette spéciation.

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

1 QCM Vérification de connaissances

Énoncé
p. 79

- 1 Réponse **c**.
- 2 Réponse **a**.

2 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 79

- 1 La symbiose.
- 2 La sélection naturelle.
- 3 La sélection artificielle.

3 V/F Vérification des connaissances

Énoncé
p. 79

- 1 *Vrai.*
- 2 *Faux*, les mutations permettent la formation de nouveaux allèles qui, si elles touchent la lignée germinales, peuvent être héritées.
- 3 *Faux*, l'environnement est également à prendre en compte.
- 4 *Vrai.*
- 5 *Vrai.*

4 Principe de Hardy-Weinberg

Énoncé
p. 80

Nouveau programme

- 1 Soient $f(A^+)$ et $f(A^R)$, les fréquences alléliques respectives des allèles A^+ et A^R .
Nous souhaitons calculer $f(A^+)$ et $f(A^R)$.
Si on applique l'énoncé à notre cas, on a :

Génotype	$(A^+//A^+)$	$(A^+//A^R)$	$(A^R//A^R)$
Fréquence	$f(A^+)^2$	$2 \times f(A^+) \times f(A^R)$	$f(A^R)^2$

Tableau 3.4 – Fréquences alléliques des différents génotypes

L'énoncé nous donne les proportions de moustiques résistants et sensibles au DDT. Or, selon l'énoncé, seuls les moustiques homozygotes ($A^R//A^R$) sont résistants. Nous connaissons la proportion de ces derniers, qui est de :

$$\frac{329}{329 + 2380} = 0,12.$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Selon le tableau, on a pour le génotype ($A^R//A^R$) :

$$f(A^R)^2 = 0,12, \text{ soit } f(A^R) = \sqrt{0,12} = 0,3464.$$

Les moustiques sensibles au DDT, quant à eux, regroupent les moustiques homozygotes (A^+/A^+) et les moustiques hétérozygotes (A^+/A^R). Leur proportion est :

$$\frac{2380}{329 + 2380} = 0,88.$$

Selon le tableau, des fréquences associées aux génotypes (A^+/A^+) et (A^+/A^R) vérifient :

$$f(A^+)^2 + 2 \times f(A^+) \times f(A^R) = 0,88$$

soit :

$$f(A^+)^2 + 2 \times 0,3464 \times f(A^+) - 0,88 = 0.$$

C'est une équation du second degré de type $ax^2 + bx + c = 0$, avec $a = 1$, $b = 0,6928$ et $c = -0,88$.

On calcule le déterminant :

$$\Delta = b^2 - 4ac = 3,9999.$$

Δ étant positif, on a deux solutions possibles à l'équation, qui sont :

$$x_1 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a} = -1,35$$

et

$$x_2 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a} = 0,6535.$$

Comme une fréquence allélique ne peut être négative, on en conclut que $f(A^+) = 0,6535$.

Remarque : dans ce cas précis, le gène est présent sous deux allèles. On a donc :

$$f(A^R) + f(A^+) = 1.$$

Suite au calcul de $f(A^R)$, on aurait pu partir de cette équation afin de déterminer $f(A^+)$. La méthode consistant à partir du tableau de croisement a cependant l'avantage de s'appliquer à tous les cas.

- 2** Selon l'énoncé, les moustiques sont toujours soumis au DDT, donc à une pression de sélection. Or, pour respecter l'équilibre de Hardy-Weinberg, l'effet des forces évolutives doit être négligé, ce qui n'est pas le cas ici. La population n'est donc pas à l'équilibre de Hardy-Weinberg.

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

5 Dérive génétique - Sélection naturelle

Énoncé
p. 80

Lycée Frison-Roche, Chamonix

Expérience 1 : on souhaite mettre en évidence le phénomène de dérive génétique en suivant le devenir d'un gène représenté par deux allèles.

Pour ce faire, le protocole 1.1 est le plus adapté. En effet, le protocole 1.2 ne met pas en présence les deux allèles au sein de la même population. Au fil des générations, les fréquences alléliques ne pourront donc pas évoluer, on n'a donc pas de dérive génétique. Le protocole 1.3, quant à lui, nécessite un facteur environnemental qui fera pression sur la population. Il y aura donc une sélection naturelle, et pas de dérive génétique.

Expérience 2 : On souhaite étudier l'influence de la luminosité sur la fréquence des allèles, et conclure sur une possible sélection naturelle. On choisira le protocole 2.2. En effet, le protocole 2.1, le facteur environnemental étudié est l'alimentation, et non pas la luminosité. Le protocole 2.3 ne peut pas non plus être choisi, car il introduit une variabilité des fréquences alléliques dans chaque cage. Ainsi, en plus de la lumière, les fréquences alléliques initiales vont influencer leur propre devenir, empêchant toute conclusion sur l'effet de la luminosité seule.

6 Population - Sélection naturelle

Énoncé
p. 82

Lycée Jean-Pierre Vernant, Pins Justaret

À partir de sa découverte en 1848, la proportion de la forme noire du géomètre a augmenté jusqu'à atteindre 98% en 1960. Elle est ensuite restée stable jusqu'en 1960 (95%). Enfin, entre 1960 et 1975, la proportion de géomètres noirs a diminué de 13%, au profit de la forme claire (voir figure 3.15 page suivante).

L'évolution des proportions des deux formes de géomètres peut s'expliquer par des changements d'environnements dans la région de Manchester.

En effet, à partir du XVIII^e siècle, l'Angleterre a subi une forte industrialisation ; l'utilisation de charbon comme source d'énergie a engendré une forte pollution et la libération de particules sombres. Ces dernières se sont déposées sur les troncs des arbres, qui se sont assombris au milieu du XIX^e siècle. Les géomètres sombres se sont donc dissimulés plus facilement des prédateurs dans ces forêts, et ont donc été sélectionnés. En revanche, les géomètres de forme claire étant plus visibles sur des troncs sombres, ont probablement été chassés en grands nombres par des oiseaux prédateurs. Les géomètres sombres se sont donc davantage reproduits pendant ces années. La couleur du corps étant un caractère héréditaire, il y a ainsi eu sélection naturelle d'une forme de géomètre en raison de facteurs environnementaux abiotiques : la couleur des troncs.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

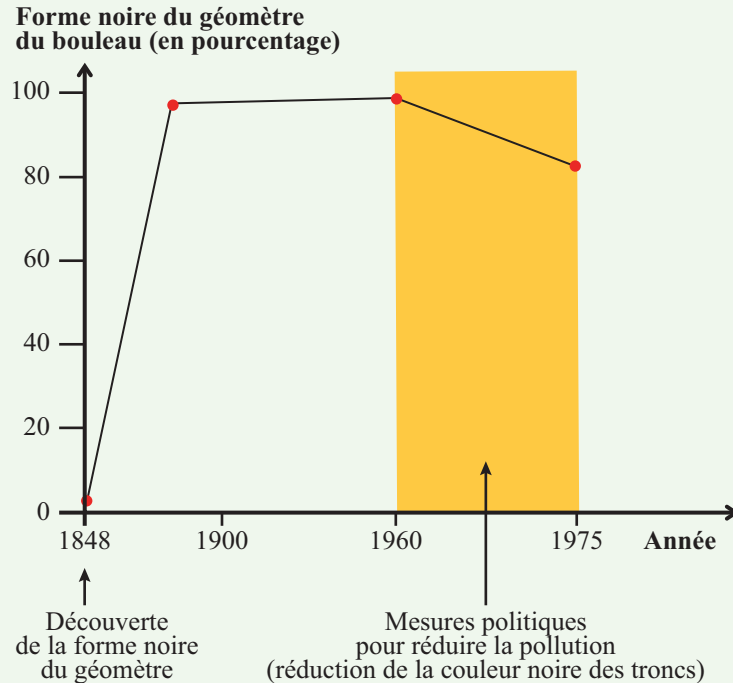


Figure 3.15 – Évolution approximative de la proportion de la forme noire du géomètre du bouleau entre les années 1848 et 1975

Or, à partir de 1960, des mesures ont été prises pour réduire la pollution. Ceci laisse suggérer que dès lors, moins de particules sombres ont été libérées, entraînant un éclaircissement des troncs d'arbres. Un processus inverse a donc possiblement eu lieu, avec une sélection des formes claires et donc une diminution de la proportion de formes sombres entre 1960 et 1975.

Ainsi, au sein de cet environnement instable en raison des activités de l'être humain, les proportions des formes de géomètres ont considérablement évolué, ce qui s'explique par la sélection naturelle.

7 Comportement - Diversification

Énoncé
p. 82

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1 Réponses exactes : **b** et **c**.

La réponse **a** est inexacte car il est indiqué dans le document 2 que les outils étaient trop gros pour avoir été utilisés par *Homo sapiens*.

La réponse **b** est correcte, comme suggérée par le document 2, selon lequel les chimpanzés actuels continuent d'utiliser les pierres comme outils pour consommer des noix.

La réponse **c** est correcte d'après le document 1. En effet, il y est indiqué qu'en captivité, lorsqu'une nouvelle connaissance est acquise, elle est rapidement transmise aux autres membres du groupe de chimpanzés.

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

- 2 On souhaite démontrer que de nouveaux comportements peuvent apparaître et se transmettre dans une population, sans recours à la voie génétique.

Dans la forêt de Taï, des scientifiques ont retrouvé des indices montrant qu'il y a 4 300 ans, les chimpanzés étaient probablement capables d'utiliser des pierres comme outils pour casser des noix. Aujourd'hui, les chimpanzés de ce site en sont toujours capables, ce qui laisse présager que ce comportement s'est transmis au cours de ces 4 300 ans. Or, ce comportement n'existe pas en d'autres sites, il est donc spécifique des chimpanzés de la forêt de Taï. Ainsi, ce comportement est apparu il y a plus de 4 300 ans dans la forêt de Taï et s'est transmis de génération en génération. De plus, en captivité, il a été démontré que des connaissances acquises par un membre d'un groupe de chimpanzé ont rapidement été transmises aux autres membres du groupe, sans que des transferts de gènes ne soient impliqués.

Ainsi, le fait d'utiliser des pierres comme outils pour casser des noix est un nouveau comportement, apparu dans la forêt de Taï et qui s'est transmis pendant plus de 4 300 ans, sans recours à la voie génétique.

8 Sélection naturelle

Énoncé
p. 84

Nouveau programme

- 1 Il est indiqué que les îles des Galapagos sont localisées à environ 1 000 kilomètres au large du continent. Les migrations sont donc limitées ici. Les îles des Galapagos représentent donc un environnement plus ou moins isolé.

2 MÉTHODE

On souhaite représenter l'évolution de deux variables au cours du temps. Il est possible de tracer deux ordonnées, l'une à droite et l'autre à gauche, et de les attribuer aux deux variables d'intérêt.

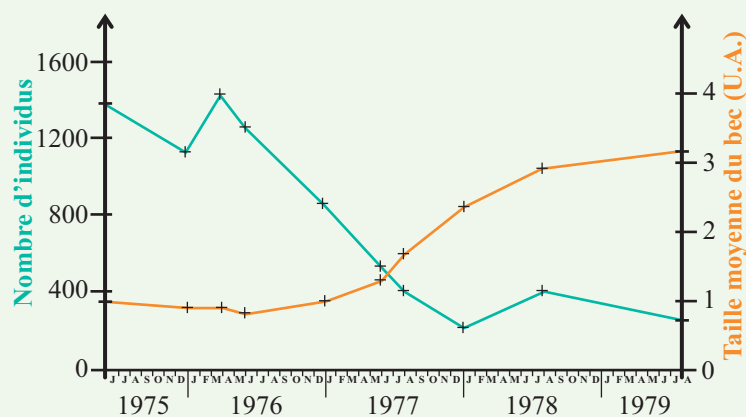


Figure 3.16 – Nombre de pinsons et taille moyenne de leur becs

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

- 3 On observe que l'effectif de la population de pinsons a diminué entre 1975 et 1978, passant de 1350 membres à moins de 300. En parallèle, la taille moyenne du bec des pinsons a presque triplé entre 1975 et 1979. Pour expliquer ces évolutions, on s'intéresse à l'environnement des pinsons. Les années 1975 et 1976 ont été particulièrement sèches, ce qui laisse suggérer que les végétaux à fruits juteux, contrairement aux végétaux à fruits secs, ont alors été peu productifs, ayant des besoins en eau conséquents.

On peut donc émettre l'hypothèse que suite à cette sécheresse, les pinsons se nourrissant normalement de fruits juteux et ayant un bec de plus petite taille sont probablement morts, ce qui explique l'augmentation de la taille moyenne du bec des pinsons. En revanche, les pinsons capables de se nourrir de fruits secs, c'est-à-dire ceux avec un bec large et puissant ont survécu. On a donc ici un exemple de sélection naturelle.

9 Population - Sélection naturelle

Énoncé
p. 84

Lycée Jean de la Fontaine, Paris

- 1 Réponse **c**. D'après le graphique, on voit qu'il y avait entre 2 et 10 % de rats résistants à la warfarine avant 1976.
- 2 Réponse **b**. Selon le document 1, l'enzyme VKOR permet effectivement la réduction de la vitamine K, réaction indispensable à la coagulation sanguine.
- 3 Réponse **d**. Le document 2 présente la séquence protéique, c'est-à-dire la séquence d'acides aminés, et non la séquence de nucléotides.
- 4 Réponse **d**. Est présentée l'évolution de la population des rats résistants à la warfarine, qui appartient à l'espèce des rats.
- 5 Réponse **c**. La warfarine fait pression sur les rats ; les rats résistants à la warfarine sont sélectionnés.
- 6 Réponse **d**. La warfarine a engendré la sélection des rats résistants, qui se sont donc reproduits davantage.

⚠ ATTENTION

La proposition « en 1976, certains rats ont évolué pour s'adapter à leur milieu » est finaliste : elle laisse supposer que les rats ont choisi de devenir résistants afin de s'adapter. C'est évidemment faux ! Certains rats étaient initialement résistants, et ont été sélectionnés suite à l'utilisation de la warfarine.

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

- 7 Réponse **a**. Les allèles permettant la résistance à la warfarine étaient déjà présents avant l'utilisation de la warfarine. A court terme, la warfarine est efficace pour lutter contre les rats. À long terme cependant, les rats résistants sont sélectionnés, rendant l'utilisation de la warfarine inefficace.
- 8 Réponse **b**. La résistance à la warfarine permet aux rats de survivre, leur donnant donc un avantage sélectif par rapport aux autres.

10 Association entre espèces

→ Énoncé
p. 87

Lycée Notre Dame du Grand Champ, Versailles

On s'intéresse ici à l'interaction entre deux espèces, la salamandre ponctuée (*Amblystoma maculatum*) et une algue (*Oophila amblystomatis*). Plus particulièrement, on souhaite comprendre les mécanismes à l'origine de cette interaction, et en quoi elle participe à une diversification du vivant.

Le premier document nous présente une observation microscopique de cellules musculaires d'embryon de salamandre ponctuée. On observe la présence d'une algue *Oophila* au sein même du cytoplasme de la cellule de salamandre. De plus, il nous est indiqué que la présence d'algues *Oophila* n'a jamais été observée à l'état libre. Ceci laisse donc présager d'une interaction étroite entre les deux organismes. Au vu de la localisation intracellulaire de l'algue, on peut supposer que cette interaction est une endosymbiose si elle présente des bénéfices réciproques, ou du parasitisme dans le cas contraire.

Deux expériences nous sont ensuite présentées.

Tout d'abord, on quantifie la pression partielle en dioxygène dans des oeufs de salamandres présents à des profondeurs diverses, en présence de lumière ou à l'obscurité. On observe qu'en présence de lumière, la pression partielle en dioxygène est assez élevée (environ 25 kPa), quelque soit la profondeur de l'œuf. Cependant, pour les œufs à l'obscurité, elle diminue à mesure que la profondeur augmente, passant de 20 kPa à la surface, à environ 0 kPa à partir de 15 mm de profondeur. L'algue possédant des chloroplastes (comme observé sur le document 1), on peut émettre l'hypothèse qu'elle est responsable de la différence de pression partielle en dioxygène selon la présence de lumière ou non. En effet, elle est capable de réaliser la photosynthèse en présence de lumière, conduisant à la production de dioxygène. Cette photosynthèse pourrait donc apporter un bénéfice pour les cellules de l'embryon hébergeant l'algue, notamment pour des profondeurs plus élevées.

Dans un second temps, le taux d'éclosion d'œufs de salamandres ponctuées est suivi au cours du temps dans trois conditions d'éclairement (obscurité totale, 12 heures d'éclairement et 12 heures d'obscurité, et éclairement constant). On remarque que dans le cas où l'éclairement est continu, la quasi totalité des œufs ont éclos à la fin de l'expérience. Dans les deux autres cas, on remarque que l'efficacité d'éclosion est plus faible, avec seulement 80% d'éclosion en

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

fin d'expérience. On en déduit donc que l'éclairement joue un rôle favorable sur l'éclosion des œufs de salamandres ponctuées. On peut suggérer que cela est dû à la présence de l'algue dans le cytoplasme des cellules de la salamandre : avec un éclairement maximal, la photosynthèse est réalisée de manière optimale. Ainsi, la salamandre tire un avantage certain de cette interaction. Il est de plus souligné que si l'embryon est extrait et que seule la masse gélatineuse reste, les algues ne se multiplient pas. Au contraire, ces dernières auraient besoin des déchets produits par l'embryon (déchets azotés, CO_2 etc.) pour se multiplier, suggérant que l'interaction est effectivement à bénéfices réciproques.

On a ainsi ici un exemple d'interaction durable hétérospécifique (entre deux organismes d'espèces différentes), et donc une symbiose (voire une endosymbiose). Cette interaction conduit donc à une diversification du vivant, permettant l'acquisition de fonctions nouvelles pour les deux membres concernés.

11 Diversité allélique - Sélection naturelle

Énoncé
p. 89

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

- 1 D'après le *document 1*, *Theba pisana* présente des allèles différents pour le gène responsable de la couleur des bandes : l'allèle B conduit à la formation de bandes claires et l'allèle N, de bandes foncées.
- 2 Le *document 2a* nous informe sur les proportions des différents escargots en 1960 au sein de la zone à oyats. On observe que les représentants majoritaires sont les escargots à coquille à bande foncée (plus de la moitié des escargots). Les escargots à coquille à bandes peu marquées sont moins nombreux et ce sont les escargots à coquille claire qui présente le plus faible effectif.

Le *document 2b* nous présente les mêmes informations en 2007 après la modification de la dune, maintenant subdivisée en deux. La première zone, la zone à oyat, présente les mêmes proportions que la dune de 1960. Cependant, pour la deuxième zone qui correspond à la plage, ce sont les escargots à coquille claire qui sont les plus nombreux (69%) suivis des escargots à coquille à bandes peu marquées et enfin les escargots à coquille à bandes foncées.

Une zone à oyat était aussi bien présente en 1960 qu'en 2007, les pourcentages de chaque phénotype présentés y sont les mêmes. Cependant, en 2007, dans la nouvelle zone de plage, les proportions sont assez différentes. On peut donc suggérer que l'environnement (oyats ou plage) joue sur la fréquence des phénotypes des escargots observés. On peut émettre l'hypothèse que la couleur des coquilles et la présence de bandes peut jouer un rôle dans la dissimulation des escargots face à de potentiels prédateurs.

L'INÉLUCTABLE ÉVOLUTION DES POPULATIONS • CHAP. 3

- 3** Le document 3 donne, pour chaque phénotype, les pourcentages d'escargots consommés par des Grives dans les deux zones (oyat et plage).

Dans la zone oyat, les escargots à coquilles unies claires sont davantage consommés (plus de 50%) et les moins consommés sont ceux à coquilles sombres (environ 10%). Dans la zone plage en revanche, c'est le contraire qui a lieu (avec moins de 5% pour les escargots à coquilles unies claires, et 55% pour ceux à coquille sombres). L'hypothèse formulée en question 2 s'avère donc vraie. Dans un fond uni (plage), présenter des bandes ne serait pas un avantage et empêcherait les escargots de se dissimuler face à des Grives. Ce serait le contraire dans la zone à oyats, avec les escargots à coquilles unies claires.

- 4** Ici, des facteurs environnementaux biotiques et abiotiques favorisent des individus présentant un caractère représenté par un allèle leur conférant un avantage pour leur survie, et héritable. On a donc de la sélection naturelle.

12 Spéciation

➔ Énoncé
p. 92

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

- 1** Au sein de la population des chenilles processionnaires du parc national de Leiria, deux populations cohabitent. Les deux présentent un cycle biologique distinct : la première population est constituée d'adultes qui émergent en mai avec un développement larvaire en été, alors que la seconde est composée d'adultes émergeant fin août avec un développement larvaire en automne-hiver. Le stade adulte de chaque population n'est donc pas acquis en même temps, ce qui suggère que les processionnaires ne peuvent se reproduire avec des processionnaires de l'autre population. En effet, dans le document, il est indiqué que les flux de gènes sont très faibles entre les deux groupes d'individus.

De plus, le fait d'avoir des cycles biologiques décalés suggère que les deux populations ne sont pas soumises aux mêmes pressions de sélection et vont donc, à terme, diverger génétiquement.

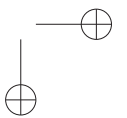
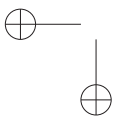
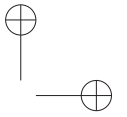
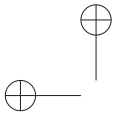
Une spéciation est donc probablement en cours chez les chenilles processionnaires du parc national de Leiria.

- 2** Cette spéciation a été permise par la naissance de chenilles « mutantes », présentant un cycle biologique décalé. N'atteignant pas le stade adulte en même temps que le reste des chenilles processionnaires, les échanges génétiques entre ces « mutants » et le reste des chenilles ont été réduits. Les chenilles des deux populations vivant au sein de la même forêt, on a donc un isolement reproducteur ayant lieu sans isolement géographique à l'origine de cette spéciation.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre

4

Le temps et les roches

Plan du chapitre

1. Introduction
2. La chronologie relative
3. La chronologie absolue
4. La construction de l'échelle des temps géologiques par chronologie relative et absolue

1 Introduction

Le temps est une notion primordiale en géologie, qu'il s'agisse d'estimer l'âge, la durée ou la vitesse des événements étudiés. Cet exercice est d'autant plus complexe que les durées considérées s'échelonnent depuis l'échelle de la milliseconde, perçue comme instantanée par l'être humain, au milliard d'années, très difficile à se représenter.

PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les techniques à la disposition du géologue pour reconstituer l'histoire de la Terre ?

Deux approches, complémentaires, peuvent être envisagées :

- déterminer si A a eu lieu avant ou après B (chronologie relative) ;
- déterminer la date à laquelle A s'est déroulé (chronologie absolue).

La combinaison de ces deux méthodes fournit une échelle des temps géologiques, référence internationale en terme d'histoire de la Terre.

2 La chronologie relative

Définition 1 : chronologie relative

Ensemble des techniques permettant d'ordonner des événements dans le temps sans pour autant leur donner un âge chiffré. La *chronologie relative* repose sur l'application de principes logiques et sur l'identification de fossiles.

PROBLÉMATIQUE

Dans quelle mesure les méthodes de chronologie relative permettent-elles de dater des objets géologiques les uns par rapport aux autres ?

2.1 Les relations géométriques entre objets géologiques révèlent leur ordre de dépôt et de déformation

Définition 2 : chronostratigraphie

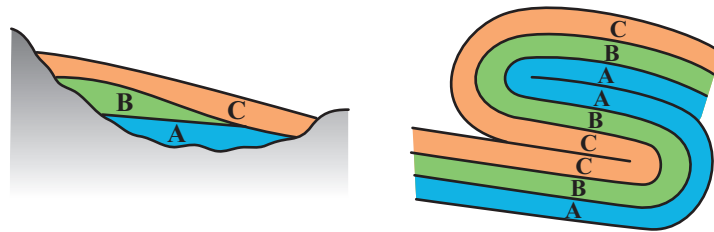
Branche de la chronologie relative basée sur l'étude de la succession des *strates géologiques* (couches sédimentaires et/ou dépôts et coulées volcaniques).

2.1.1 - Le principe de superposition

Définition 3 : superposition

Les strates géologiques se déposent les unes sur les autres. Une couche est donc plus récente que celles qu'elle recouvre et plus ancienne que celles qui la recouvrent.

Remarque : en terrain plissé ou faillé, ce principe est à utiliser avec précaution car il suppose de déterminer quelle était la couche la plus superficielle avant la déformation.



A s'est déposé avant B qui s'est déposé avant C

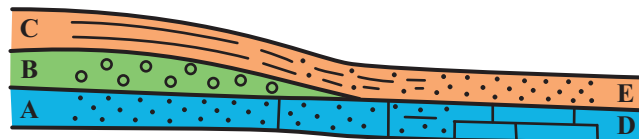
Figure 4.1 – Principe de superposition (à gauche) et problème des plis (à droite)

2.1.2 - Le principe de continuité latérale

Définition 4 : continuité

Une strate a le même âge sur toute son étendue.

Ceci permet notamment de suivre une strate d'un point à un autre, même si sa nature change ou qu'une autre couche est manquante.



La couche D s'est déposée en même temps que la couche A et la couche E en même temps que la couche C

Figure 4.2 – Principe de continuité

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

Ce principe est particulièrement utile si une couche a pu être datée précisément en un lieu mais que cette datation est impossible plus loin.

2.1.3 - Le principe de recoupement

Lorsqu'un élément recoupe ou provoque la transformation d'une structure géologique (on dit qu'il l'*affecte*), il lui est forcément postérieur. Inversement, il est antérieur aux formations géologiques qu'il ne recoupe ou n'affecte pas.

On distingue plusieurs cas :

- une intrusion magmatique est plus récente que les structures qu'elle recoupe et plus ancienne que celles qu'elle ne recoupe pas ;
- un pli est plus récent que les structures qu'il affecte et plus ancien que celles qu'il n'affecte pas ;
- une faille est plus récente que les structures qu'elle traverse et plus ancienne que celles qu'elle ne traverse pas ;
- une discordance (voir définition 5 suivante) est plus récente que les structures qu'elle recoupe et plus ancienne que les dépôts qui la recouvrent ;
- un épisode de métamorphisme est plus récent que les roches et structures qu'il affecte ;
- une roche magmatique est plus récente que les inclusions de roche qu'elle englobe (*voir aussi principe d'inclusion*).

Définition 5 : discordance

Situation issue du dépôt d'une strate géologique sur une *surface d'érosion* ayant préalablement mis à nu plusieurs structures différentes. Elle est repérable en coupe par un changement de géométrie (différent pendage des couches, disparition des plis et des failles) et sur une carte par la présence de *points triples* créés par la convergence de trois lignes.

En pratique, on dit qu'un élément est postérieur à la dernière structure qu'il affecte et antérieur à la première qu'il n'affecte pas (voir illustration page suivante).

2.1.4 - Le principe d'inclusion

Une roche magmatique est plus récente que les inclusions de roche qu'elle englobe. On peut par exemple citer les enclaves de péridotite dans les roches volcaniques.

➡ À RETENIR

Les relations géométriques (superposition, continuité, recoupement, inclusion) permettent de classer dans le temps les périodes de dépôts de strates géologiques et les événements géologiques les ayant affectés, quelle que soit leur nature ou l'échelle d'observation.

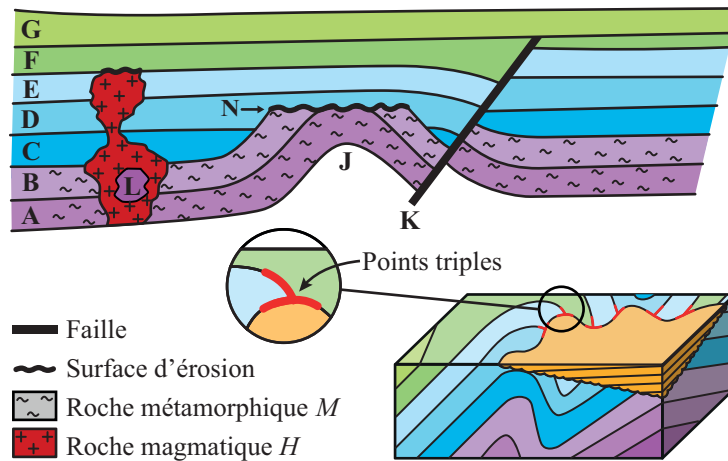
COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Voir exercices 5, 6, 12 et 13.

Remarque : les principes de datation relative s'appliquent aussi à l'observation de lames minces.



- L'inclusion H est plus récente que la strate E et plus ancienne que la strate F.
- Le pli J est plus récent que la strate B et plus ancien que la strate C.
- La faille K est plus récente que la strate E et plus ancienne que la strate G.
- La discordance N est plus récente que le pli J et plus ancienne que la strate D.
- Le métamorphisme M est plus récent que la strate B et plus ancien que la strate C.
- L'inclusion L est plus ancienne que le magma H.

Figure 4.3 – Principe de recoupement et schéma d'une discordance en 3D

2.2 Certains fossiles permettent d'identifier très précisément l'âge d'une roche sédimentaire

Les roches sédimentaires, issues du dépôt et de la consolidation de sédiments, sont les archives de la Terre. En particulier, les strates qui les composent enregistrent une petite portion de la biodiversité sous la forme de fossiles.

Définition 6 : biostratigraphie

Étude de la répartition des fossiles dans les strates sédimentaires, donc de leur succession au cours des temps géologiques.

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

La biodiversité est en perpétuel renouvellement. En particulier, il peut arriver qu'une espèce parvienne à coloniser la surface de la Terre en quelques centaines de milliers d'années, avant de rapidement laisser sa place par évolution ou extinction. Les fossiles de cette espèce donnent alors l'impression de « *faire leur apparition* » puis de « *disparaître* » brutalement dans l'enregistrement sédimentaire.

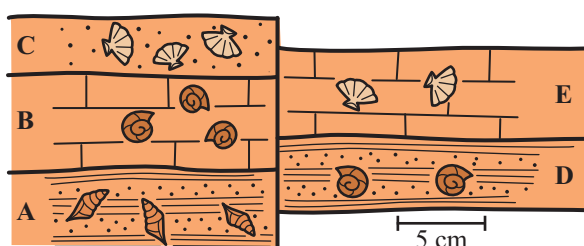
Dans le meilleur des cas, cette espèce fossile était abondante partout à la surface du Globe et a eu une durée d'existence relativement courte (quelques millions d'années maximum). Toutes les conditions sont alors réunies pour en faire un excellent moyen d'identification des couches sédimentaires qui la contiennent.

Définition 7 : fossile stratigraphique

Fossile présentant une grande extension géographique et une durée d'existence brève à l'échelle des temps géologiques, et dont l'apparition et/ou la disparition sont précisément associées à des limites de couches sédimentaires.

Définition 8 : principe d'identité paléontologique

Deux strates contenant le même assemblage de fossiles stratigraphiques ont le même âge.



La couche D a le même âge que la couche B et la couche E a le même âge que la couche C

Figure 4.4 – Principe d'identité paléontologique

Remarque : ceci est surtout valable depuis l'*explosion Cambrienne*, grande diversification des formes de vie fossilisables qui marque le début du *Phanérozoïque* (signifiant « vie visible ») vers 540 Ma. Les archives géologiques sont toutefois énormément lacunaires : la plupart des êtres vivants se fossilisent très mal ou ne rencontrent pas les conditions favorables à leur préservation. Et même si c'est le cas, l'immense majorité des sédiments qui les renferme est détruite par les événements tectoniques.

À RETENIR

La biostratigraphie permet d'attribuer un fossile ou un assemblage de fossiles stratigraphiques à tout moment du Phanérozoïque.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

3 La chronologie absolue

PROBLÉMATIQUE

Comment assigner des âges précis aux unités biostratigraphiques identifiées ?

Définition 9 : chronologie absolue

Méthode de datation quantitative permettant d'assigner à un événement un âge ou une durée, exprimés en milliers d'années (Ka), millions d'années (Ma) ou milliards d'années (Ga).

Remarque : le terme *absolu* s'oppose à *relatif*. Il ne renseigne en aucun cas sur la précision des résultats, qui sont donnés avec une certaine incertitude.

Il existe une grande variété de méthodes de datation absolue : l'observation des alternances de composition dans les dépôts marins (à chaque marée, chaque lune, chaque équinoxe...); la *dendrochronologie*, basée sur les cernes annuels des arbres, etc. Nous nous focaliserons ici sur la datation absolue obtenue grâce aux éléments radioactifs.

3.1 La désintégration des éléments radioactifs, une horloge de précision

La lithosphère contient de nombreux éléments susceptibles de subir des désintégrations radioactives : c'est le cas de l'uranium U, du rubidium Rb, du thorium Th mais aussi d'un isotope du potassium, le ^{40}K .

Définition 10 : radio-isotope

Atome radioactif dont le noyau, instable, a tendance à se désintégrer pour donner un atome fils dit *radiogénique*.

Le moment de la désintégration d'un noyau donné est impossible à connaître. Toutefois, pour un très grand nombre d'atomes, le nombre total de désintégrations par intervalle de temps est statistiquement déterminé.

Soit $P(t)$ un nombre de noyaux d'une espèce radioactive (éléments père) présents dans un échantillon, qui se désintègrent en éléments radiogéniques F (éléments fils).

La quantité d'élément père à un instant t , $P(t)$, ne dépend que de sa valeur initiale P_0 et de sa vitesse de désintégration λ (lambda), appelée *constante de désintégration radioactive* :

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (1)$$

Les éléments radioactifs et radiogéniques n'ayant pas la même masse, il est possible de les quantifier à l'aide d'un spectromètre de masse.

On peut alors utiliser cette dernière relation pour déduire t .

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

Définition 11 : radiochronologie

Méthode de chronologie absolue basée sur le rythme de désintégration d'un radio-isotope, appelé *radiochronomètre*.

Chaque couple (élément père – élément fils) peut être caractérisé par sa demi-vie ou *période radioactive* $T_{1/2}$, temps au bout duquel le nombre initial d'éléments pères présents dans tout échantillon aura été divisé par 2.

Remarque : la valeur de cette période dépend directement de la constante radioactive λ propre au couple P-F :

$$P(T_{1/2}) = \frac{P_0}{2} \iff T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (2)$$

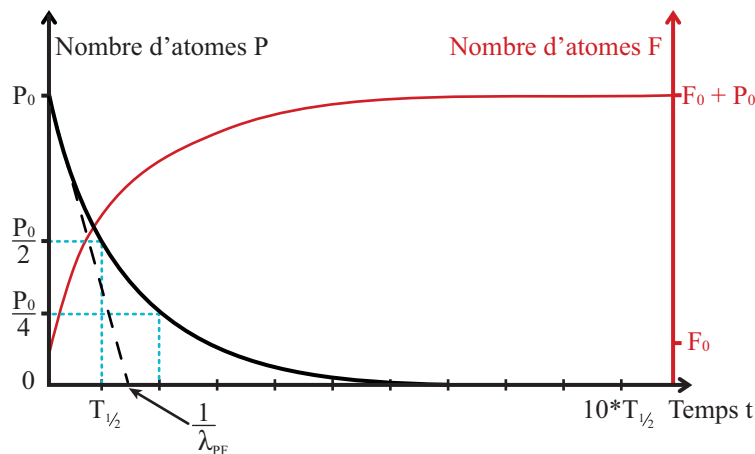


Figure 4.5 – Décroissance en un élément radioactif P de constante de désintégration radioactive λ_{P-F}

À RETENIR

L'application de la loi fondamentale de la radioactivité donne accès au temps qui s'écoule : pour chaque radiochronomètre, le nombre d'éléments pères est précisément divisé par 2 toutes les $T_{1/2}$ années.

3.2 De multiples chronomètres se déclenchent au cours des événements géologiques

L'équation (1) est valable pour un *système fermé*, qui n'établit pas d'échanges d'atomes avec son environnement :

- le nombre d'isotopes stables est constant ;
- les radio-isotopes P qui se désintègrent deviennent tous des éléments radiogéniques F.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Définition 12 : isotope stable (en géochimie)

Isotope non radioactif et non radiogénique.

Remarque : ici, le système est un échantillon de roche.

Dans la nature, il est très fréquent que les roches soient sous la forme de systèmes ouverts : situation de fusion partielle, de métamorphisme, d'hydratation, etc. Certains radiochronomètres sont alors remis à 0, et se déclenchent de nouveau lorsque les conditions de pression-température passent au-dessous d'un certain seuil : on dit qu'on passe le *seuil de fermeture du système*.

Remarque : ce seuil varie à la fois selon les minéraux et selon les radio-isotopes considérés. Des mesures effectuées sur une même roche, avec différents chronomètres ou sur différents minéraux, peuvent ainsi fournir des valeurs disparates.

Voir exercice 14.

Tout épisode de magmatisme ou de métamorphisme caractérisé par le franchissement du seuil de fermeture de certains systèmes déclenche successivement une grande variété de radiochronomètres. Le géologue doit alors en trouver un qui soit adapté à son étude.

En particulier, au bout de $10 \times T_{1/2}$, il ne reste que 0.01% du nombre initial d'éléments père, ce qui rend sa mesure difficile et peu précise. On essaie donc de choisir un radiochronomètre pour lequel $T_{1/2}$ est de l'ordre de l'âge qu'on s'attend à trouver.

Exemples

- le couple rubidium–strontium (Rb–Sr) a une demi-vie de 49.23 Ga, ce qui lui permet de dater des événements de l'âge de la Terre mais le rend peu précis pour des événements plus jeunes qu'une centaine de millions d'années ;
- inversement, la datation carbone–azote dite *Carbone 14*, avec sa demi-vie de 5730 ± 40 ans, devient peu fiable pour des âges de plus de 50 000 ans.

► POUR ALLER PLUS LOIN

Tout être vivant incorpore une certaine quantité de ^{14}C radioactif. À sa mort, il cesse d'en assimiler : c'est la fermeture du système. La technique « Carbone 14 » est donc une des rares qui permet de dater des roches sédimentaires, via les restes carbonés qu'elles contiennent (charbons, coquilles, os, etc.).

↻ À RETENIR

Tout événement géologique déclenche une grande variété de radiochronomètres, parmi lesquels le géologue doit choisir le mieux adapté selon la nature de la roche, la température de fermeture du système étudié et l'âge de l'événement, estimé par chronologie relative.

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

3.3 Méthode directe lorsqu'on connaît une quantité initiale d'atomes

POUR ALLER PLUS LOIN

En système fermé, les éléments P qui se sont désintégrés ($P_0 - P_t$) ont tous donné des éléments F :

$$F(t) = (P_0 - P_t) + F_0 \quad (3)$$

On peut extraire P_0 de l'équation (1) pour obtenir :

$$F(t) = (e^{\lambda t} - 1) P_t + F_0 \quad (4)$$

On a alors deux inconnues : F_0 et t .

Si l'on connaît la quantité initiale F_0 ou P_0 , la loi fondamentale de la radioactivité possède une seule inconnue : l'âge de l'échantillon.

On utilise alors la relation (1) pour trouver t :

$$t = \frac{1}{\lambda} \times \ln \left(1 + \frac{F(t)}{P_t} \right) \quad (5)$$

Exemple : le radiochronomètre K-Ar est utilisé pour dater des roches magmatiques ou métamorphiques riches en potassium. Le potassium, élément radioactif père, se désintègre en argon, élément radiogénique fils. Dans ce système, l'argon étant gazeux, la quantité initiale d'éléments fils peut être considérée comme nulle au moment de la fermeture du système, soit $F_0 = 0$. La période de ce géochronomètre étant de 1,31 Ga, il permet de dater des roches très anciennes.

3.4 La méthode isochrone

La quantité initiale d'atomes étant souvent impossible à estimer, on peut éliminer cette inconnue en mesurant plusieurs échantillons : on parle de *méthode isochrone*.

On s'intéresse par exemple au couple Rb-Sr : le ^{87}Rb radioactif, le ^{87}Sr radiogénique qu'il produit et le ^{86}Sr , isotope stable.

POUR ALLER PLUS LOIN

L'équation (4) donne :

$$\left(^{87}\text{Sr} \right)_t = (e^{\lambda \cdot t} - 1) \cdot \left(^{87}\text{Rb} \right)_t + \left(^{87}\text{Sr} \right)_0 \quad (6)$$

Les rapports isotopiques sont plus faciles à mesurer avec un spectromètre de masse que les quantités absolues. Pour obtenir de tels rapports, on peut diviser tous les membres de (6) par une quantité d'isotope stable.

Remarque : cette opération est possible car en système fermé, le nombre de noyaux stables non radiogéniques est constant avec le temps.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

À partir de l'équation (4), on trouve :

$$\left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}\right)_t = (e^{\lambda \cdot t} - 1) \times \left(\frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}}\right)_t + \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}\right)_0 \quad (7)$$

$$\rightarrow y = a \times x + b$$

Soit, pour t donné, l'équation d'une droite.

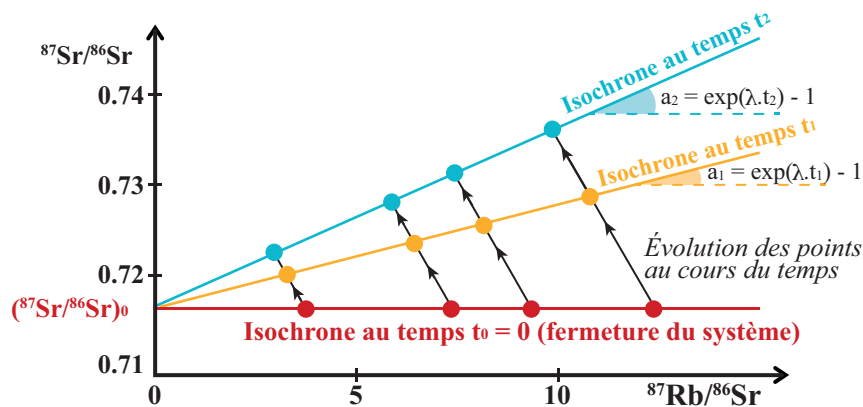


Figure 4.6 – Origine et utilisation de la droite isochrone (voir ci-dessous)

POUR ALLER PLUS LOIN

Au moment de la formation de la roche, le rapport initial $({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_0$ est le même pour tous les cristaux. En revanche, chacun incorpore une quantité différente de Rb et de Sr selon sa chimie, aboutissant à des rapports $({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})_0$ variables. C'est pourquoi leurs compositions initiales sont alignées sur une droite horizontale dans le diagramme $({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}) = f({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})$.

Avec le temps, chaque cristal perd d'autant plus de ${}^{87}\text{Rb}$ et gagne d'autant plus de ${}^{87}\text{Sr}$ qu'il avait initialement de ${}^{87}\text{Rb}$ donc que son rapport $({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})_0$ était grand. Les points restent ainsi alignés sur une droite, mais celle-ci est de plus en plus pentue.

Définition 13 : droite isochrone (« même-âge »)

Droite d'équation $y = ax + b$ reliant tous les minéraux d'un même âge dans ce diagramme.

Le coefficient directeur a de la droite isochrone, donné par l'équation (8), vaut $a = (e^{\lambda \cdot t} - 1)$. Mesurer la pente de la droite isochrone permet ainsi de déterminer l'âge t de la roche :

$$t = \frac{\ln(a + 1)}{\lambda} \quad (8)$$

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

Voir exercices 4, 8 et 11.

Remarque : l'utilisation du géochronomètre rubidium-strontium convient pour les âges plus anciens. Sa demie-vie étant de 49 Ga, le système doit être fermé depuis près de 100 Ma pour que ses variations de concentration puissent être convenablement mesurées.

À RETENIR

La radiochronologie donne accès au temps écoulé depuis la fermeture du système d'un échantillon de roche : directement si les conditions initiales peuvent être estimées ; indirectement sinon, via la *méthode isochrone*.

3.5 Méthode concordia / discordia

Certains minéraux, tels que le zircon, peuvent incorporer de petites quantités d'uranium radioactif (^{238}U et ^{235}U) qui se désintègrent en plomb (^{206}Pb et ^{207}Pb , respectivement). Le plomb contenu dans ce minéral provient uniquement de la désintégration de l'uranium (autrement dit $^{206}\text{Pb}_0 = 0$ et $^{207}\text{Pb}_0 = 0$).

Remarque : le zircon est un minéral très résistant, permettant de dater les premières roches de la Terre, formées il y a plus de 4 milliards d'années.

Les valeurs de λ sont différentes pour ces deux désintégrations, ce qui permet d'utiliser conjointement les deux radiochronomètres $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ et $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ pour dater la formation d'une roche. Pour cela, on construit au préalable une courbe de référence, appelée *concordia*. Les points de cette courbe représentent toutes les combinaisons possibles des rapports $x = ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ et $y = ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ qui donnent des âges identiques avec les deux méthodes de datation. Si le système n'a pas été perturbé, les valeurs de ces rapports isotopiques d'un échantillon sont situées à un point donné de la courbe, qui correspond à la durée écoulée depuis que le système est clos. Si en revanche du plomb a été perdu, généralement au cours d'un épisode de métamorphisme, il y a discordance entre les âges trouvés par les deux chronomètres. Sur le diagramme page suivante, les échantillons s'alignent alors sur une droite intersectant la *concordia* au niveau de l'âge de la réouverture du système et de l'âge initial du minéral : on parle de *discordia*.

Voir illustration page suivante.

Exemple : l'intersection supérieure de la discordia et de la concordia (1,5 Ga sur la figure) permet d'obtenir l'âge de la fermeture du système (crystallisation des zircons dans le magma), et l'intersection inférieure (0,5 Ga sur la figure) date la réouverture du système, par exemple un épisode métamorphique.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

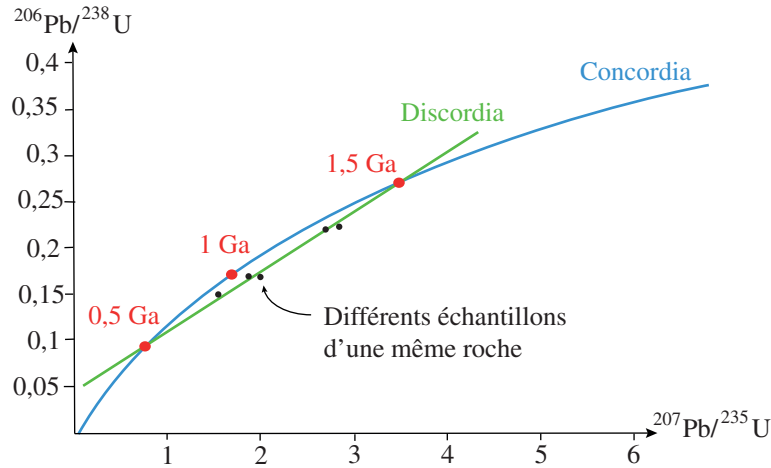


Figure 4.7 – Détermination de l'âge d'une roche par la méthode concordia-discordia

4 La construction de l'échelle des temps géologiques par chronologie relative et absolue

Pour pouvoir discuter entre eux, les géologues doivent pouvoir faire référence à tout moment de l'histoire de la Terre selon une nomenclature universelle précisément datée.

? PROBLÉMATIQUE

Comment articuler les différentes méthodes de chronologie pour construire une échelle de référence des temps géologiques ?

4.1 Le découpage des temps par chronostratigraphie

? PROBLÉMATIQUE

Quels éléments choisir pour découper l'échelle des temps ?

Les études biostratigraphiques suggèrent que le renouvellement des espèces à la surface de la Terre n'est pas toujours graduel. Parfois, il est possible d'identifier des bouleversements en apparence brutaux de la biodiversité fossile, appelés *crises*.

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

Définition 14 : crise de la biodiversité

Modification durable, globale et brutale du contenu paléontologique dans les sédiments, se manifestant par une *discontinuité* dans l'enregistrement sédimentaire.

Ces crises servent alors de repères pour hiérarchiser le découpage des temps géologiques : des crises n'affectant que quelques taxons (groupes d'êtres vivants) délimitent les *étages*, tandis que des crises affectant tous les taxons servent de limites aux *ères*.

Voir exercice 10.

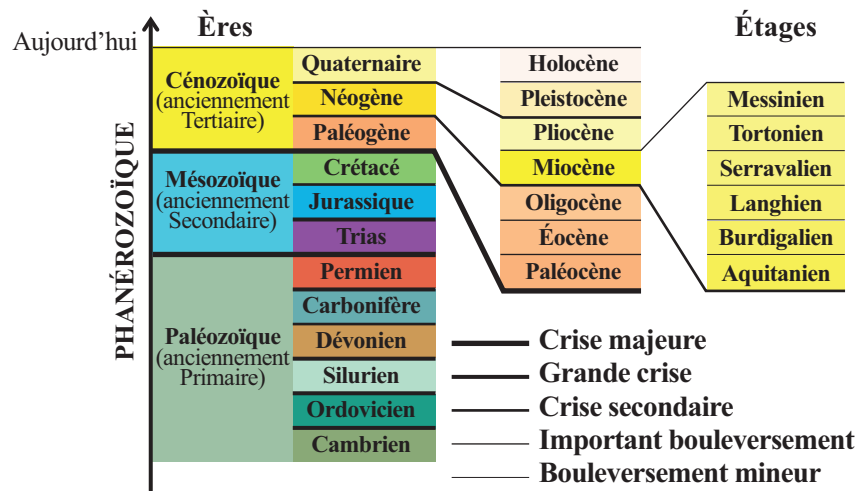


Figure 4.8 – Découpage du Phanérozoïque en trois ères et zoom sur les étages du Miocène

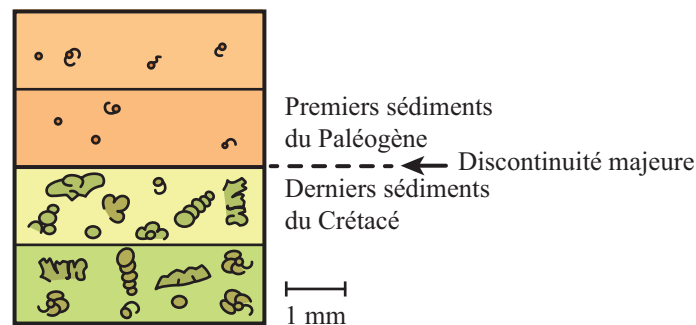


Figure 4.9 – Schéma de quelques microfossiles servant de marqueurs stratigraphiques pour la crise Crétacé-Paléogène il y a 65 Ma

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Définition 15 : étage

Unité de base de la chronostratigraphie. Il en existe une centaine au Phanérozoïque. Leurs noms évoquent un endroit du monde où est particulièrement visible l'assemblage biostratigraphique choisi pour les caractériser. Ces endroits sont alors repérés par un clou d'or, planté dans le sédiment au niveau de la discontinuité précédente.

Exemple : l'étage du Lutécien est défini à Paris (de Lutetia, son nom latin); le Turonien à Tours (Indre-et-Loire); le Toarcien à Thouars (Deux-Sèvres), etc.

À RETENIR

L'identification de grandes crises de la biodiversité, sur la base de critères paléontologiques, a permis d'« échelonner » des coupures plus ou moins importantes tout au long de l'histoire de la Terre, donnant naissance à l'échelle des temps géologiques.

Remarque : en classe de première, la longue histoire de la découverte de l'âge de la Terre a mis en évidence que le chiffre de 4.568 Ga n'a pas toujours fait consensus. À l'époque où ces discontinuités ont été définies, les écrits bibliques interdisaient un âge de plus de quelques milliers d'années. Les géologues, pour s'y plier, proposaient une succession rapide des 24 grandes crises qu'ils avaient discernées : tous les 250 ans en moyenne. Cette apparente brutalité fonda le courant catastrophiste, qui a longtemps tenu tête à la théorie de l'évolution.

La chronologie relative a permis d'établir un découpage très précis des temps géologiques, mais en l'absence de moyens de datation pour ancrer cette chronologie, il est impossible de savoir combien de temps s'est écoulé entre deux étages ni combien ils ont duré...

4.2 L'ancrage de l'échelle des temps géologiques par chronologie relative et absolue

Les méthodes de chronologie absolue permettent de donner un âge chiffré aux inclusions magmatiques ou aux coulées de lave se superposant ou affectant les strates identifiées par biostratigraphie. Ces dernières se voient alors attribuer une fourchette d'âge par chronologie relative.

Définition 16 : géochronologie

Science de la datation des objets géologiques, basée sur l'ancrage des unités chronostratigraphiques par chronologie absolue.

Généralement, plus les événements datés sont vieux, plus l'encadrement des âges fournis par chronologie absolue est large.

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

Exemple : il est très difficile de discerner par chronologie absolue deux strates proches de sédiments marins du Trias, datées à ± 1 Ma près, tandis que l'identification de fossiles stratigraphiques, associée aux principes de superposition et de continuité, permet de les caractériser très précisément.

Chaque année, l'Union Internationale des Sciences Géologiques (UIGS) publie une nouvelle échelle des temps géologiques ou *Charte stratigraphique internationale*, pour laquelle l'âge des coupures a été affiné ou corrigé par de nouvelles mesures ou découvertes.

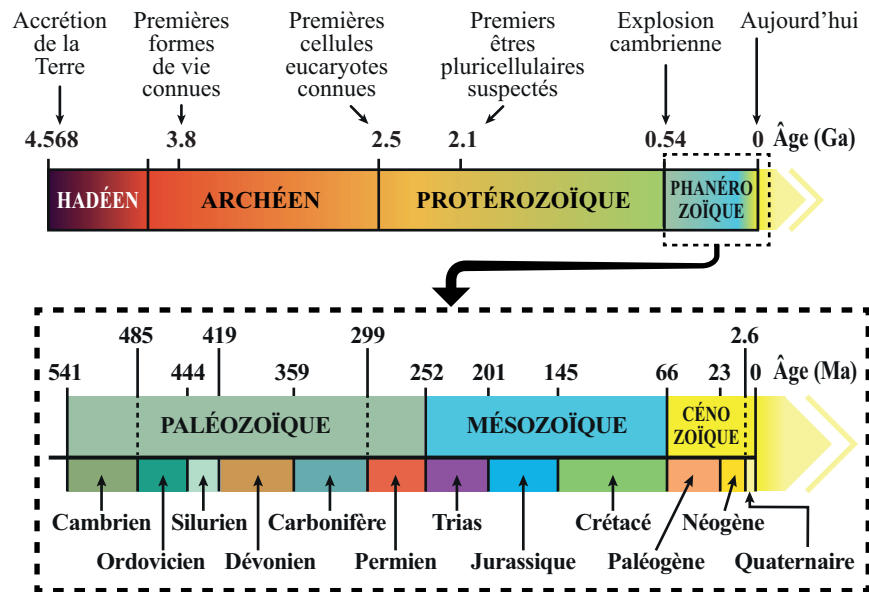


Figure 4.10 – L'échelle des temps géologiques : principaux découpages du Phanérozoïque et contextualisation dans l'histoire géologique de la Terre

Remarque : en pratique, il est trop complexe, trop onéreux voire impossible pour un géologue d'effectuer la datation absolue de ses observations. Il fait alors appel à la chronologie relative par rapport à un autre événement dont l'âge est repéré sur l'échelle des temps géologiques.

Voir exercices 9 et 13.

À RETENIR

Les deux branches de la géochronologie sont parfaitement complémentaires : la chronologie absolue fournit plus ou moins précisément l'âge d'événements géologiques dont la succession peut être rigoureusement déterminée par chronologie relative.

L'échelle des temps géologiques, référence mondiale en terme d'histoire de la Terre, est le fruit de la collaboration fine entre chronologie relative et absolue.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

Corrigé
p. 128

Choisissez la ou les réponse(s) exacte(s) :

- 1** La période d'un élément radioactif correspond :
 - ☐ a au temps au bout duquel on retrouve la même quantité d'éléments pères qu'au départ ;
 - ☐ b au temps au bout duquel il reste la moitié des éléments pères de départ ;
 - ☐ c à la quantité d'éléments pères restants au bout d'un million d'années.
- 2** Pour pouvoir dater de manière absolue un échantillon, il faut connaître la quantité d'éléments pères :
 - ☐ a lors de la formation de l'échantillon ;
 - ☐ b à l'heure actuelle ;
 - ☐ c lors de la formation de l'échantillon et actuellement.
- 3** On peut connaître l'âge d'un granite :
 - ☐ a en mesurant les rapports $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ dans les minéraux de ce granite ;
 - ☐ b en mesurant la quantité initiale de rubidium et de strontium dans ce granite ;
 - ☐ c en mesurant les rapports $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans les minéraux de ce granite.
- 4** Lors du vieillissement d'un granite contenant du rubidium :
 - ☐ a les rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diminuent dans les différents minéraux ;
 - ☐ b les rapports isotopiques $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ diminuent dans les différents minéraux ;
 - ☐ c la quantité de ^{86}Sr reste constante.

2 V/F Vérification des connaissances

5 min

Corrigé
p. 128

Vrai ou faux ?

- 1** Le principe de recoupement s'applique à la fois aux roches et aux événements ayant affecté les roches.
- 2** Les roches sédimentaires sont toujours placées les unes au-dessus des autres dans l'ordre chronologique de leur dépôt.
- 3** La loi de décroissance des éléments radioactifs permet la datation absolue d'objets géologiques.

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

3 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 129

Qui suis-je ?

- 1 L'élément fils issu de la désintégration du rubidium.
- 2 Un élément stable et non radiogénique indispensable à la datation d'une roche par la méthode rubidium-strontium.
- 3 Une figure géométrique exploitée pour obtenir l'âge d'une roche à l'aide du couple rubidium-strontium.
- 4 Le temps au bout duquel l'effectif d'une population de noyaux radioactifs est divisé par deux.

4 Âge — Granite



10 min

Corrigé
p. 129

Lycée Bachelard, Chelles

Dans un granite qui affleure en domaine continental, on mesure les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ de plusieurs minéraux.

$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
2.56	0.72103
2.99	0.72321
3.18	0.72381
3.59	0.72537
3.71	0.72597
5.01	0.73135
4.79	0.73029
4.64	0.73009

Tableau 4.1 – Rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ de plusieurs minéraux

Grâce aux données présentées dans le tableau et en utilisant la méthode de la droite isochrone, déterminez l'âge de ce granite.

5 Datation relative



10 min

Corrigé
p. 129

Lycée Évariste Galois, Sartrouville

À partir de la figure 4.11 représentée page suivante, répondre aux questions.

- 1 De quels phénomènes géologiques la région a-t-elle été le théâtre ?
- 2 Datez ces phénomènes les uns par rapport aux autres.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

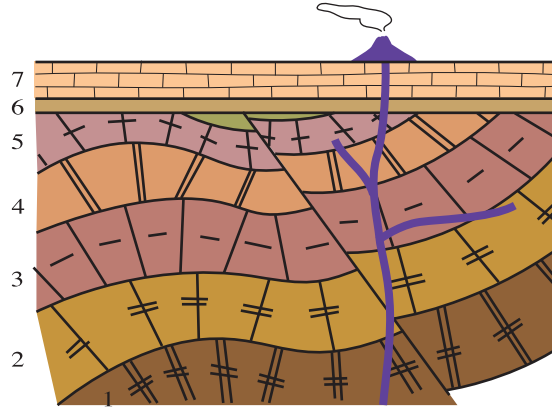


Figure 4.11 – Coupe géologique (couches 1 à 7 : roches sédimentaires)

6 Datation relative



15 min

Corrigé
p. 130

Lycée Lumière, Luxeuil

On se propose de dater les terrains et les événements d'une région dont voici la coupe géologique :

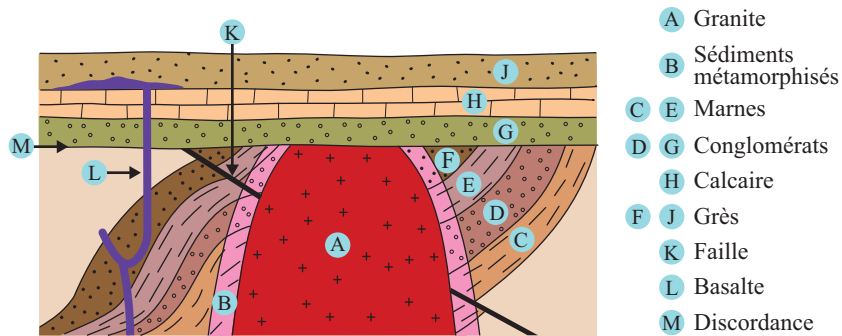


Figure 4.12 – Coupe géologique

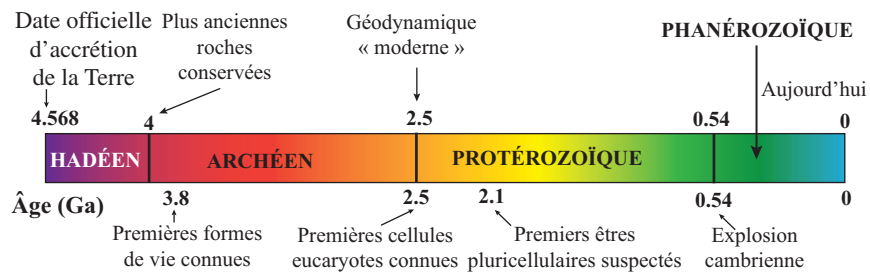


Figure 4.13 – Échelle des temps géologiques simplifiée

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

Proposez une chronologie relative justifiée des terrains et des événements lisibles sur la coupe, sachant que les marnes C et E ont révélé des fossiles du Permien et du Dévonien, respectivement.

7 Vérification des connaissances



15 min

Corrigé
p. 131

Répondez brièvement aux questions suivantes :

- 1 Quels sont les intérêts et les limites de la datation relative par rapport à la datation absolue ?
- 2 En quoi les différentes méthodes de radiochronologie se distinguent-elles ?

8 Âge – Chondrite – Granite



15 min

Corrigé
p. 132

Lycée Marseilleveyre, Marseille

À l'aide des documents A, B et C, présentez comment on peut dater la météorite chondritique et le granite γ . Aucun calcul n'est à effectuer.

Document A

Très rapidement après sa découverte, la radioactivité a été utilisée pour dater de manière absolue l'âge des roches et des événements géologiques. Une méthode de datation classique repose sur la désintégration spontanée du rubidium 87 en strontium 87. Le temps de demi-vie du ^{87}Rb , noté $T_{1/2}$ est de 49.5 Ga. L'équation sur laquelle est fondée la méthode est :

$$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})(e^{\lambda t} - 1) + (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$$

La constante de désintégration radioactive d'un élément, notée λ , est donnée par l'équation :

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

Document B : données concernant la météorite chondritique

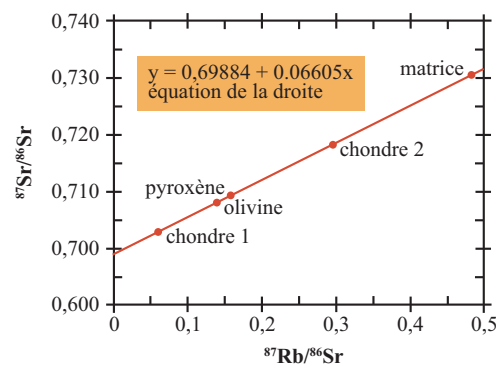


Figure 4.14 – Mesure des rapports isotopiques de différents fragments d'une météorite de type chondritique

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Document C : données concernant le granite γ

	^{87}Rb	^{86}Sr	^{87}Sr
Orthose	110	26.8	19.9
Mica noir	107	2.1	2.4
Mica blanc	93	3.1	3

Tableau 4.2 – Concentrations isotopiques des minéraux du granite
($\times 10^{19}$ atomes. mg^{-1})

9 Datation – Granites



15 min

Corrigé
p. 132

Lycée Marseilleveyre, Marseille

Dans un massif ancien érodé du domaine continental, deux granites (notés X et Y) sont présents au milieu de roches sédimentaires (notés A et B). Exploitez méthodiquement le corpus documentaire proposé de manière à classer du plus vieux au plus jeune les formations A, B, X et Y ainsi que la surface Z, dont vous préciserez la nature.

Document A : situation en coupe

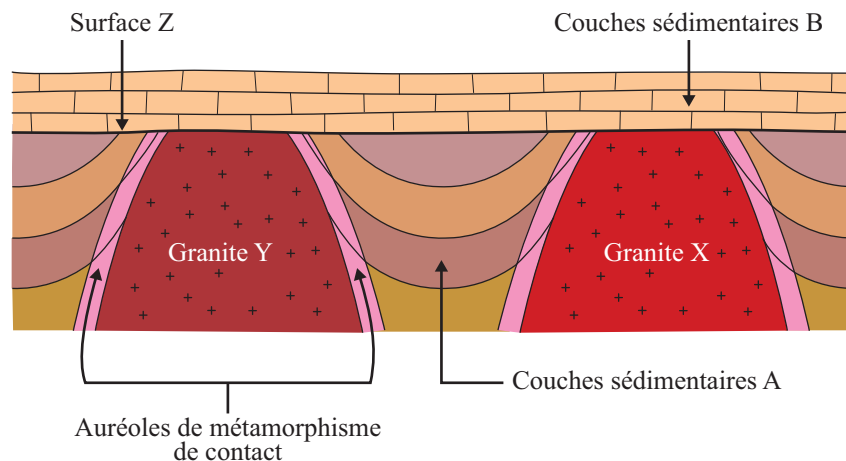


Figure 4.15 – Coupe des formations géologiques rencontrées dans une région de France

Document B : méthodes des isochrones appliquée aux granites X et Y

Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ pour les minéraux des granites ont été obtenus au spectromètre de masse. Pour chaque granite, les résultats des mesures sont reportés sur les graphiques ci-dessous : on a construit une droite à partir des couples de rapports isotopiques ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) mesurés dans les différents minéraux du granite. La droite obtenue est qualifiée de droite isochrone.

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

L'âge d'une roche magmatique déterminé à partir des rapports isotopiques $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est donné par la formule :

$$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (e^{\lambda t} - 1) (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}) + (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$$

t : âge de la roche

λ : constante de désintégration pour le couple Rb-Sr ($\lambda \approx 1.4 \times 10^{-11} \text{ an}^{-1}$)

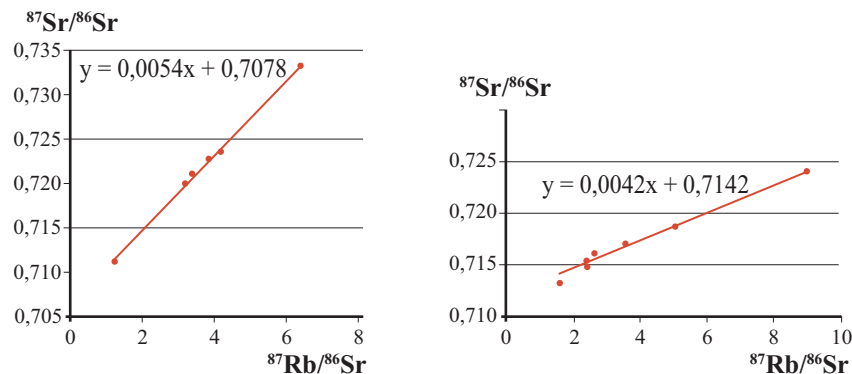


Figure 4.16 – Droites isochrones pour les granites X (à droite) et Y (à gauche)

10 Discontinuité Crétacé/Paléogène



15 min

Corrigé
p. 133

Lycée Thiers, Marseille

Identifier une crise biologique suppose que l'on repère dans les couches géologiques des modifications synchrones affectant, sur l'ensemble du globe, les espèces du milieu continental et du milieu marin.

Relevez de tels faits rapportés dans le document proposé et expliquez pourquoi on a choisi la limite Crétacé-Paléogène pour séparer l'ère Mésozoïque de l'ère Cénozoïque.

Indications :

- Triceratops : espèce de dinosaure terrestre ;
- *Globigerina pseudobulloides* : espèce de foraminifère marin, planctonique, caractéristique du Paléocène ;
- Paléocène : première époque du Paléogène.

Remarque : aucun reste de fossile de dinosaure non avien n'est connu dans le monde depuis le début du Paléocène.

Voir illustration page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

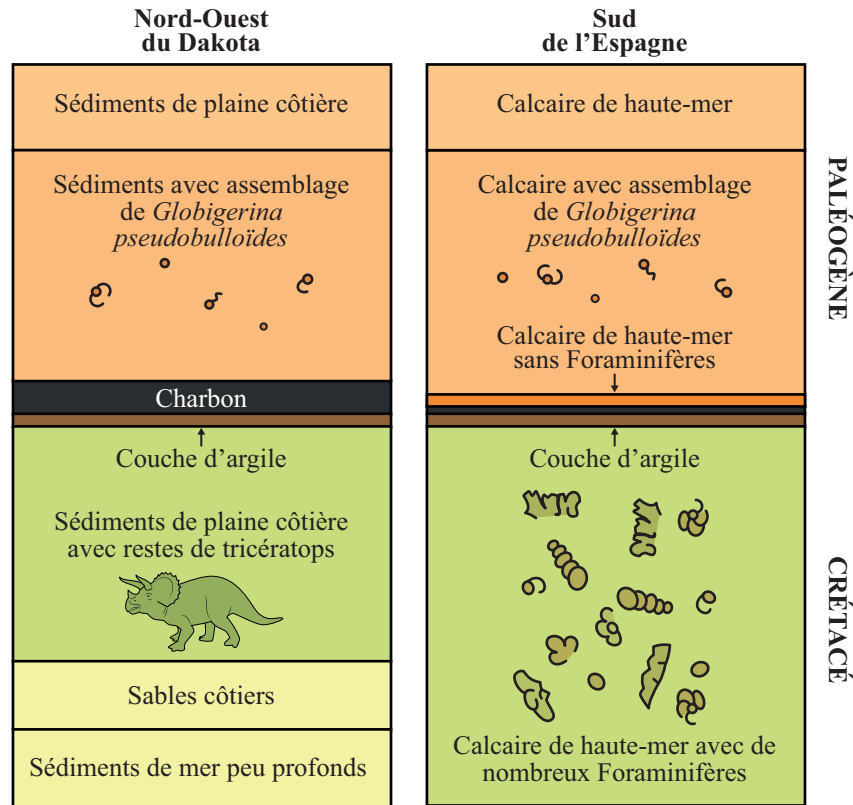


Figure 4.17 – Succession des strates et de leur contenu de part et d'autre de la limite Crétacé-Paléogène dans deux sites : l'un terrestre (Dakota, Amérique du Nord), l'autre marin (sud de l'Espagne)

11 Datation absolue



20 min

Corrigé
p. 134

Lycée Bachelard, Chelles

- Rappelez les conditions nécessaires à la datation absolue d'un échantillon naturel.
- Le potassium 40 est radioactif. Sa demi-vie $T_{1/2}$ est de 1.25 milliards d'années. Le rubidium 87 se désintègre en strontium 87 avec une demi-vie de 49.5 milliards d'années. À quoi correspond la demi-vie ?
- On rappelle que le nombre d'éléments pères dans un système clos évolue selon l'équation $P(t) = P_0 \cdot e^{-\lambda t}$. À partir de cette expression, montrez que la constante de désintégration radioactive λ vaut $\ln(2)/T_{1/2}$.
Donnez la constante de désintégration λ de chacun de ces couples de radioéléments.

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

- 4 Dans un granite, on mesure les rapports ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$) pour plusieurs minéraux. Proposez un âge pour ce granite.

$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	5.262	11.94	9.371	7.843	3.841
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.7253	0.7349	0.7321	0.7302	0.7233

- 5 Une datation sur le même échantillon par la méthode potassium/argon donne un âge de 300 millions d'années. Que pouvez vous en conclure ?

Document : principe de la radiochronologie K-Ar

La méthode de datation K-Ar s'appuie sur la désintégration du potassium ^{40}K (un des principaux atomes radioactifs de la croûte terrestre). Une partie de celui-ci se désintègre en effet en argon ^{40}Ar , systématiquement gazeux (cest un gaz noble).

Appliquer cette méthode à une roche provenant de la solidification d'un magma entièrement dégazé permet de résoudre l'inconnue liée à la quantité initiale d'éléments fils dans la roche. En effet, on fait alors l'hypothèse que l'échantillon ne contenait pas d'argon au moment de sa formation : $F_0 = 0$.

12 Datation relative Vosges-Alsace



25 min

Corrigé
p. 135

Lycée de l'Empéri, Salon-de-Provence



Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

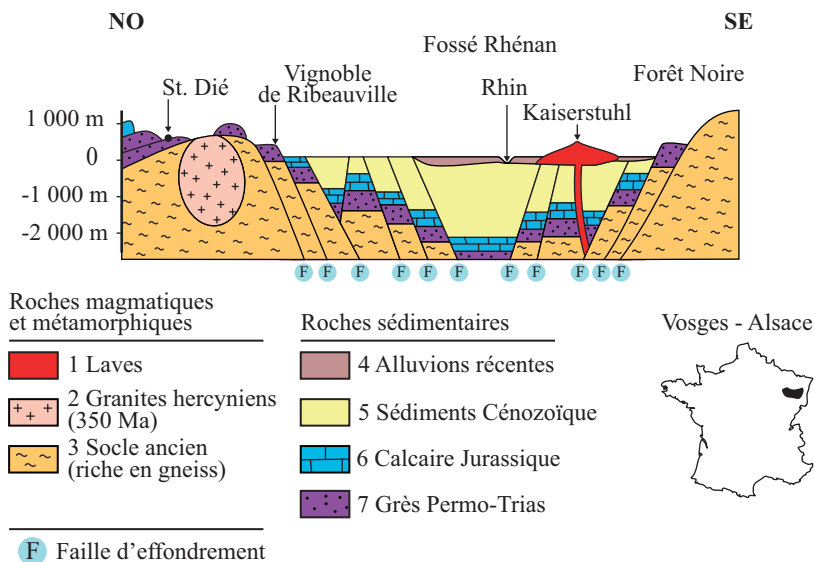


Figure 4.18 – Coupe géologique simplifiée à travers les Vosges moyennes et le Fossé Rhénan (Vosges-Alsace)

À partir de la coupe fournie et en vous appuyant sur les principes de la datation relative, reconstituez l'histoire géologique de la région Vosges-Alsace.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

13 Datation relative dans le Massif Centr ★★★

25 min

Corrigé
p. 136

Lycée Saint Martin, Rennes

Le document proposé concerne la région de Clermont-Ferrand dans le Massif Central, dans la plaine de la Limagne.

Recopiez et complétez l'échelle des temps géologiques fournie en y plaçant la mise en place du granite, le dépôt des formations sédimentaires, le jeu des failles F1 et F2, les épisodes d'érosion et le volcanisme.

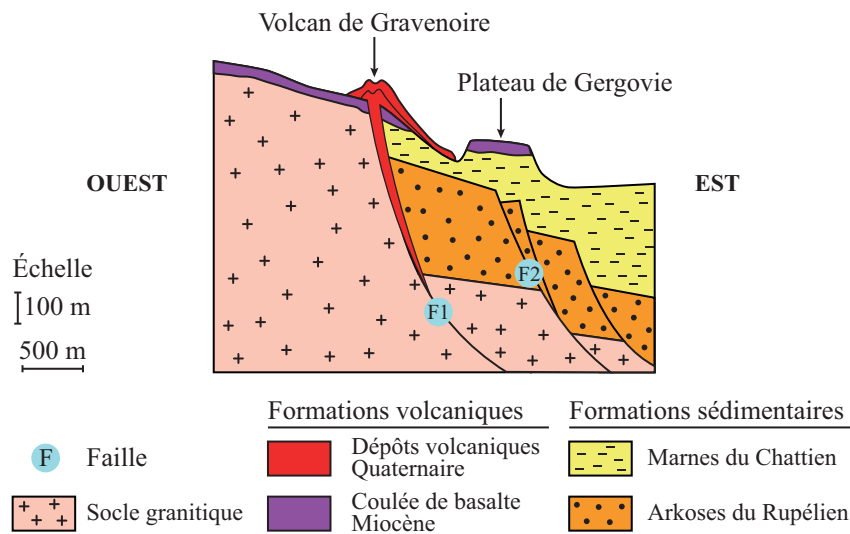


Figure 4.19 – Coupe géologique simplifiée à travers le bord ouest de la Plaine de Limagne (Puy de Dôme)

Époque	Étage	Âge (Ma)
Pléistocène		2.6
Pliocène		5.3
Miocène		23
Oligocène	Chattien	28
	Rupélien	34

Tableau 4.3 – Échelle des temps géologiques, de la fin de l'Oligocène à nos jours

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

14 Température de fermeture



15 min

Corrigé
p. 138

Nouveau programme

Document : principe de la radiochronologie K-Ar

La méthode de datation K-Ar s'appuie sur la désintégration radioactive du potassium ^{40}K en argon ^{40}Ar gazeux.

La température de fermeture du système pour le couple potassium–argon (K–Ar) est de $350 \pm 40^\circ\text{C}$ dans la muscovite et de $280 \pm 40^\circ\text{C}$ dans la biotite.

Un granite, mis en place à une profondeur estimée à 15 km, a progressivement été amené en surface par l'érosion. On a pu appliquer la méthode K-Ar sur ce granite : en datant ses muscovites, on trouve un âge de 290 ± 1 Ma ; en datant ses biotites, un âge de 281 ± 1 Ma.

- 1 Expliquez la différence entre les âges obtenus.
À cet endroit, le gradient thermique de la croûte continentale est estimé à 30°C.km^{-1} , c'est à dire que la température augmente de 30°C chaque fois qu'on s'enfonce de 1 km.
- 2 La fermeture du système est-elle due au refroidissement du granite au contact de la croûte ou à sa remontée vers la surface ?
- 3 À quelle profondeur se trouvait le granite il y a 290 Ma ?
Il y a 281 Ma ?
- 4 À quelle vitesse le granite est-il remonté vers la surface ?

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Énoncé
p. 118

- 1 Réponse **b**. On parle également de temps de demi-vie $T_{1/2}$.

⚠ ATTENTION

Ne pas confondre période radioactive $T_{1/2}$ (en années) et constante de désintégration radioactive λ (en an^{-1}) :

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}.$$

- 2 Réponse **c**. Le temps écoulé depuis la formation de l'échantillon s'obtient grâce à la loi exponentielle de décroissance radioactive :

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{P(t)}{P_0} \right),$$

$P(t)$ étant la quantité actuelle d'éléments pères, P_0 étant la quantité initiale d'éléments pères et λ la constante de désintégration.

⚠ ATTENTION

Si l'on ne connaît pas la quantité d'éléments pères lors de la formation de la roche, on doit posséder plusieurs échantillons et utiliser la méthode de la droite isochrone.

- 3 Réponse **c**. On s'intéresse à la quantité en ^{87}Rb et en ^{87}Sr de manière à les placer dans un diagramme. On mesure les concentrations actuelles (inutile, et impossible, de mesurer les concentrations initiales). Ces concentrations sont exprimées par rapport à une référence stable : le ^{86}Sr .
- 4 Réponses **b** et **c**. En système fermé, le nombre d'isotopes stables reste constant. Par contre, la quantité de ^{87}Rb diminue car il se désintègre en ^{87}Sr .

2 V/F Vérification des connaissances

Énoncé
p. 118

- 1 *Vrai*. Les événements tectoniques ayant affecté les roches (failles, plis, inclusions, etc.) leur sont forcément postérieurs.
- 2 *Faux*. Ceci n'est vrai (principe de superposition) que si la série n'a pas été déformée.
- 3 *Vrai*. Cette loi quantifie la diminution exponentielle de la quantité d'éléments pères au cours du temps.

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

3 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 119

- 1 Le strontium (^{87}Sr).
- 2 L'isotope ^{86}Sr .
- 3 La droite isochrone.
- 4 Le temps de demi-vie $T_{1/2}$.

4 Âge — Granite

Énoncé
p. 119

Lycée Bachelard, Chelles

MÉTHODE

On trace les points dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$. Si les points s'alignent sur une droite (droite isochrone), on mesure sa pente a .

La pente de la droite vaut $e^{\lambda t} - 1$. Mesurer cette pente permet ainsi de calculer t , l'âge du refroidissement du granite.

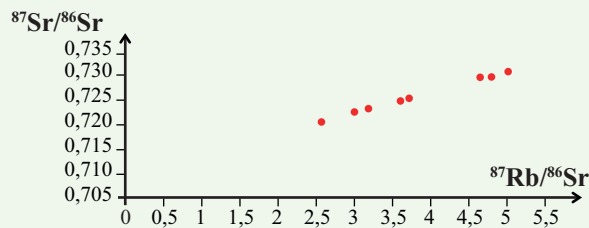


Figure 4.20 – Datation du granite par la méthode Rubidium-Strontium

Les points s'alignent bien selon une droite : il est possible de dater la fermeture du système selon la méthode de la droite isochrone. Ici, le système est un échantillon de granite donc la fermeture du système correspond probablement à son refroidissement.

La droite passe par les points (5,0, 0,731) et (0,0, 0,710), soit une pente :

$$a = \frac{0,731 - 0,710}{5,0 - 0,0} = 4,2 \times 10^{-3}$$

$$\Rightarrow t = \frac{\ln(a + 1)}{\lambda} = \frac{\ln(1,0042)}{1,4 \times 10^{-11}} \approx 300 \text{ Ma.}$$

5 Datation relative

Énoncé
p. 119

Lycée Évariste Galois, Sartrouville

- 1 On observe :
 - des couches sédimentaires plissées, témoins d'un raccourcissement ;

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- des couches sédimentaires horizontales en discordance, témoins d'une phase d'érosion puis d'une reprise du dépôt ;
- une faille dont le compartiment supérieur est monté (faille inverse), témoin d'un raccourcissement ;
- des filons et un volcan, témoins d'un épisode de magmatisme.

2 L'épisode de magmatisme recoupe tout le reste. D'après le principe de recoupement, il s'agit du dernier événement à s'être produit.

On observe des couches superposées : 7 au-dessus de 6 au-dessus de la discordance. D'après le principe de superposition, on a donc du plus vieux au plus jeune : érosion > dépôt de 6 > dépôt de 7.

Les couches 1 à 5 sont plissées : impossible de savoir dans quel ordre elles se sont déposées, mais on ne peut faire que deux hypothèses :

$$5 > 4 > 3 > 2 > 1 \text{ ou } 1 > 2 > 3 > 4 > 5.$$

Les couches 1 à 5 sont pliées et faillées. D'après le principe de recoupement, ces deux événements se sont donc produits après le dépôt de ces couches, mais avant la mise en place de la surface d'érosion qui les recoupe : il s'agit probablement du même épisode de raccourcissement.

Remarque : la faille n'étant elle-même pas plissée, on pourrait faire l'hypothèse que le pli s'est produit avant la faille.

La chronologie des événements est donc la suivante :

dépôt des couches (1-5) > raccourcissement > érosion > dépôt de 6 > dépôt de 7 > magmatisme.

6 Datation relative

Énoncé
p. 120

Lycée Lumière, Luxeuil

- Les couches G à J ne semblent pas déformées. Selon le principe de superposition, elles se sont donc déposées dans l'ordre $G > H > J$.
- Le principe d'identité paléontologique nous apprend que la couche C date du Permien tandis que la couche E du Dévonien : elles se sont donc déposées dans l'ordre $E > C$. En appliquant le principe de superposition, on peut dire que les couches C à F se sont déposées comme suit : $F > E > D > C$.
- Le granite A recoupe les sédiments C à F mais pas la discordance M : d'après le principe de recoupement il est postérieur aux premiers mais antérieur à cette dernière. On a donc dans l'ordre $C > A > M$.
- Le métamorphisme B touche les sédiments C à F mais pas le granite A : on pourrait ainsi croire qu'il est postérieur au dépôt des sédiments mais antérieur au granite. Il est toutefois localisé exactement autour du granite. On peut ainsi faire l'hypothèse qu'il s'agit d'une *auréole de métamorphisme de contact* : lors de sa mise en place, le magma granitique A a procédé

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

à la « cuisson » des sédiments alentour. Ainsi, les épisodes A et B sont concomitants.

- La faille K recoupe les sédiments C mais pas le granite A. On a donc $C > K > AB$.
- Les sédiments C à F sont plissés mais pas la faille K. On appelle cet événement P et on a : $C > P > K$
- L'inclusion L affecte tout jusqu'à H donc par principe de recoupement elle est postérieure à H. Elle a par contre produit de la lave en surface sur laquelle s'est déposée la couche J, donc par principe de superposition elle est antérieure à J. On a ainsi $H > L > J$

En fin de compte, on a la chronologie suivante :

$$F > E > D > C > P > K > AB > M > G > H > L > J.$$

Remarque : on aurait pu faire l'hypothèse que L forme une inclusion horizontale entre H et J, auquel cas elle serait postérieure à J. C'est toutefois beaucoup moins probable que l'existence d'une coulée de lave en surface.

7 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 121

- 1 La datation relative est plus facile à mettre en pratique : elle ne nécessite pas de faire appel à un laboratoire de géochimie et peut être facilement utilisée sur le terrain pour comprendre l'histoire des formations géologiques.

Le principe de recoupement permet notamment de dater entre eux des événements géologiques comme des plissements ou des failles, ce que ne permet pas la chronologie absolue.

Le couplage du principe d'identité paléontologique aux principes de superposition et de continuité permet de dater précisément des couches sédimentaires grâce aux fossiles qu'elles contiennent. Or celles-ci ne peuvent pas être datées par chronologie absolue car leur formation ne correspond à la fermeture d'aucun système géochimique (sauf celui du carbone 14 mais pour des âges inférieurs à 50 000 ans).

En l'absence de datation absolue préalable, la chronologie relative ne donne en revanche aucune idée de l'âge de ces événements.

- 2 Les méthodes de datation absolue se distinguent par :

- le nombre de paramètres à connaître : la méthode Rb/Sr nécessite la mesure des rapports isotopiques $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ d'au moins deux échantillons ; d'autres méthodes (K/Ar, ^{14}C , etc.), pour lesquelles les quantités initiales d'éléments pères ou fils sont connues, ne nécessitent qu'un seul échantillon.
- l'âge des objets pouvant être datés qui doit être compris entre environ 0.01 et $10 \times T_{1/2}$;

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- les types de roche sur lesquels elles s'appliquent : roches magmatiques ou métamorphiques pour la technique Rb-Sr ; roches carbonées ou carbonates ou os pour la méthode ^{14}C , etc.

8 Âge – Chondrite – Granite

Énoncé
p. 121

Lycée Marseilleveyre, Marseille

- 1 Les points s'alignent bien selon une droite dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$: il est possible de dater la fermeture du système selon la méthode de la droite isochrone. Ici, le système est une météorite donc la fermeture du système correspond probablement à sa formation.

Les rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ varient proportionnellement selon l'équation suivante :

$$y = ax + b, \text{ avec } y = ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}, x = ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} \text{ et } a = e^{\lambda t} - 1.$$

Or $a = 0,06605$ et on connaît λ .

L'âge de la météorite est donc donné par :

$$t = \frac{\ln(a + 1)}{\lambda}.$$

Remarque : l'énoncé précise qu'aucun calcul n'est à faire : on s'en tient donc aux expressions littérales. En réalisant le calcul on trouverait $t \approx 4,568$ Ga. C'est logique, la plupart des météorites tombées sur Terre se sont formées en même temps que le système solaire.

- 2 On doit calculer les rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ et les reporter dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = f(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})$. S'ils s'alignent sur une droite, on peut alors déterminer graphiquement sa pente et calculer l'âge selon la méthode précédente.

9 Datation – Granites

Énoncé
p. 122

Lycée Marseilleveyre, Marseille

MÉTHODE

Dans un premier temps, exploitez toutes les informations apportées par la chronologie relative appliquée à la coupe du Document 1.

Voyons les informations données par la chronologie relative :

- les granites X et Y sont tous les deux en intrusion dans les couches sédimentaires A. Ils leur sont donc postérieurs ;

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

- les sédiments de la couche B se déposent sur la surface Z, qui recoupe les sédiments A et les granites X et Y : il s'agit d'une discordance.

On a donc les âges $A > (X/Y) > Z > B$.

Impossible cependant de dater relativement les deux granites : il faut faire appel à la chronologie absolue.

MÉTHODE

L'énoncé demande des âges relatifs : inutile d'effectuer une application numérique ! Rappelez d'abord la méthode de la droite isochrone puis cherchez comment l'exploiter graphiquement pour en déduire quel granite est le plus âgé.

Pour les deux granites, les valeurs des rapports isotopiques ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) en fonction de ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$) pour différents minéraux s'alignent selon une droite d'équation générale $y = ax + b$. En supposant le refroidissement des granites comme date de fermeture du système, il est donc possible de dater les deux granites selon la méthode de la droite isochrone.

La formule exprimant ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) en fonction de ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$) nous donne l'équation de la droite isochrone :

$$\begin{array}{rclclcl} ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} & = & (e^{\lambda t} - 1) & (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}) & + & (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 \\ y & = & a & x & + & b \end{array}$$

La pente a de la droite vaut donc $(e^{\lambda t} - 1)$.

Ainsi, $t = \frac{\ln(a + 1)}{\lambda}$: plus a est grand, plus t est important.

$5.4 \times 10^{-3} > 4.2 \times 10^{-3}$: la pente de la droite isochrone pour le granite Y est la plus grande : le granite Y est le plus vieux.

Au final, on trouve les âges $A > Y > X > Z > B$.

10 Discontinuité Crétacé/Paléogène

Lycée Thiers, Marseille

Énoncé
p. 123

Une crise biologique est caractérisée par des modifications synchrones du contenu paléontologique à l'échelle du globe. Le document montre que les sédiments à deux endroits éloignés possèdent de nombreuses similitudes autour du passage Crétacé-Paléogène :

- présence d'une couche d'argile aussi bien en milieu terrestre (Dakota) qu'en milieu marin (Espagne) ;
- disparition des dinosaures non aviens (survie d'une partie qui évolueront pour donner les oiseaux) ;

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- apparition dans les sédiments d'une nouvelle espèce de foraminifères (*Globigerina pseudobulloïdes*).

Ces événements témoignent d'une crise biologique majeure :

- on constate une disparition massive d'espèces terrestres et marines : non seulement les dinosaures non aviens s'éteignent, mais on observe également dans les sédiments la disparition de nombreuses espèces de foraminifères ;
- on observe une prolifération de nouvelles espèces qui occupent les niches écologiques laissées libres par les espèces disparues (par exemple *Globigerina pseudobulloïdes*) ;
- la couche d'argile, venant immédiatement après le pic de la crise, est totalement dépourvue de fossiles : cela suggère un appauvrissement notable des formes de vie sur Terre suite à la crise.

L'ampleur des modifications de la faune et de la flore à la charnière entre ces deux périodes justifie d'utiliser cette discontinuité comme séparation entre Mésozoïque et Cénozoïque (historiquement entre ère Secondaire et ère Tertiaire).

Remarque : on estime que la crise Crétacé-Paléogène n'est dépassée en intensité que par la crise Permien-Trias. Cette dernière sert donc naturellement de délimitation entre le Paléozoïque et le Mésozoïque.

11 Datation absolue

Énoncé
p. 124

Lycée Bachelard, Chelles

- 1 Pour qu'un échantillon puisse être daté par radiochronologie :
 - il ne doit pas y avoir eu de réouverture du système depuis sa formation, que ce soit par chauffage ou par échange de matière (perte ou apport de fluides, etc.) ;
 - il doit contenir des éléments radioactifs et radiogéniques (éléments pères et éléments fils) dans des quantités mesurables. Cela implique en général que son âge soit inférieur à 10 fois la période de l'élément père, et supérieur à 1% de cette période.
- 2 La demi-vie d'un élément radioactif, ou période radioactive, correspond au temps mis pour que la moitié de l'élément père se désintègre.
- 3 La constante de désintégration radioactive s'obtient grâce à l'expression littérale du temps de demi-vie :

$$P(T_{1/2}) = \frac{P_0}{2} = P_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Leftrightarrow e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{1}{2} \Leftrightarrow \lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}.$$

On trouve ainsi :

$$\lambda(^{40}\text{K}) = 5,5 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1} \quad \text{et} \quad \lambda(^{87}\text{Rb}) = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}.$$

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

- 4 On trace les points dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$:

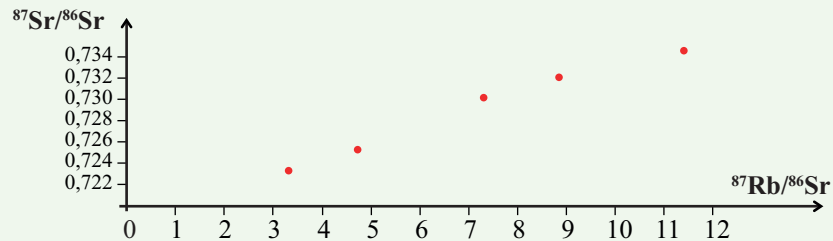


Figure 4.21 – Datation du granite par la méthode Rubidium-Strontium

On observe que les points correspondant aux minéraux sont alignés selon une droite isochrone. La pente de la droite permet donc de déterminer l'âge de fermeture du système donc du refroidissement du granite.

La pente de la droite isochrone vaut $e^{\lambda t} - 1$.

La mesure donne une pente $a = 7,6 \times 10^{-3}$, donc :

$$t = \frac{\ln(a + 1)}{\lambda} = \frac{\ln(1,0076)}{1,4 \cdot 10^{-11}} = 5,4 \times 10^8 \text{ ans.}$$

Le granite a environ 540 Ma.

- 5 La technique K-Ar se base sur l'hypothèse que $[\text{Ar}_0] = 0$ car celui-ci dégaze lors de la mise en place de la roche. Cependant, une hausse de la pression et/ou de la température appliquée à la roche, sans réouvrir le système Rb-Sr, peut provoquer le dégazage de tout l'argon accumulé jusqu'alors. Ce phénomène remet donc la pendule à 0 : la datation K-Ar donnera la date de cette réouverture du système.

Remarque : il y a 300 Ma, la France métropolitaine est en pleine orogénèse hercynienne : des lambeaux de croûte s'empilent les uns sur les autres, provoquant le métamorphisme voire la fusion d'une grande partie de la croûte continentale. Il n'est donc pas surprenant que le système K-Ar ait été réouvert à cette occasion.

12 Datation relative Vosges-Alsace

Énoncé
p. 125

Lycée de l'Empéri, Salon-de-Provence



Nous allons reconstituer l'histoire géologique de la région Vosges-Alsace à l'aide des principes de datation relative.

- Les terrains 4, 5, 6 et 7 sont déposés les uns au-dessus des autres. D'après le principe de superposition, ils sont de plus en plus récents depuis le terrain 7 jusqu'aux alluvions 4.
- Le volcanisme du Kaiserstuhl recoupe toutes les couches précédentes sauf la 4 qui vient se déposer dessus : par principe de recoupement il est donc plus récent que la couche 5, et par principe de superposition il est plus ancien que la couche 4.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

- Les failles F recoupent toutes les strates sauf la 4 et la 1. Par principe de recoupement, elles sont donc antérieures à la plus ancienne : la 1.
- Le granite hercynien est mis en place dans le socle ancien. Par principe d'inclusion, il lui est donc postérieur.
- Le granite et le socle ancien sont recoupés par une surface d'érosion. Par principe de recoupement, celle-ci leur est donc postérieure. La surface d'érosion est recouverte en discordance par les sédiments 7 qui lui sont donc eux-même postérieurs.

Au bilan, l'ordre des événements est le suivant :

1. formation du socle ancien 3
2. mise en place des granites hercyniens 2
3. érosion
4. dépôt des sédiments 7 en discordance
5. dépôt des sédiments 6 puis 5
6. effondrement du centre de la région sous l'effet de failles normales
7. volcanisme 1
8. dépôt des alluvions 4.

13

Datation relative dans le Massif Central

→ Énoncé
p. 126

Lycée Saint Martin, Rennes

MÉTHODE

Au brouillon, on commence par déterminer l'ordre de dépôt des couches sédimentaires et volcaniques en appliquant éventuellement le principe de superposition, puis on date les failles par rapport aux couches sédimentaires et volcaniques en utilisant le principe de recoupement.

- La connaissance des âges des coulées et sédiments nous permet de connaître aisément leur séquence de dépôt. Du plus vieux au plus jeune : Arkoses Rupélien > Marnes Chattien > Coulée de lave > Volcanisme

ATTENTION

Le granite est une roche plutonique qui se met en place en profondeur en déformant et en métamorphisant les roches alentour. La présence de celui-ci en surface témoigne d'un long processus d'érosion. S'il s'était intrudé dans des sédiments, on s'attendrait à ce que ceux-ci soient très vieux, déformés et métamorphisés, ce qui n'est pas le cas ici.

- Le granite constitue le socle sur lequel se sont déposés les sédiments et les coulées de lave. Sa mise en place est donc antérieure à tous les autres événements.

LE TEMPS ET LES ROCHES • CHAP. 4

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

D'après le principe de recoupement, cette mise en place est suivie par un épisode d'érosion antérieur au dépôt des premiers sédiments en discordance. On a donc :

Granite > Érosion > Arkoses Rupélien

- La faille F2 recoupe les arkoses Rupélien mais pas les marnes Chattien. D'après le principe de recoupement, elle est donc postérieure à la dernière formation affectée et antérieure à la première non affectée :
Arkoses Rupélien > Faille F2 > Marnes Chattien
- La faille F1 recoupe le socle granitique et elle n'est pas érodée. D'après le principe de recoupement, elle s'est donc mise en place après l'arrivée du granite en surface.

⚠ ATTENTION

Les arkoses du Rupélien ont pu se déposer à l'est mais pas à l'ouest de la faille, témoignant qu'un relief était déjà présent à cette époque. La faille ne recoupe donc pas les arkoses, sinon on en trouverait à l'ouest : elle est antérieure à leur dépôt.

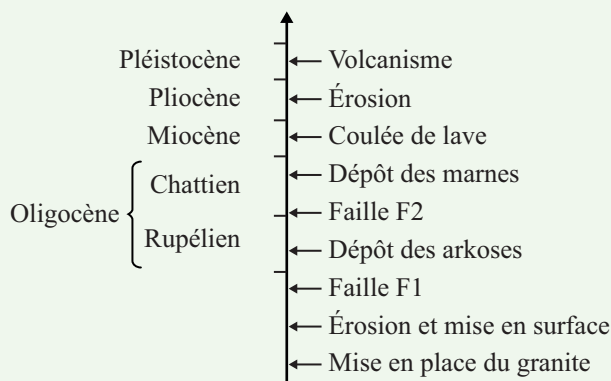
Érosion du granite > Faille F1 > Arkoses Rupélien

- La coulée Miocène et les sédiments Chattien sont érodés. Il ne subsistent à leur altitude initiale qu'un niveau du Plateau de Gergovie : on parle de *butte témoin*. D'après le principe de recoupement cette surface d'érosion est donc postérieure au Miocène.

Les dépôts volcaniques du Puy de Gravenoire viennent se déposer dans les creux formés par cette érosion. D'après le principe de superposition, ils lui sont donc postérieurs. On a ainsi :

Coulée Miocène > Érosion > Volcanisme Pléistocène

On replace ces événements dans une échelle :



14 Température de fermeture

Énoncé
p. 127

Nouveau programme

- 1 On ne date pas ici la formation du granite mais la fermeture du système. Or celle-ci se produit à plus basse température pour la biotite que pour la muscovite. Les résultats montrent que le système se ferme d'abord pour la muscovite puis pour la biotite : on met ainsi en évidence le refroidissement du granite. On sait donc qu'il est passé en-dessous de 350°C à 290 Ma, puis de 280°C à 281 Ma, et qu'il n'a jamais franchi ce seuil depuis (pas de réouverture du système).
- 2 Le granite s'étant mis en place à 15 km de profondeur, la croûte dans laquelle il se trouvait possédait une température de $30 \times 15 = 450^{\circ}\text{C}$: il n'a donc pas pu se refroidir à 350°C ni 280°C car il aurait été à une température inférieure à la croûte environnante.
- 3
 - Il y a 290 Ma, le granite se trouvait à la température de fermeture du système K-Ar dans la muscovite, c'est-à-dire autour de 350°C . Avec un gradient de $30^{\circ}\text{C.km}^{-1}$, il se trouvait donc à une profondeur de $350/30 \approx 12 \text{ km}$.
 - Il y a 280 Ma le granite se trouvait à la température de fermeture du système K-Ar dans la biotite (autour de 280°C) : il se trouvait donc à une profondeur de $280/30 \approx 9 \text{ km}$.
- 4 Le granite est passé de 12 à 9 km de profondeur entre 290 et 281 Ma, soit une remontée de 3 km en 9 Ma, ou encore 0.3 mm.an^{-1} .

Remarque : ceci correspond à une vitesse rapide d'érosion : le granite devait se trouver à l'aplomb d'une chaîne de montagnes fortement érodée.

Chapitre

5

Les traces du passé mouvementé de la Terre

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Les marges passives témoignent de la fragmentation des continents
3. À la recherche d'océans disparus
4. Les collisions couvrent les continents de cicatrices
5. Vers une reconstitution du passé de la Terre

1 Introduction

Le modèle de la tectonique des plaques décrit la surface de notre planète comme un ensemble de plaques lithosphériques rigides et mobiles mises en mouvement par la dissipation de la chaleur interne de la Terre. Les frontières de ces plaques peuvent ainsi connaître des mouvements de divergence, de convergence ou de coulissage :

- au niveau des frontières en divergence, on observe souvent des dorsales océaniques, qui mettent en place la lithosphère océanique ;
- au niveau des frontières en convergence, on observe soit le plongement d'une lithosphère océanique dans l'asthénosphère par subduction, soit l'affrontement de deux lithosphères par collision.

Cependant, les quelques frontières de plaques que l'on peut voir actuellement à la surface du Globe ne sont qu'une infime fraction de toutes celles qui ont existé et disparu au cours de l'histoire géologique de la Terre.

❓ PROBLÉMATIQUE

Que deviennent ces anciennes frontières de plaques et dans quelle mesure l'étude des traces qu'elles laissent permet-elle de reconstituer l'histoire géologique de notre planète ?

2 Les marges passives témoignent de la fragmentation des continents

2.1 Les rifts opèrent la fragmentation continentale

Définition 1 : rift

Déchirure de la croûte terrestre en contexte de divergence. L'extension se matérialise par un fossé d'effondrement bordé par un système de *failles normales* délimitant des *blocs basculés*. Les *rifts* peuvent être continentaux ou océaniques. Ils sont alors situés au sommet des *dorsales médio-océaniques*, étudiées en classe de première.

Exemple : on observe particulièrement ces formations dans la région Afar (Ethiopie) : deux dorsales océaniques jeunes (Mer Rouge et Golfe d'Aden) rejoignent un rift continental, le Rift Est-Africain. Ce dernier localise la divergence entre plaque Nubie et plaque Somalie :

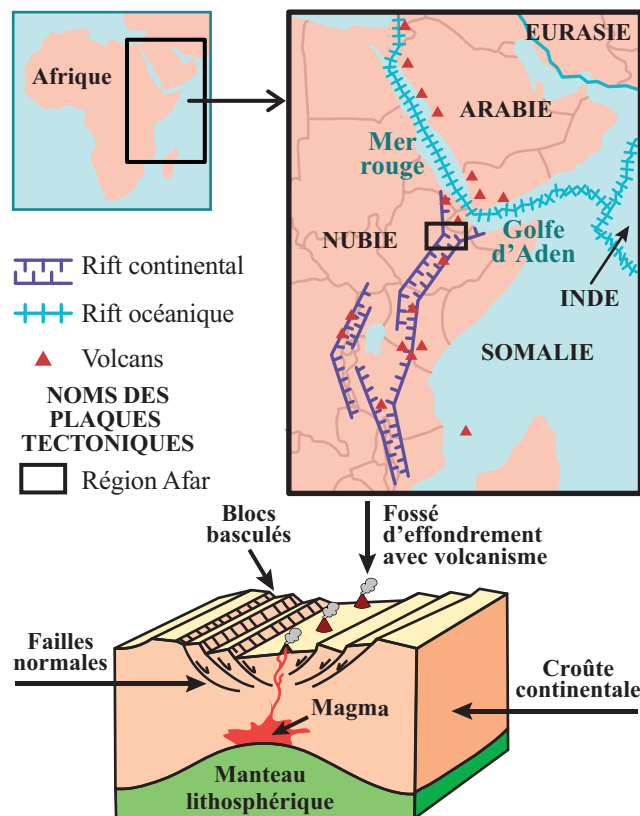


Figure 5.1 – Coupe schématique à travers le rift des Afar montrant le système de failles normales-blocs basculés

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

Remarque : ces blocs sont dits *basculés* car les failles normales qui les délimitent s'incurvent vers le haut pour rejoindre un niveau de faiblesse dans la croûte : ce sont des *failles listriques*. Le mouvement du bloc est donc un basculement. L'ouverture du rift peut être datée grâce aux dépôts successifs de trois géométries sédimentaires :

- les sédiments pré-rift, déposés sur le socle continental avant sa fragmentation ;
- les sédiments syn-rift, déposés "en éventail" pendant le basculement ;
- les sédiments post-rift, déposés en discordance après le processus d'extension.

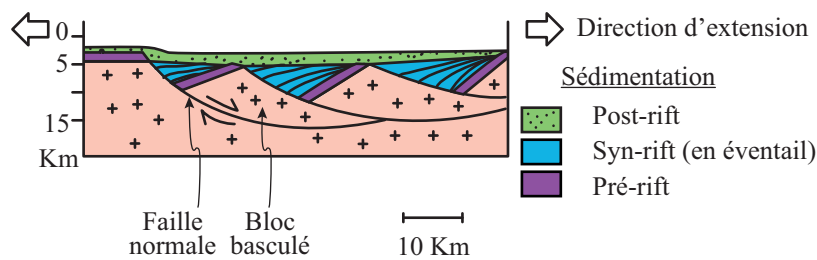


Figure 5.2 – Schéma d'un système de failles normales délimitant des blocs basculés

Exemple : la carte géologique de France au millionième révèle une série de bassins rectilignes bordés par des failles normales, tels que le Bassin de Limagne ou le Fossé Rhénan. Ces bassins traduisent un épisode de légère extension est-ouest intervenu principalement pendant l'Oligocène (il y a 34-23 Ma).

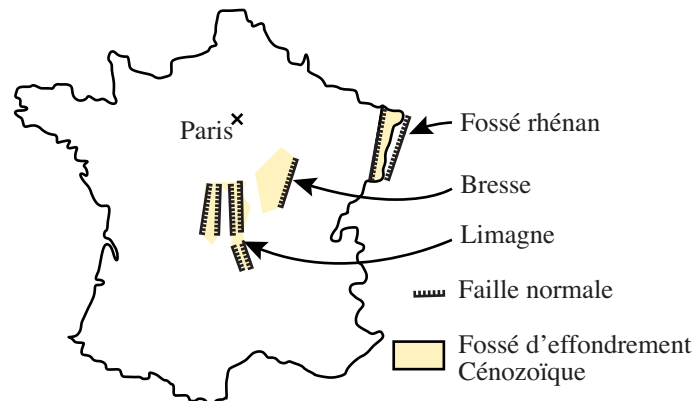


Figure 5.3 – Les principaux fossés d'extension Cénozoïque en France

À RETENIR

Les contextes de divergence impriment dans la croûte continentale des traces d'extension telles que les failles normales, les blocs basculés et les géométries sédimentaires en éventail.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

2.2 La fragmentation se poursuit lors de l'ouverture océanique

Une coupe à travers les marges passives qui bordent les continents révèle des structures très similaires en blocs basculés. Ceci suggère que les océans étaient initialement des rifts continentaux qui ont fini par scinder la lithosphère en deux fragments séparés par un océan.

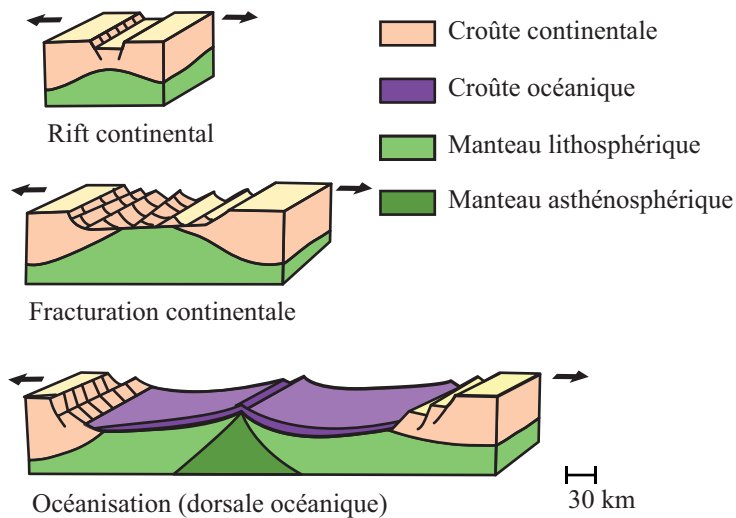


Figure 5.4 – Fracturation d'un continent par un rift continental suivi d'une océanisation

Définition 2 : océanisation

Mise en place de lithosphère océanique (*accrétion océanique*) le long d'une dorsale océanique.

Les océans, au sens géologique, se caractérisent par leur plancher océanique, dont la mise en place le long d'une dorsale a été détaillée en classe de première. De nombreux intermédiaires existent entre rifts continentaux et dorsales médio-océaniques, appuyant l'hypothèse selon laquelle les océans seraient issus de rifts dont l'extension s'est poursuivie jusqu'à l'océanisation.

À RETENIR

La fracturation de la croûte continentale par un rift peut constituer la première étape d'un phénomène d'océanisation marqué par la mise en place d'une dorsale océanique. Les traces de ce rift initial restent visibles le long des marges continentales.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

? PROBLÉMATIQUE

Une fois formée, la lithosphère océanique se refroidit et sa densité augmente jusqu'à entrer en subduction dans l'asthénosphère. Reste-t-il des traces de ces anciens océans malgré leur très probable disparition par subduction ?

3 À la recherche d'océans disparus

3.1 Les ophiolites, des lambeaux océaniques retrouvés au cœur des continents

Une lithosphère océanique typique est composée de péridotites, des roches du manteau qui ont pu subir une fusion partielle pour donner des roches magmatiques plutoniques (gabbros) et volcaniques (basaltes), le tout recouvert de sédiments marins profonds.

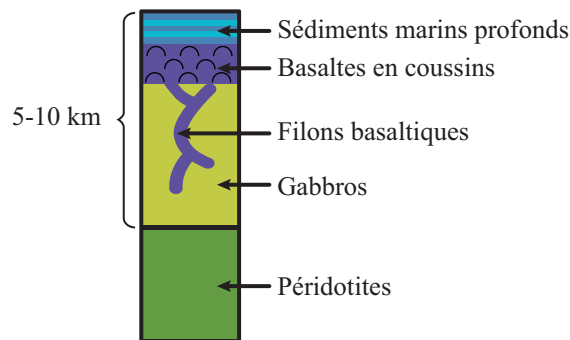


Figure 5.5 – Carotte théorique dans le fond d'un océan montrant une séquence lithosphérique océanique typique

Ces roches ne font en théorie pas partie de la composition de la croûte continentale. Il est cependant fréquent de trouver dans les chaînes de montagnes des blocs de plusieurs kilomètres qui en sont exclusivement composés.



 Vous pourrez admirer ces roches dans la lithothèque numérique de l'ENS Lyon avec 

Définition 3 : ophiolite

Nom donné à un fragment de lithosphère océanique lorsqu'il est retrouvé sur un continent. On parle de *complexe ophiolitique* quand il présente une séquence lithosphérique complète, allant des péridotites du manteau aux sédiments marins recouvrant la croûte océanique.

Le faible degré de déformation de certaines ophiolites, ainsi que la présence de grandes failles à leur base, suggèrent qu'elles ont été transportées sur le continent lors d'épisodes de collision.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Définition 4 : obduction

Transport d'une ophiolite en domaine continental. L'*obduction* se produit généralement à la faveur de grands chevauchements : on parle de *charriage*.

Exemple : des complexes ophiolithiques sont notamment retrouvés dans les Alpes, témoignant de l'existence d'un ancien océan à leur emplacement :

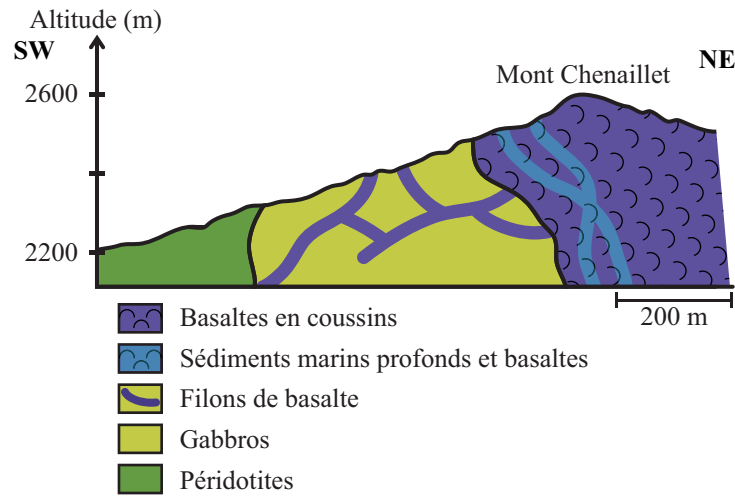


Figure 5.6 – Coupe à travers le complexe ophiolitique du Chenaillet (Hautes Alpes)

À RETENIR

Une partie très minoritaire des océans peut échapper à la subduction et se retrouver obduite sur le continent, formant des ophiolites.

3.2 Les chaînes de montagnes gardent les marques d'une subduction océanique

Certaines roches métamorphiques trouvées dans les chaînes de montagnes ont également une composition chimique caractéristique de la lithosphère océanique. Ces roches ont toutefois subi des transformations minéralogiques à l'origine d'assemblages de minéraux caractéristiques des *faciès schistes bleus* voire *faciès éclogites*.

Définition 5 : métamorphisme

Ensemble des transformations pétrographiques (affectant l'aspect de la roche) et pétrologiques (affectant la composition minéralogique) subies par des roches à l'état solide sous l'effet de l'application de contraintes et/ou d'une variation des conditions de Pression – Température.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

MÉTHODE : lecture d'un diagramme Pression – Température

En présence d'une roche métamorphique, les géologues recherchent la présence de certains assemblages de minéraux appelés *minéraux index*. Chacun de ces assemblages est associé à un *faciès* ou « champs PT » : ensemble des conditions Pression – Température auxquelles il a été possible de recréer ces assemblages minéralogiques en laboratoire. Ainsi, si l'on repère un de ces assemblages, on peut immédiatement placer notre échantillon dans un diagramme PT. Connaissant la relation entre pression et profondeur, on a ainsi une idée de la profondeur et la température à laquelle notre échantillon a été transformé.

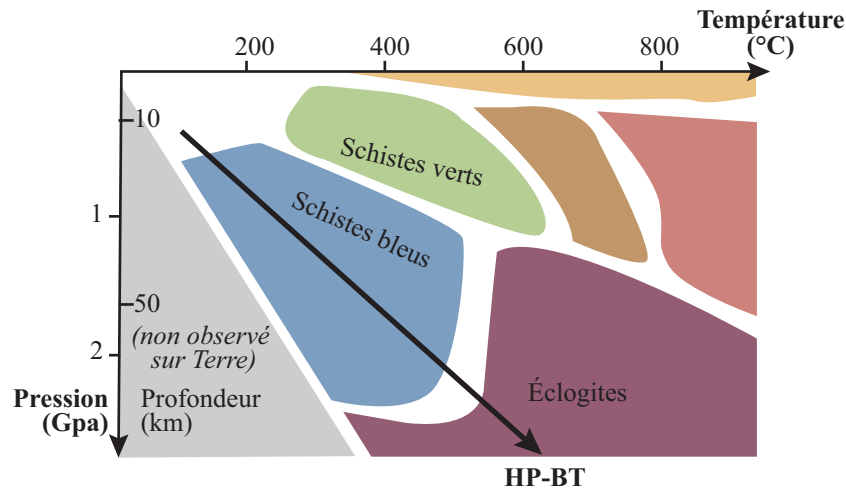


Figure 5.7 – Chemin métamorphique HP–BT et faciès concernés représentés dans un diagramme Pression–Température

Dans un tel diagramme, les conditions de Pression–Température correspondant aux *faciès schistes bleus* et *faciès éclogites* révèlent un métamorphisme de *Haute Pression – Basse Température* (HP–BT).

Au cours de la subduction d'une lithosphère océanique froide, sa pression croît rapidement avec la profondeur tandis que sa température met plus longtemps à augmenter : on a bien des *Hautes Pressions – Basses Températures*.

Trouver de telles roches dans des chaînes de montagnes contribue à démontrer l'existence d'un ancien océan disparu par subduction.

Voir illustration page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

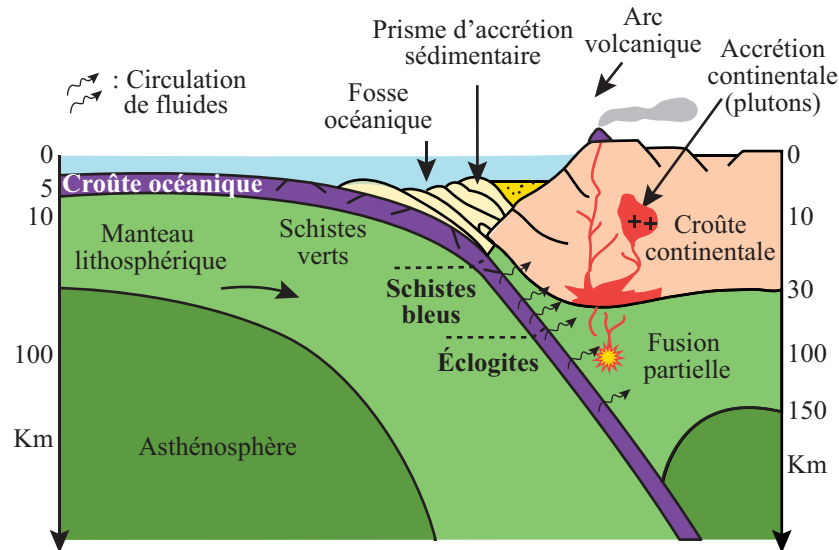


Figure 5.8 – Les faciès métamorphiques de la lithosphère océanique lors de sa subduction

Remarque : ces réactions métamorphiques s'accompagnent d'une déshydratation de la lithosphère plongeante, libérant des fluides qui vont hydrater le manteau de la plaque chevauchante, ce qui favorise sa fusion partielle à l'origine du magmatisme d'accrétion continentale.

Un bloc continental peut être entraîné en subduction par le domaine océanique. Sa densité n'étant pas suffisante, la subduction continentale se bloque rapidement et une collision continentale prend le relai. Les déformations associées peuvent alors exhumer les derniers fragments de lithosphère océanique subduits, même s'ils sont déjà enfouis à près de 100 km de profondeur.

➔ À RETENIR

Dans les chaînes de montagnes affleurent des roches métamorphiques dont les assemblages minéralogiques se sont formés en conditions HP–BT spécifiques des zones de subduction. Ces roches sont donc des ophiolites métamorphiques, exhumées lors de la collision.

3.3 Les collisions suturent des océans disparus

Une coupe à travers les chaînes de montagnes de collision montre souvent des successions de blocs de socle dont la géométrie rappelle celle des blocs basculés. Leur disposition évoque des marges passives reprises en compression lors de la collision, appuyant l'hypothèse que cette dernière implique la présence préalable d'un océan.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

Voir exercice 6 page 156.

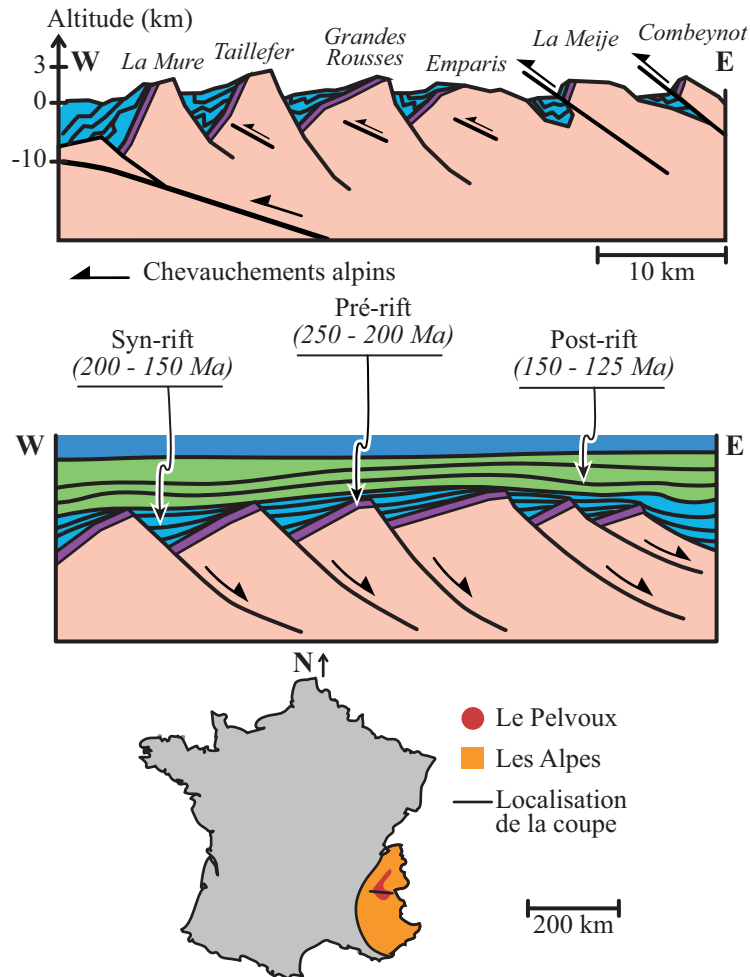


Figure 5.9 – Coupe schématique WE à travers les massifs cristallins externes des Alpes et reconstitution de la coupe vers 125 Ma (avant la compression)

À RETENIR

Au sein des chaînes de montagnes, les anciennes marges passives, les ophiolites, obduites ou exhumées, et les autres traces de subduction océanique sont généralement retrouvées à la frontière entre deux anciennes plaques lithosphériques. Elles s'alignent en effet le long de la *suture* d'un domaine océanique fermé par subduction lors de la convergence des plaques lithosphériques.

Voir exercices 8 et 10 pages 157 et 159.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

4 Les collisions couvrent les continents de cicatrices

? PROBLÉMATIQUE

La fermeture de ces océans a eu lieu lors de collisions continentales. Quelle sont les traces laissées par les chaînes de montagnes associées ?

4.1 Les masses continentales accumulent les marques des orogénèses successives

Partout en France où la croûte continentale est accessible à l'observation, c'est-à-dire non recouverte par des bassins sédimentaires, elle y apparaît empreinte de multiples marqueurs du raccourcissement et de l'épaississement de la croûte tels que ceux pouvant être observés dans les Alpes et les autres chaînes de montagnes actuelles, où se produit la convergence des plaques.

Exemple : microplis dans les roches sédimentaires du Finistère ; roches métamorphiques de Lozère présentant une forte schistosité ; gneiss de Corrèze, reconnaissables à leur alternance de lits minéralogiques clairs et sombres, etc.

► POUR ALLER PLUS LOIN

Dans de nombreuses régions de France (Massif Central, Bretagne,...), on rencontre des migmatites, comportant des minéraux ayant atteint les conditions de leur fusion partielle (c'est l'*anatexie*). Si cette fusion partielle se poursuit, il peut y avoir extraction du magma et formation de granites, souvent rencontrés dans les mêmes régions.

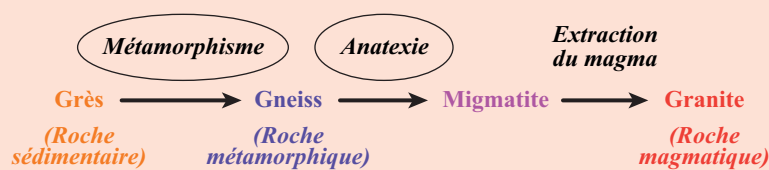


Figure 5.10 – Devenir d'une roche sédimentaire suite à l'empilement de deux croûtes continentales

Définition 6 : orogénèse

Processus d'édification d'une chaîne de montagnes (dite *orogène*) au cours d'une collision continentale.

La datation des marqueurs de la collision par radiochronologie (voir Chapitre 4) permet de retracer l'histoire d'un petit nombre d'orogénèses au cours des temps géologiques.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

Remarque : en France métropolitaine, les résultats de cette datation sont disponibles dans la légende des formations magmatiques et métamorphiques de la carte de France au 1 : 1 000 000.

L'orogénèse actuelle, appelée orogénèse alpine, affecte l'Eurasie depuis les Alpes jusqu'à l'Himalaya. Les marqueurs de raccourcissement visibles partout ailleurs suggèrent toutefois que chaque orogénèse passée a un jour formé des reliefs d'une taille comparable à celle des montagnes actuelles, avant d'être complètement effacée par l'érosion.

Pour les vitesses d'érosion, voir les exercices 7 et 9 pages 157 et 159.

À RETENIR

Chaque orogénèse se superpose aux précédentes, dont elle efface en grande partie les traces par de profonds bouleversements imprimés à la croûte continentale : plis, charriage de nappes, métamorphisme, anatexie avec intrusion de plutons granitiques, etc.

4.2 Les ceintures orogéniques renseignent sur les collisions passées

Comme elles résultent de l'affrontement de plaques tectoniques, les orogénèses laissent des déformations orientées le long de la limite de ces anciennes plaques. Des zones externes, dominées par les plis et les chevauchements, encadrent des zones internes marquées par un métamorphisme de plus haute pression et comportant souvent la suture d'un océan disparu.

Définition 7 : ceinture orogénique

Structure allongée le long de l'ancienne bordure de plusieurs continents, comprenant toutes les marques laissées par leur collision.

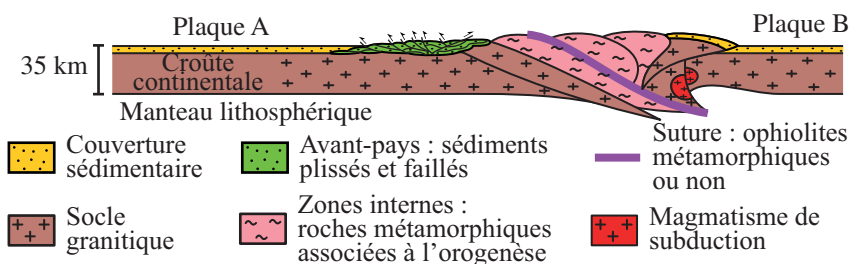


Figure 5.11 – Coupe schématique à travers une ceinture orogénique typique

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Exemple : la ceinture hercynienne (ou varisque), dernière à avoir affecté la quasi totalité de la croûte française métropolitaine, témoigne d'une ancienne chaîne de montagnes d'ampleur himalayenne issue de l'affrontement de deux continents provenant du nord et du sud durant le Carbonifère (il y a 360-300 Ma).

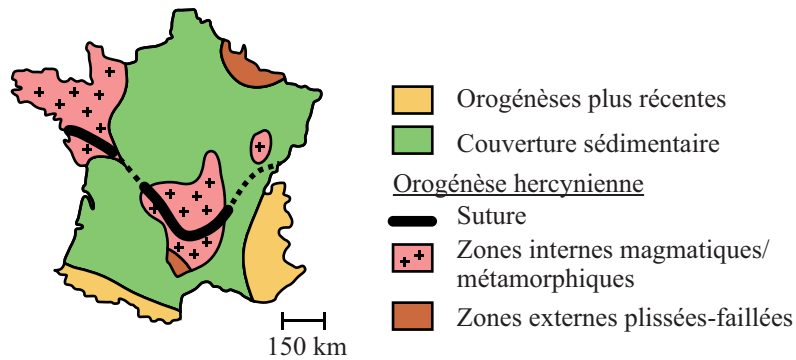


Figure 5.12 – La ceinture hercynienne en France

La carte géologique du Monde montre une forte densité de ceintures orogéniques d'âges variés, séparant des blocs plus anciens comportant eux-mêmes de multiples traces d'orogénèses antérieures.

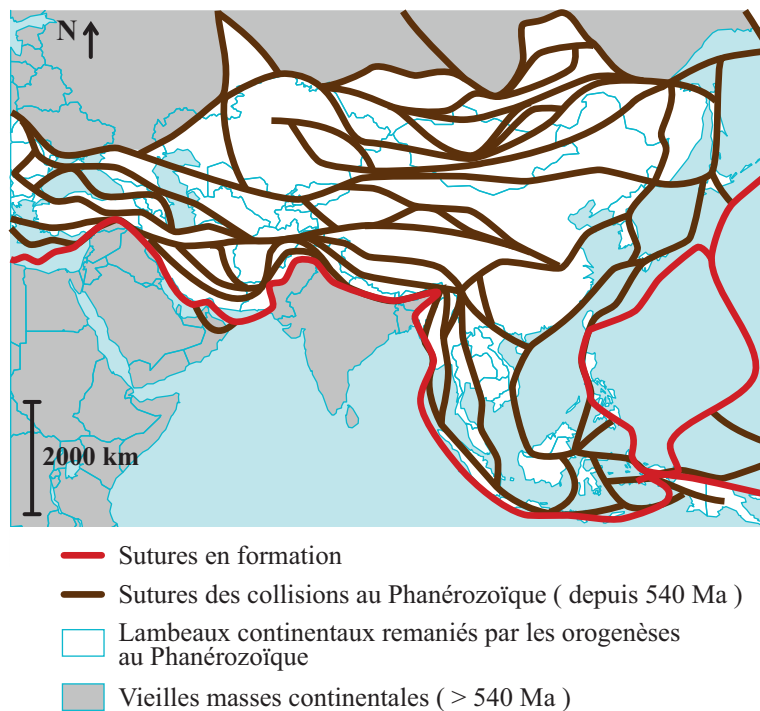


Figure 5.13 – L'Eurasie est couverte d'anciennes ceintures orogéniques

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

À RETENIR

Tous les continents se sont formés par le collage successif, le long de ceintures orogéniques, de nombreux blocs d'âges variés, eux-même remodelés par les orogénèses précédentes.

PROBLÉMATIQUE

Peut-on relier ces informations pour reconstituer la géographie passée des continents ?

5 Vers une reconstitution du passé de la Terre

5.1 Les cycles orogéniques : des océans qui s'ouvrent et se referment

Par convention, les géologues situent le début d'une orogénèse dès l'ébauche de l'océan que la collision va suturer. La rencontre des masses continentales n'est ainsi que l'apogée de l'orogénèse. La chaîne de montagnes subit ensuite un complet aplanissement par l'érosion jusqu'à former une plaine, telle que le Bassin Parisien. Enfin, l'orogénèse est considérée terminée lorsque les reliefs ont disparu au point que des sédiments viennent se déposer sur l'ancienne chaîne.

Remarque : ces premiers sédiments sont reconnaissables à leur nature, des grès rouges issus de l'érosion continentale, ainsi qu'à leur position *en discordance* sur toutes les roches qui précèdent.

À RETENIR

Une orogénèse typique débute par un épisode de fragmentation continentale suivi d'une océanisation. L'océan formé finit par entrer en subduction et se refermer lors d'une collision continentale. L'érosion commence alors un long travail d'amincissement de la croûte continentale, épaissie lors de l'orogénèse. La plaine continentale qui en résulte pourra alors de nouveau se fragmenter, et ainsi de suite.

Ces cycles, d'une durée de quelques centaines de millions d'années, sont appelés *cycles orogéniques* ou *cycles de Wilson*, en l'honneur du géologue canadien qui proposa cette idée.



 Retrouvez l'explication des cycles orogéniques et du schéma qui suit avec 

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

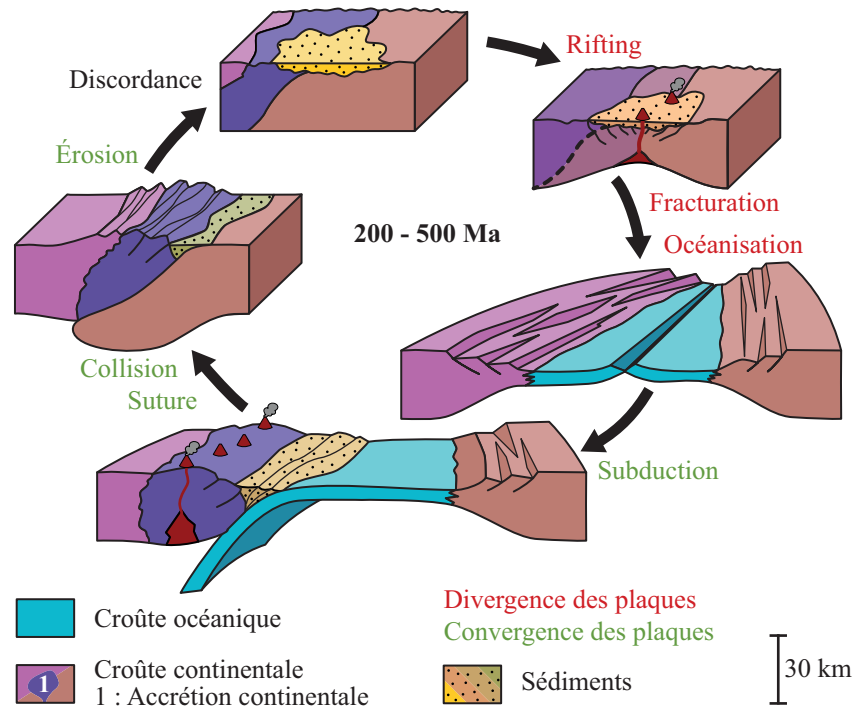


Figure 5.14 – Schéma du déroulement d'un cycle orogénique majeur

Les cycles les plus importants font alterner des périodes de fragmentation continentale majeure caractérisées par un important magmatisme lié à l'existence de nombreuses dorsales océaniques, et des périodes d'orogénèse pouvant aboutir au regroupement de la plupart des continents en une seule masse continentale appelée *pangée*.

Exemple : le cycle hercynien se distingue par la formation de la Pangée Carbonifère (360-300 Ma) et sa dislocation à partir du Trias (il y a 250 Ma), au début du cycle alpin.

Voir exercice 11 page 160.

5.2 Les reconstitutions paléogéographiques

Définition 8 : paléogéographie

Science visant à reconstituer les environnements terrestres pour toute époque du passé. La *paléogéographie* se base avant tout sur la reconstitution de la position des continents au cours des cycles orogéniques, donnée notamment par l'orientation des ceintures orogéniques.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

Exemple : en France, la ceinture hercynienne correspond à la cicatrice de l'affrontement entre le continent Gondwana au sud et le continent Laurussia au nord, dont l'ensemble constituera la Pangée au Carbonifère.

On date ensuite ces cycles orogéniques par radiochronologie sur les ophiolites provenant des océans qu'ils ont fermés, ainsi que sur les granites formés par anatexie lors de la collision.

► POUR ALLER PLUS LOIN

Connaissant la position des pôles magnétiques à cette époque, l'ancienne position des continents peut être affinée en fonction de la direction du champ magnétique enregistré par les roches volcaniques lors de leur refroidissement. *Remarque* : le même phénomène est à l'origine de bandes d'anomalies magnétiques qui ont permis à Vine et Matthews de démontrer l'expansion océanique.

L'ensemble de ces données permet de recomposer la paléogéographie des continents. En remontant le temps, il devient toutefois très difficile de trouver des roches n'ayant pas été reprises dans des cycles orogéniques ultérieurs, et les incertitudes quant à la position des continents deviennent de plus en plus importantes.

➡ À RETENIR

Les domaines continentaux portent de multiples traces de fragmentation continentale, océanisation, subduction, collision, érosion et sédimentation en discordance. L'étude de ces différents indices permet de reconstituer les paléogéographies de la Terre et de montrer que cette valse des plaques tectoniques se produit selon un schéma relativement répétitif appelé cycle orogénique.

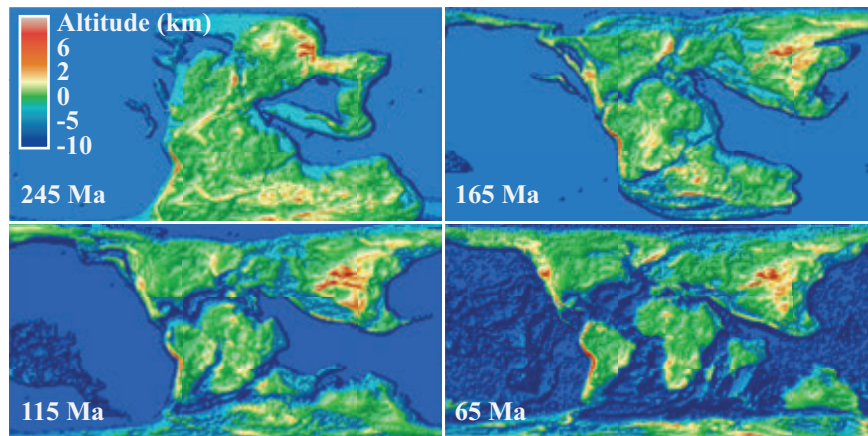


Figure 5.15 – Un exemple de reconstructions paléogéographiques du visage de la Terre

Voir aussi l'exercice 12 page 162.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 **QCM** **Vérification des connaissances**

5 min

Corrigé
p. 165

Choisissez la ou les réponse(s) exacte(s) pour chaque série de propositions.

- 1** La convergence des plaques lithosphériques :
 - ☐ a s'observe uniquement en zone de subduction ;
 - ☐ b s'observe à l'axe des dorsales océaniques ;
 - ☐ c est à l'origine des chaînes de montagnes ;
 - ☐ d est uniquement causée par la subduction.
- 2** Les orogènes :
 - ☐ a sont des chaînes de montagnes ;
 - ☐ b se forment par rifting continental ;
 - ☐ c disparaissent par subduction ;
 - ☐ d subissent une érosion permanente.
- 3** Les cycles orogéniques :
 - ☐ a durent quelques millions d'années ;
 - ☐ b comportent une phase d'océanisation ;
 - ☐ c comportent une phase d'érosion ;
 - ☐ d peuvent regrouper tous les continents sous la forme d'une pangée.

2 **Vérification des connaissances**



5 min

Corrigé
p. 165

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

- 1** Dans une chaîne de collision, on observe :
 - ☐ a des traces d'anciennes marges continentales actives et passives ;
 - ☐ b une croûte continentale amincie ;
 - ☐ c des indices de la présence d'une lithosphère océanique ;
 - ☐ d des marqueurs pétrographiques et pétrologiques de l'enfouissement.
- 2** La suture d'un océan :
 - ☐ a est marquée uniquement par la présence de traces de subduction ;
 - ☐ b se produit lors d'une subduction ;
 - ☐ c confirme qu'une subduction a eu lieu avant une collision ;
 - ☐ d se rencontre uniquement dans les chaînes de montagnes.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

3 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 166

Expliquez les affirmations suivantes.

- 1 Un océan a autrefois existé à l'emplacement actuel des Alpes.
- 2 Les orogénèses remodelent la croûte continentale.
- 3 Les cycles orogéniques impliquent la plupart des grands phénomènes géologiques.

4 Déformations — Tectonique



5 min

Corrigé
p. 166

Lycée Charlemagne, Paris

Le document proposé est une coupe dans le massif des Cerces.

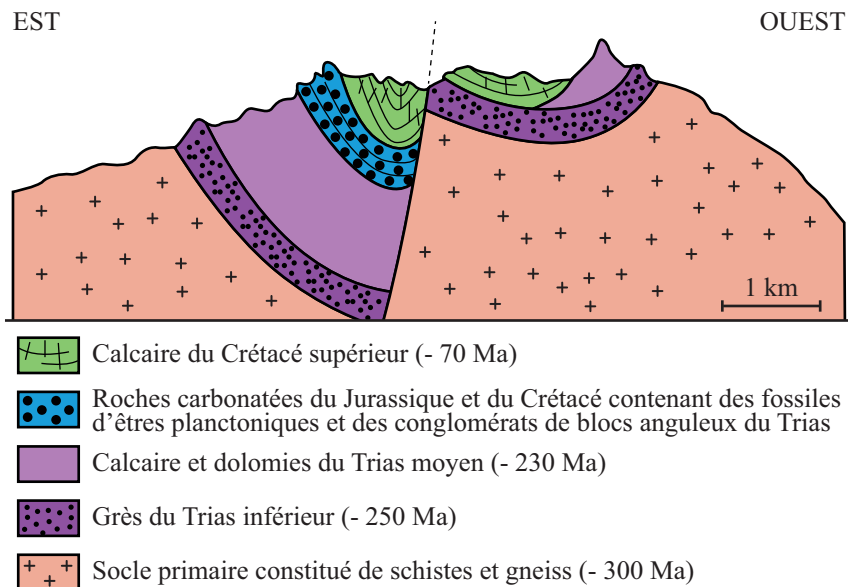


Figure 5.16 – Massif des Cerces

Sélectionnez la(les) bonne(s) réponse(s) de chaque série d'affirmations.

- 1 Ce massif montre :
 - ☐ a une faille normale ;
 - ☐ b que cette région a subi une extension et un raccourcissement ;
 - ☐ c des roches métamorphiques.
- 2 Ce même massif :
 - ☐ a pourrait appartenir à une marge continentale passive fossile ;
 - ☐ b renferme des ophiolites ;
 - ☐ c est formé en partie de sédiments ;
 - ☐ d montre un contact anormal entre le Trias moyen et le Trias inférieur.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

5 Vérification des connaissances



10 min

Corrigé
p. 167

Qui suis-je ?

- 1 Une séquence de roches de nature océanique perchée en altitude.
- 2 Un cycle au cours duquel des océans s'ouvrent et se referment.
- 3 Un chemin métamorphique rencontré en contexte de subduction.
- 4 Une structure allongée sur plusieurs milliers de kilomètres témoignant de la collision de deux masses continentales.
- 5 Le phénomène à l'origine de la disparition des chaînes de montagnes.
- 6 Un supercontinent regroupant la majorité des masses continentales.

6 Collision — Marges passives



15 min

Corrigé
p. 167

Lycée Albert Camus, Bois Colombes

L'étude des chaînes de montagnes fait apparaître, dans les couches anciennes, des structures qu'il est intéressant de comparer avec les marges continentales actuelles, c'est-à-dire la limite géologique entre la croûte océanique et continentale.

Le Document 1 (figure 5.17) montre la coupe simplifiée de la marge continentale actuelle de l'océan Atlantique Nord.

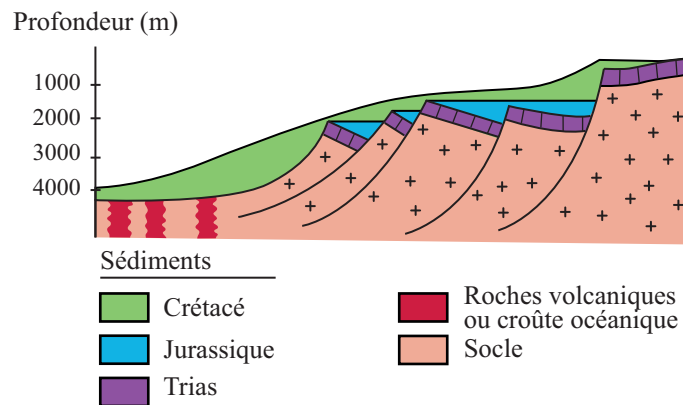


Figure 5.17 – Document 1 : coupe de la marge de l'océan Atlantique Nord

Le Document 2 (figure 5.18 page suivante), réalisé à partir d'une coupe dans le Massif du Prégénial (Alpes), est une reconstitution de la position relative des terrains présents avant leur plissement. Par souci de simplification, on a regroupé les roches en trois parties A, B et C. On précise que ces deux dernières sont d'origine marine.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

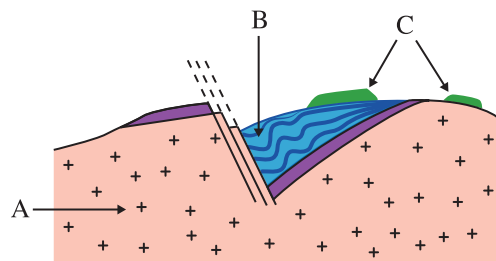


Figure 5.18 – Document 2 : reconstitution du Massif du Prégentil avant le plissement

Comparez ces deux coupes et indiquez quelles informations apporte cette comparaison sur l'histoire des Alpes.

7 Vitesse – Érosion



15 min

Corrigé
p. 168

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

En évaluant la masse de sédiments accumulés dans les bassins sédimentaires péri-himalayens depuis que les reliefs de l'Himalaya ont atteint leur taille actuelle (il y a environ 40 millions d'années), les scientifiques ont estimé que la masse de chaîne érodée atteignait 1.10^{17} tonnes.

Calculez, sans recours à la calculatrice, la vitesse d'érosion moyenne de la chaîne sur cette période de temps en mm.an^{-1} , sachant que la surface concernée est d'environ 2.10^6 km^2 et que la masse volumique moyenne des sédiments est de 2.5 t.m^{-3} ($t = \text{tonne}$).

Vous vous appuyerez sur un schéma dans lequel on assimile la montagne à un parallélépipède rectangle de surface S . On note h la hauteur de montagne érodée, et M la masse de sédiments ainsi produits.

8 Étapes – Collision



20 min

Corrigé
p. 169

Lycée Assomption, Rennes

À partir d'observations faites dans les Alpes, les géologues ont réalisé la coupe représentée sur le Document 1. Ils ont par ailleurs établi la succession des roches dans l'une des zones (Document 2). Enfin, ils ont reconstitué la structure géologique dans la région de Briançon, il y a 200 millions d'années (Document 3).

Exploitez les trois documents afin de dégager les caractéristiques d'une chaîne de collision et les étapes de sa formation.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

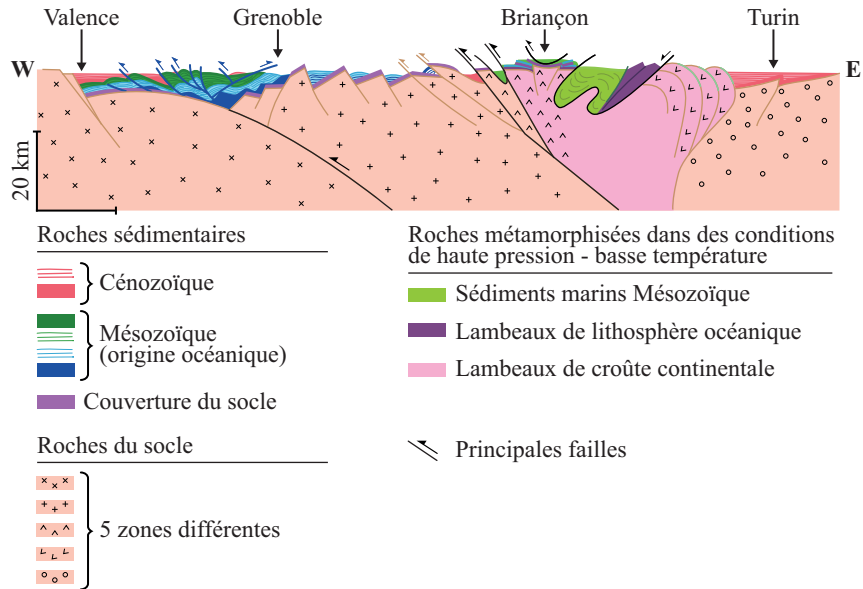


Figure 5.19 – Document 1 : coupe géologique interprétée de la chaîne des Alpes

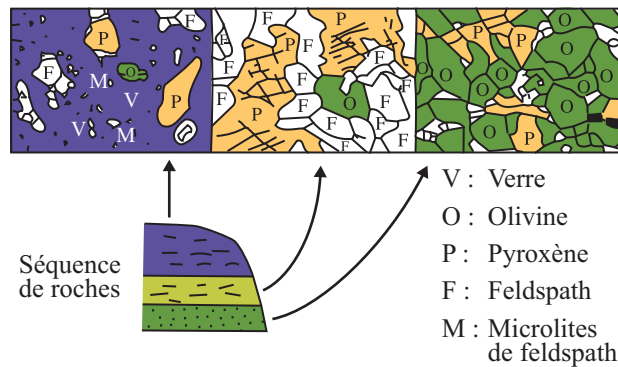


Figure 5.20 – Document 2 : observation au microscope d'une séquence de roches rencontrée dans les Alpes à proximité de Briançon

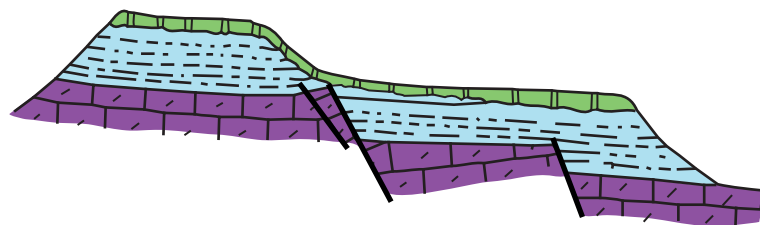


Figure 5.21 – Document 3 : reconstitution des terrains dans la région de Briançon il y a 85 millions d'années

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

9 Sédiments — Flux



20 min

Corrigé
p. 171

Lycée Albert Camus, Bois Colombes

L'Himalaya est un vaste ensemble de chaînes de montagnes qui sépare le sous-continent indien du plateau tibétain dans le sud de l'Asie. La formation des hauts-reliefs est attribuée à la rencontre et la collision, depuis 45 à 50 millions d'années, des plaques tectoniques Indienne et Eurasiatique. Des études portant sur le flux sédimentaire ont permis d'estimer les apports de sédiments par les rivières dans les bassins péritybétains depuis 70 millions d'années.

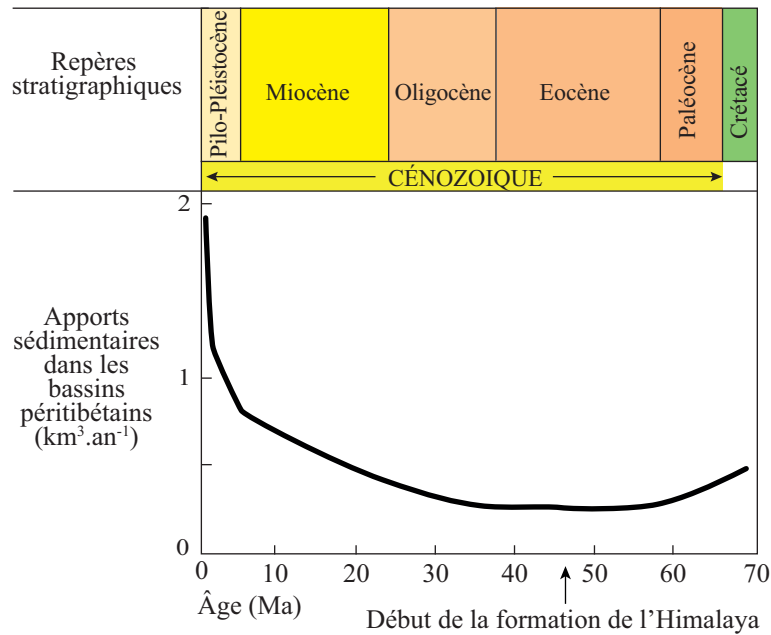


Figure 5.22 – Variations des apports de sédiments par les rivières dans les bassins péritybétains depuis 70 millions d'années

Décrivez les variations observées puis expliquez-les à l'aide de vos connaissances géologiques sur la disparition des reliefs.

10 Traces — Orogenèse



20 min

Corrigé
p. 172

Lycée des Arènes, Toulouse

À partir des informations fournies par les documents page suivante, montrez que l'Himalaya présente toutes les caractéristiques d'une chaîne de collision et reconstituez les différentes étapes de la formation de la chaîne himalayenne, en précisant le sens de déplacement des masses continentales.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

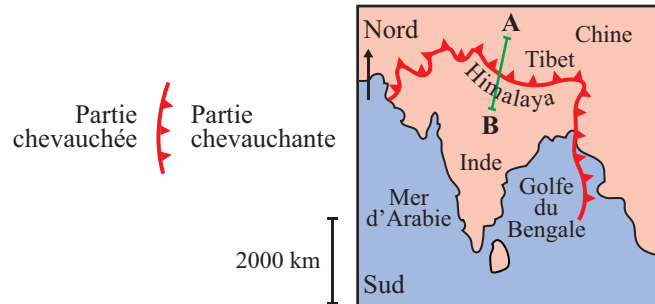


Figure 5.23 – Document 1 : situation de la chaîne himalayenne

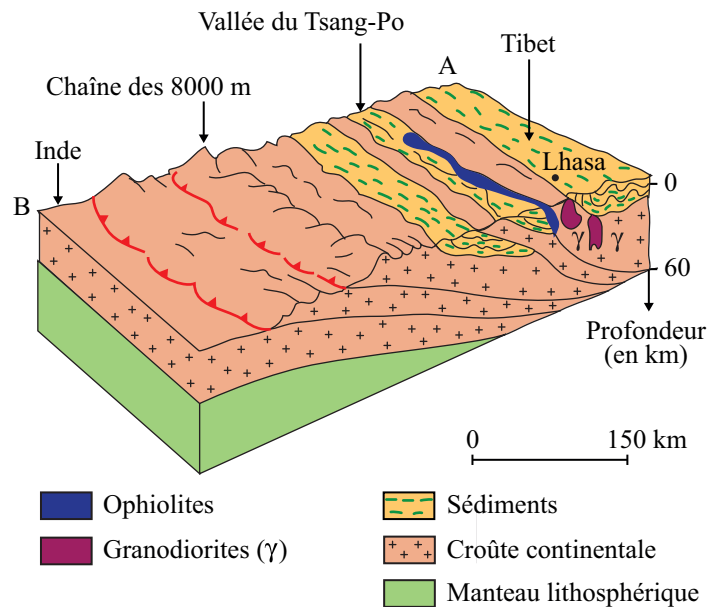


Figure 5.24 – Document 2 : bloc diagramme correspondant à la coupe AB

11 Orogenèse(s) – Massif Armoricain



20 min

Corrigé p. 174

Nouveau Programme

On s'intéresse au Massif Armoricain, au nord-ouest de la France.

- 1 Les informations contenues dans les documents pages suivantes permettent d'affirmer que (choisissez la (ou les) proposition(s) exacte(s)) :
 - a les reliefs du Massif Armoricain sont très élevés ;
 - b une grande quantité de roches sédimentaires recouvrent le Massif Armoricain ;
 - c les granites du Massif Armoricain se sont mis en place en surface ;
 - d le Massif Armoricain a subi une longue érosion.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

- 2 Relevez dans les documents les caractéristiques du Massif Armoricain montrant qu'il s'agit bien d'une ceinture orogénique ancienne.
- 3 Discutez l'âge de ce massif.
- 4 Proposez une origine à sa formation dans le cadre de la théorie des cycles orogéniques.

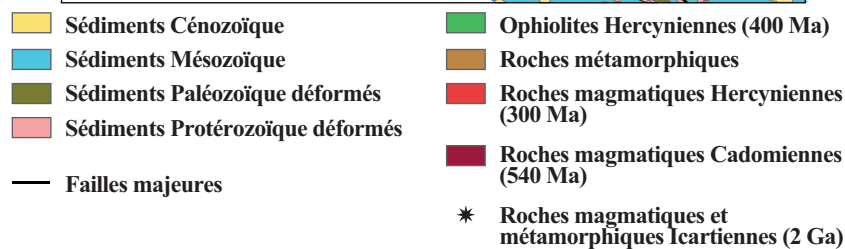
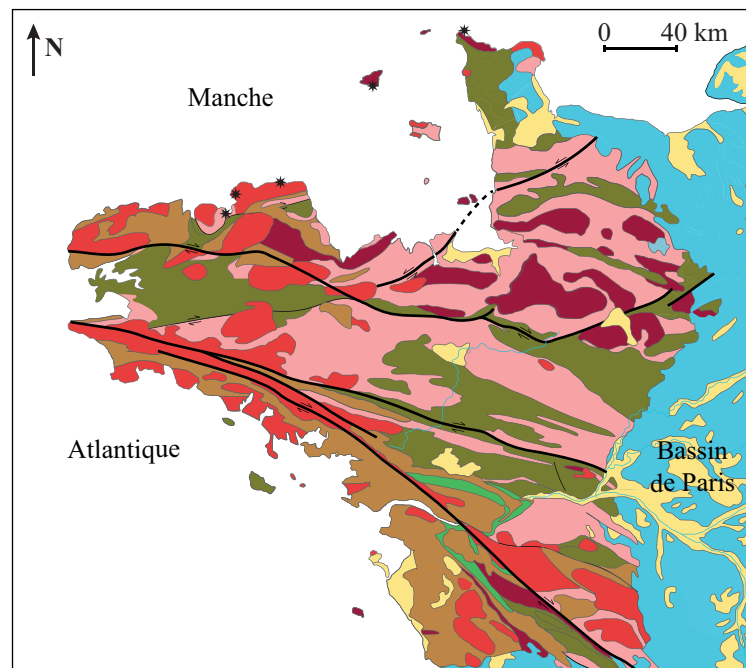


Figure 5.25 – Carte géologique simplifiée du Massif armoricain



Figure 5.26 – Frise simplifiée des temps géologiques depuis 2.5 Ga

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

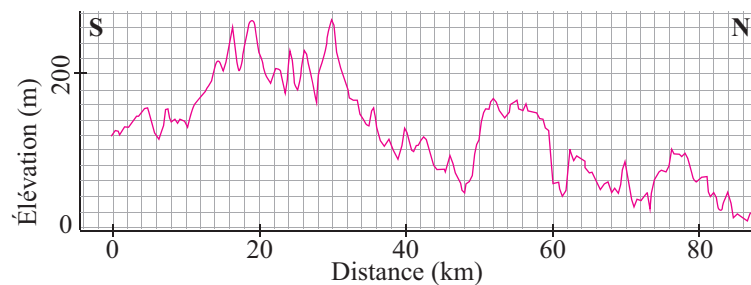


Figure 5.27 – Profil topographique NS à travers le Massif Armoricain

12 Crises biologiques – Causes



25 min

Corrigé
p. 176

Lycée Évariste Galois, Sartrouville

On cherche à comprendre les modifications de la biosphère en relation avec des changements géologiques. On s'intéresse ici à des groupes d'Invertébrés marins, les crinoïdes.

Confrontez les documents (représentés page suivante) pour élaborer une hypothèse expliquant certaines variations de la diversité des crinoïdes.

Document 1 : aspect d'un crinoïde

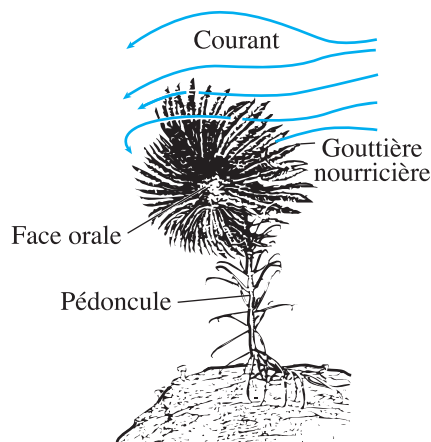


Figure 5.28 – La plupart des crinoïdes vivent fixés sur le fond au niveau des plates-formes continentales

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

Document 2

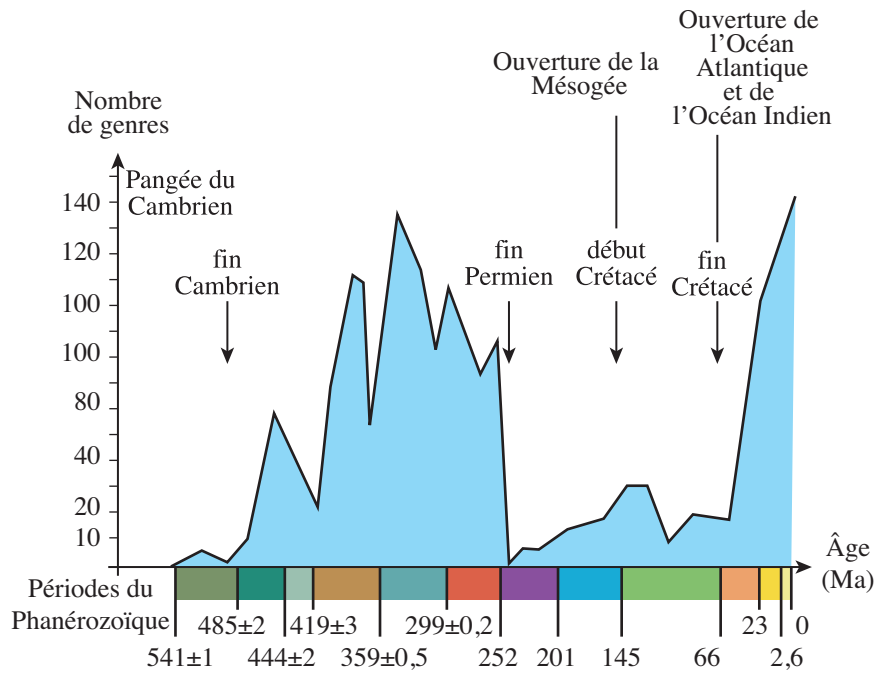


Figure 5.29 – Cycles géodynamiques et variation de la diversité des Crinoïdes à travers le nombre de genres au cours des 600 derniers millions d'années

Document 3

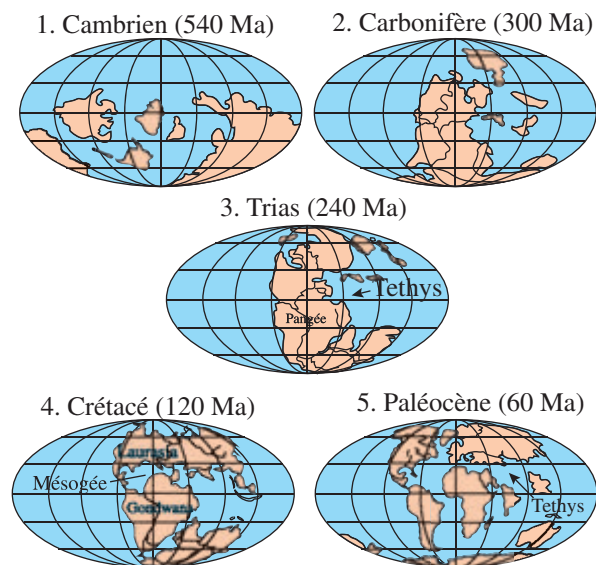


Figure 5.30 – Répartition des masses continentales et des océans du Cambrien à nos jours

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

13 Histoire des Alpes



90 min

Corrigé
p. 178

À partir d'observations de terrain, il est possible de réaliser une coupe géologique à travers la chaîne de montagnes des Alpes (Document 1 page ci-contre).

D'après vos connaissances sur les cycles orogéniques, vous rédigerez un exposé structuré retraçant l'histoire du cycle alpin. Vous pouvez vous appuyer sur des représentations graphiques judicieusement choisies. Vous utiliserez le Document 1 comme support à votre argumentation lorsque cela vous semblera nécessaire.

Document 1

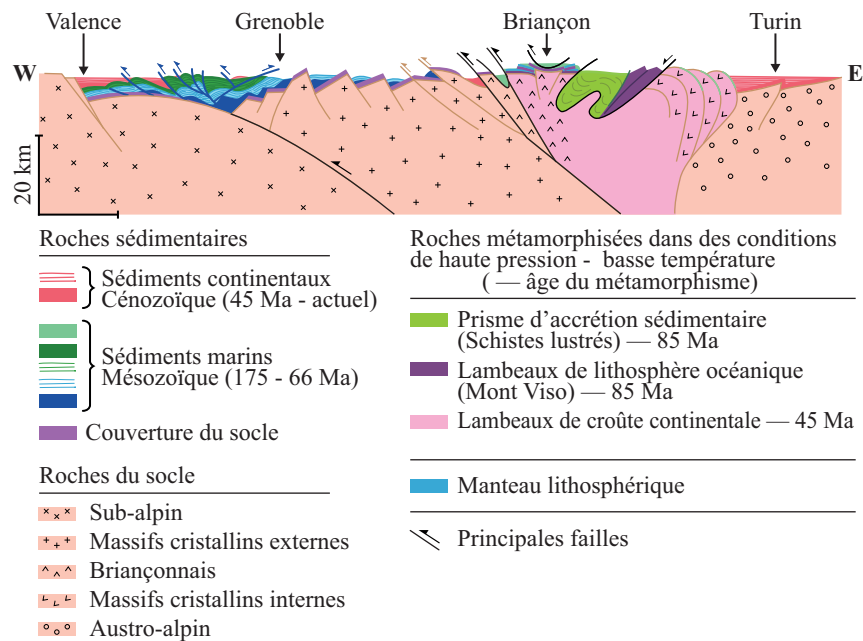


Figure 5.31 – Coupe géologique à travers les Alpes actuelles

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

1 QCM Vérification des connaissances

Énoncé
p. 154

- 1
 - a Faux. La convergence des plaques s'observe en zone de subduction ou de collision.
 - b Faux. L'axe des dorsales océaniques (et des rifts continentaux) est le siège d'une divergence des plaques.
 - c Vrai, à travers les collisions qu'elle provoque.
 - d Vrai. La subduction est le moteur du mouvement des plaques.
- 2
 - a Vrai. Il s'agit des chaînes de montagnes produites lors des orogénèses.
 - b Faux. Elles se forment par collision.
 - c Faux. Il est impossible de faire subduire de la croûte continentale du fait de sa relativement faible densité.
 - d Vrai. Cette érosion finit par complètement les araser.
- 3
 - a Faux. Ils durent plusieurs centaines de millions d'années.
 - b Vrai. Le cycle orogénique inclut l'ouverture d'un océan (et sa fermeture).
 - c Vrai.
 - d Vrai.

2 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 154

- 1
 - a Vrai. On peut observer des systèmes de blocs basculés de marges passives et des traces de subductions caractéristiques des marges actives.
 - b Faux. On observe une croûte continentale épaissie par l'empilement de nappes.
 - c Vrai. Il s'agit des ophiolites.
 - d Vrai. Il s'agit respectivement de roches et de minéraux marqueurs de l'épaississement.
- 2
 - a Faux. Elle se manifeste également par la présence d'ophiolites obduites, de sédiments océaniques ainsi que de traces d'anciennes marges passives.
 - b Faux. La subduction fait disparaître les océans mais c'est la collision qui les suture.
 - c Vrai. Les multiples marqueurs océaniques confirment qu'un océan était présent à l'emplacement des chaînes de montagnes et qu'il a disparu par subduction.
 - d Faux. On rencontre de multiples sutures partout dans le monde, où elles témoignent d'anciens cycles orogéniques.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

3 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 155

- 1 On retrouve dans les Alpes différents indices de la présence passée d'un océan.
 - Les structures de type blocs basculés bordés par des failles normales témoignent d'un rift continental ou d'une ancienne marge passive bordant un océan.
 - Les complexes ophiolitiques témoignent de l'existence d'une ancienne lithosphère océanique.
 - La présence d'assemblages minéralogiques typiques des conditions Haute Pression – Basse Température indique la fermeture d'un océan par subduction.
- 2 Les orogénèses impriment de profonds bouleversements à la croûte continentale : plis, charriages de nappes, enfouissement, métamorphisme, anatexie, etc. Ces phénomènes modifient complètement la nature et la structure de la croûte : les sédiments et granites anciens deviennent des gneiss ; de nouveaux plutons granitiques s'intrudent entre ces formations ; de multiples failles les recoupent, etc.
- 3 Les cycles orogéniques impliquent notamment :
 - des phénomènes tectoniques en divergence (rifting continental, fracturation) ;
 - des phénomènes tectoniques en convergence (subduction, collision) ;
 - les phénomènes magmatiques à l'origine de la croûte océanique (accrétion océanique à la dorsale) ;
 - les phénomènes magmatiques à l'origine de la croûte continentale (accrétion continentale au-dessus de la subduction) ;
 - de multiples mécanismes de déformation (charriages et plis lors de la collision) ;
 - de multiples situations de métamorphisme (transformation de la croûte continentale lors de la subduction) ;
 - les différents mécanismes d'érosion des masses continentales ;
 - de nombreuses situations de sédimentation (lors du rifting, dans les océans, en discordance sur les anciennes chaînes de montagnes, etc.) ;
 - des mouvements verticaux de la croûte (ajustements en profondeur lors de la collision et suite à l'érosion).

4 Déformations — Tectonique

Énoncé
p. 155

Lycée Charlemagne, Paris

- 1 **a** *Vrai.* Le compartiment supérieur est descendu : il s'agit bien d'une faille normale.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

b *Vrai.* On voit à la fois des failles normales (témoins d'une extension) et des plis (témoins d'un raccourcissement).

c *Vrai.* Le socle comporte des schistes et des gneiss.

2 **a** *Vrai.* On peut faire l'hypothèse raisonnable que le socle fracturé par une faille normale appartient à un ancien système de blocs basculés de marge massive.

b *Faux.* On reconnaît des roches typiques de la croûte continentale (schistes et gneiss) mais pas de roches de la lithosphère océanique (péridotites, gabbros et basaltes).

c *Vrai.* Toutes les roches reposant sur le socle sont des sédiments (grès, calcaires,...).

d *Faux.* On observe bien à l'ouest un contact anormal mais il est situé entre les calcaires du Crétacé Supérieur et les sédiments du Trias.

5 Vérification des connaissances

→ Énoncé
p. 156

- 1** Un complexe ophiolitique.
- 2** Un cycle orogénique ou cycle de Wilson.
- 3** Le chemin métamorphique Haute Pression-Basse Température(HP-BT).
- 4** Une ceinture orogénique.
- 5** L'érosion.
- 6** Une pangée.

6 Collision — Marges passives

→ Énoncé
p. 156

Lycée Albert Camus, Bois Colombes

L'observation de la coupe de la marge Atlantique révèle une succession de blocs basculés de socle, séparés par des failles listriques (concaves vers le haut). Le bloc supérieur est descendu : il s'agit bien de failles normales, accommodant une extension.

Cette géométrie s'est donc mise en place lors du rifting associé à la fracturation continentale précédant l'ouverture de l'océan Atlantique. On peut même dater cette fracturation : elle a eu lieu entre le dépôt des sédiments pré-rift Trias et celui des sédiments post-rift Crétacé (donc au Jurassique).

Cette fracturation s'est bien poursuivie par une océanisation, indiquée par la présence de roches de la croûte océanique.

Parallèlement, l'observation du Massif du Prégentil montre un socle fracturé par une faille. Le remplissage de l'espace à droite par les sédiments B suggère qu'il s'agit d'une faille normale. Les sédiments C rappellent les sédiments post-rift du Document 1.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Cette configuration, associée à la nature océanique des sédiments B et C, suggère qu'on est en présence d'un ancien système de blocs basculés associé à l'ouverture d'un océan à la même époque que l'océan Atlantique Nord.

Vu la présence de ces indices en altitude, associés à des marqueurs de compression (mention d'un plissement), on peut faire l'hypothèse qu'il s'agit de la marge passive de l'océan Alpin dont la fermeture par collision est à l'origine de la mise en place des Alpes.

7 Vitesse – Érosion

Énoncé
p. 157

Lycée Richelieu, RUEIL-MALMAISON

MÉTHODE

Bien identifier la demande de l'énoncé : on cherche une vitesse d'érosion moyenne en mm.an^{-1} . Il s'agit donc de la diminution d'altitude de la chaîne h sur un temps $T = 40 \text{ Ma}$, divisée par ce temps. On exprime donc cette diminution d'altitude h en fonction des données fournies S et M .

Commencer par un schéma simple ; résoudre littéralement, puis effectuer l'application numérique.

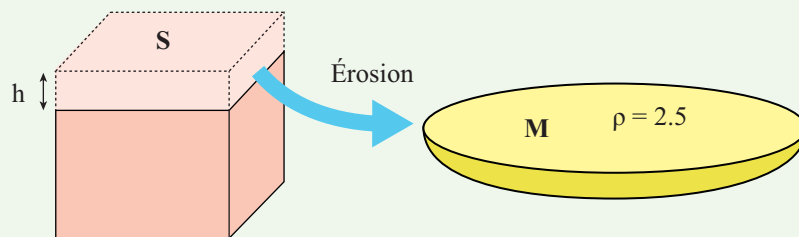


Figure 5.32 – Schéma présentant les données utiles pour le calcul de la vitesse d'érosion

On nous fournit la masse volumique $\rho = 2.5 \text{ t.m}^{-3}$.

Le volume de sédiments déposés en $T = 40 \text{ Ma}$ est de :

$$V = \frac{M}{\rho}$$

On fait l'hypothèse que ce volume correspond à celui érodé sur la surface S , d'où on tire $V = h \times S$ soit :

$$h = \frac{V}{S}$$

On injecte V obtenu dans l'équation précédente :

$$h = \frac{M}{\rho S}$$

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

Pour obtenir une vitesse on divise par les temps T :

$$v = \frac{h}{T} = \frac{M}{\rho ST}.$$

On remplace après avoir vérifié que toutes les masses sont en tonnes, les tailles en m ($S = 2.10^{12} \text{ m}^2$) et les temps en Ma :

$$\begin{aligned} v &= \frac{M}{\rho ST} = \frac{1.10^{17}}{2.5 \times 1.10^{12} \times 40} = \frac{1.10^{17}}{100 \times 2.10^{12}} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{10^{17}}{10^{14}} \right) = 0.5 \times 10^3 \text{ m.Ma}^{-1}. \end{aligned}$$

Soit $v = 0.5 \text{ km.Ma}^{-1} = 0.5 \text{ mm.an}^{-1}$.

Il y a donc eu érosion de l'Himalaya à la vitesse moyenne de 0.5 mm.an^{-1} depuis 40 Ma.

MÉTHODE

Bien vérifier que le résultat obtenu n'est pas aberrant. Ici vous pouvez tenter de visualiser une érosion de 5 cm en un siècle, sur un monument par exemple. Cela paraît beaucoup, mais pas insensé.

8 Étapes — Collision

Lycée Assomption, Rennes

 Énoncé
p. 157

MÉTHODE

Rechercher dans les documents les éléments qui permettent de répondre aux deux aspects de l'énoncé : caractéristiques d'une chaîne de collision / étapes ayant précédé sa formation.

Le Document 1 présente en coupe les grandes unités de la chaîne des Alpes. On y repère :

- des déformations importantes (plis, chevauchements, nappes charriées sur de grandes distances) qui témoignent d'un raccourcissement.
- des blocs de socle évoquant des blocs basculés de marge passive (notamment à l'est de Grenoble); des roches sédimentaires océaniques, et des ophiolites (« lambeaux de lithosphère océanique »), qui suggèrent la présence passée d'un océan ;
- des roches métamorphiques témoignant de « conditions Haute Pression – Basse Température » qui montrent donc des transformations minéralogiques subies dans un contexte de subduction.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Le Document 2 présente une séquence de roches rencontrées dans les Alpes.

 MÉTHODE

Même si vous ne connaissez pas son nom, décrivez la texture de la roche et la taille des minéraux : elles vous donnent des informations sur ses conditions de formation (grenue = en profondeur / microlithique = en surface).

De bas en haut :

- une roche à texture grenue composée d'olivines et de quelques pyroxènes : une péridotite du manteau ;
- une roche à texture grenue comportant notamment des pyroxènes et des feldspaths : un gabbro, roche plutonique cristallisée en profondeur ;
- une roche à texture microlithique (riche en verre) comportant des petits minéraux d'olivines, de pyroxène et de feldspaths : un basalte, roche volcanique cristallisée en surface.

Une telle succession est caractéristique de la lithosphère océanique. Retrouver cette séquence en domaine continental suggère qu'elle y a été charriée à la faveur d'une collision : il s'agit d'une ophiolite.

Le Document 3 propose une reconstitution de la disposition des terrains dans la région de Briançon au Crétacé. On y reconnaît une succession de blocs effondrés par un système de failles normales. Cette géométrie témoigne d'un étirement tel qu'il peut avoir lieu lors d'une fracturation continentale, ou rifting.

Remarque : on ne peut pas strictement parler de blocs basculés à partir de ce document : la coupe ne laisse pas voir le socle et l'absence de sédiments en éventail suggère que les blocs ne "basculent" pas sur des failles incurvées (dites listriques).

On peut ordonner ces éléments pour reconstituer les étapes ayant précédé la formation de la chaîne alpine :

- l'ouverture d'un *océan alpin* par fracturation continentale ;
- la fermeture de cet océan par subduction ;
- la collision de deux masses continentales, au cours de laquelle se produit l'obduction d'un fragment de lithosphère océanique resté en surface et l'exhumation d'un fragment qui avait subduit.

Les différents marqueurs océaniques observés (blocs basculés de marge passive, ophiolite, sédiments océaniques, roches marqueurs de subduction, etc.) marquent l'emplacement de la *suture* de l'océan alpin.

Différents éléments appuient l'hypothèse selon laquelle cette chaîne s'est édifiée suite à une collision continentale (voir liste page suivante).

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

- les déformations de la croûte montrent un raccourcissement qui peut être attribué à la convergence des plaques ;
- la présence (en altitude) d'une ancienne lithosphère océanique témoigne d'importants charriages de nappes ;
- l'existence d'un métamorphisme HP–BT suggère que les Alpes ont été le siège d'une récente subduction, qui a pu se transformer en collision suite à la tentative de subduction d'un fragment continental.

Ces différents éléments caractérisent une *ceinture orogénique*.

9 Sédiments — Flux

→ Énoncé
p. 159

Lycée Albert Camus, Bois Colombes

⚠ ATTENTION

L'orientation de l'axe des temps sur le graphique est trompeuse. Lisez bien le graphique depuis la formation de l'Himalaya jusqu'au présent, c'est-à-dire de la droite vers la gauche.

🧠 MÉTHODE

Repérer les deux aspects de l'énoncé et les utiliser pour hiérarchiser votre réponse : 1) décrire ; 2) expliquer.

- On n'observe pas d'augmentation franche des apports sédimentaires avant la formation de l'Himalaya il y a 45-50 millions d'années, ni dans les 20 premiers millions d'années de son histoire. Ce n'est qu'à partir de 35 Ma que les apports sédimentaires par les rivières dans les bassins tibétains se mettent à augmenter : ils triplent entre 35 et 5 Ma (de $0.25 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ à $0.75 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$). Cette augmentation est encore plus marquée depuis 5 Ma où ils font encore plus que doubler pour atteindre près de $2 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$. Au bilan, on observe une augmentation de plus en plus importante des apports sédimentaires dans les bassins environnant l'Himalaya depuis 35 Ma.
- On suppose que les sédiments apportés par les rivières dans les bassins sédimentaires péri-tibétains représentent les produits de l'érosion de la chaîne himalayenne. L'augmentation des flux observés est donc à relier à une augmentation de l'érosion.

🧠 MÉTHODE

Tenter de se poser toutes les questions que soulève le document : pourquoi une augmentation ? pourquoi à cette date ? pourquoi s'amplifie-t-elle ? Si vous n'en connaissez pas les réponses, proposez des hypothèses.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Il n'est pas étonnant de voir une forte augmentation de l'érosion suite à la mise en place de la chaîne de montagnes himalayenne : ces forts reliefs, culminant à plus de 8 000 m, sont très favorables à la survenue de glissements de terrain qui démantèlent l'orogène. Ces reliefs forment également une longue barrière qui bloque complètement les masses d'air en provenance de l'Océan Indien, provoquant des précipitations diluviennes (la mousson) qui érodent fortement les reliefs. Ceci est accentué par la fragilisation des roches par l'alternance gel-dégel en altitude et le vent fort qui déblaie les sommets.

On peut en revanche se demander pourquoi cette augmentation de l'érosion ne débute qu'à 35 Ma et non vers 45-50 Ma lorsque commence la collision. L'érosion étant fortement corrélée à la présence de reliefs, on peut faire l'hypothèse, à partir de ce document, que les reliefs himalayens n'ont acquis leur ampleur actuelle qu'à partir d'environ 35 Ma.

► POUR ALLER PLUS LOIN

Une dernière question se pose : pourquoi cette nouvelle augmentation depuis 5 Ma ? On peut émettre plusieurs hypothèses :

- une forte augmentation des reliefs depuis 5 Ma ? C'est toutefois peu probable : la chaîne est déjà vieillissante et il y a peu de raisons que la collision s'accélère ;
- une augmentation de la mousson à cette époque ? Cette hypothèse a longtemps été à la mode, bien que rien ne la justifie ;
- un changement de provenance des sédiments ? En effet, l'énoncé parle uniquement des bassins péri-tibétains, c'est-à-dire situés au nord de la chaîne. Jusqu'à 5 Ma, ces bassins ont pu être peu alimentés en sédiments tandis que l'essentiel partait vers le sud. Après 5 Ma, un changement du cours des rivières peut avoir nettement augmenté l'apport sédimentaire vers ces bassins ;
- une augmentation de la quantité d'anciens sédiments remobilisés ? En effet, les sédiments qui se déposent autour de l'Himalaya sont perpétuellement remobilisés par les rivières car la chaîne continue de croître. Avec le temps, les bassins au pied des reliefs reçoivent de plus en plus de sédiments anciens remaniés. Ainsi, les apports sédimentaires semblent augmenter beaucoup plus vite que n'augmente l'érosion.

10 Traces — Orogenèse

Lycée des Arènes, Toulouse

Énoncé
p. 159

► MÉTHODE

Rechercher dans chaque document les informations qui permettent de répondre aux trois aspects de l'énoncé : caractéristiques d'une chaîne de collision / étapes ayant précédé sa formation / orientation des plaques.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Le Document 1 présente la situation de la chaîne himalayenne. Celle-ci se localise entre le nord de l'Inde et le Sud-ouest de la Chine, le long d'un chevauchement de grande ampleur allant du Pakistan (à l'ouest) au Bangladesh (au sud-est) en passant par le Tibet. La direction des signes de chevauchement (▲) nous indique de plus que le bloc du sud (où se trouve l'Inde) passe sous le bloc du nord (l'Eurasie). Cette situation, ainsi que la taille des blocs en présence (de l'ordre de 3 000 km pour l'Inde), suggère que ce chevauchement majeur est en fait une frontière de plaques en convergence où s'effectue la collision entre deux masses continentales.

Le Document 2 est un bloc diagramme schématique d'échelle crustale, présentant un zoom 3D sur la coupe AB localisée dans le Document 1. Ce bloc met en évidence la présence d'un grand nombre de chevauchements de la partie nord sur la partie sud. L'un d'eux correspond probablement à la limite de plaque identifiée sur le document précédent.

Le bloc diagramme fait état d'un fort épaissement de la croûte, qui dépasse 60 km d'épaisseur sous le Tibet, contre 30 à 35 km en règle générale. Cet épaissement est la conséquence des multiples chevauchements que l'on vient de mettre en évidence. Son importance (un doublement de l'épaisseur de la croûte) témoigne d'un raccourcissement de grande ampleur.

Au niveau du Tibet, on observe des plutons de roches magmatiques (les granodiorites) que l'on rencontre habituellement dans des zones de subduction. On note également la présence d'ophiolites, c'est-à-dire des lambeaux de lithosphère océanique anormalement présents au sein d'une croûte continentale.

On peut ordonner ces éléments pour reconstituer les étapes ayant précédé la formation de la chaîne himalayenne :

- un océan existait à l'emplacement de l'actuelle chaîne ;
- cet océan s'est fermé par subduction ;
- la subduction a fini par faire se rencontrer les masses continentales présentes au nord (Eurasie) et au sud (Inde) de cet océan ;
- les deux masses continentales s'affrontent désormais sous la forme d'une collision au cours de laquelle des fragments d'une lithosphère océanique se sont retrouvés portés en domaine continental.

Différents éléments appuient l'hypothèse selon laquelle cette chaîne s'est édifiée suite à une collision continentale :

- l'épaissement de la croûte témoigne d'un raccourcissement qui peut être attribué à la convergence des deux plaques ;
- la présence (en altitude) de lambeaux d'une ancienne lithosphère océanique marque l'emplacement de la *suture* d'un ancien océan (appelé *Tethys*).
- l'existence de plutons de granodiorites suggère que l'Himalaya a été le siège d'une récente subduction, qui a pu se transformer en collision suite à la tentative de subduction d'un fragment continental (l'Inde).

Ces différents éléments caractérisent une *ceinture orogénique*.

Nous avons pu mettre en évidence l'orientation des plaques en jeu :

- l'orientation est-ouest des chevauchements et de la suture ophiolitique témoigne d'une convergence nord-sud ;
- lors de la collision, les terrains de la plaque indienne au sud ont plongé très largement sous l'Eurasie présente au nord.

11 Orogenèse(s) – Massif Armoricain

Énoncé
p. 160

Nouveau Programme

1 [a] *Faux*. Le profil topographique montre des reliefs peu élevés, dont l'altitude n'excède pas les 300 mètres, ce qui est très inférieur aux altitudes de 3 à 8 km relevées dans les chaînes récentes (Alpes par exemple).

[b] *Faux*. Si la carte géologique du Massif Armoricain montre de nombreuses roches sédimentaires à l'affleurement, celles-ci sont anciennes (Protérozoïque et Paléozoïque) et déformées. Une grande quantité de roches sédimentaires du Mésozoïque *recouvrent* le Bassin Parisien, mais on ne les retrouve pas sur le Massif Armoricain.

[c] *Faux*. Les granites sont des roches plutoniques d'origine profonde.

[d] *Vrai*. Pour que ces granites soient visibles à l'affleurement, il faut que toute l'épaisseur de croûte qui les recouvrait ait été déblayée par l'érosion.

2 Le Massif Armoricain comporte de nombreuses traces de déformation : mention de sédiments déformés et présence de failles. La carte révèle de plus un important métamorphisme qui revêt plusieurs niveaux d'intensité : déformation des sédiments < transformation des roches (indication de roches métamorphiques) < anatexie. En effet, la présence d'un grand nombre de granites nous indique que ce métamorphisme est allé jusqu'à la fusion partielle de la croûte.

Associés à la présence d'une suture océanique (mention d'ophiolites), ces différents éléments semblent indiquer l'existence d'au moins une ceinture orogénique.

Il convient alors de se demander s'il s'agit d'une orogène actuelle, comme les Alpes, ou de la cicatrice d'une orogénèse passée ; autrement dit s'il s'agit de "montagnes jeunes" ou d'un "massif ancien". Le faible relief, le niveau d'érosion avancé et l'existence de sédiments Cénozoïques déposés *en discordance* sur le massif montrent qu'il s'agit de la cicatrice d'une orogénèse passée.

MÉTHODE

On cherche alors à proposer un âge plus précis pour cette orogénèse : c'est-à-dire la relier à un cycle orogénique connu.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

3 Plusieurs éléments justifient de rattacher cette ceinture orogénique au cycle hercynien :

- la présence d'ophiolites "hercyniennes" datées de 400 Ma suggère la fermeture d'un océan peu avant le pic de l'orogénèse au Carbonifère (360-300 Ma) ;
- un grand nombre de granites "hercyniens" datent de la fin de cette période (300 Ma) : ils ont pu se former par anatexie suite à l'empilement de lambeaux crustaux ;
- tous les sédiments antérieurs à cette période sont déformés tandis que ceux qui se sont déposés après ne le sont pas : selon le principe de recoupement, une déformation a eu lieu à la fin du Paléozoïque et avant le début du Mésozoïque.

Toutefois, la croûte que remodelent les orogénèses n'est généralement pas exempte de déformations. C'est le cas ici : la légende fait mention de roches magmatiques « cadomiennes » et « icartiennes », suggérant que ces dernières peuvent être attribuées à deux autres cycles orogéniques datés respectivement de 540 et 1 800 Ma.

Le massif Armoricaïn est donc un patchwork de ceintures orogéniques d'âges divers. La plus récente de ces orogénèses, dont on retrouve donc le plus de traces, a eu lieu lors du cycle hercynien, autour de 360-300 Ma.

4 L'orientation des failles et des roches (terrains anciens au nord, terrains hercyniens au sud) permet de faire une hypothèse sur l'histoire du cycle orogénique hercynien dans le Massif Armoricaïn :

- existence préalable d'un ancien continent ayant connu plusieurs cycles orogéniques antérieurs ;
- l'ouverture d'un océan sépare ce continent en deux masses continentales : l'une au sud, l'autre au nord ;
- une subduction ferme cet océan ;
- la subduction finit par faire se rencontrer les masses continentales présentes au nord et au sud de cet océan ;
- les deux masses continentales s'affrontent sous la forme d'une collision au cours de laquelle des fragments d'une lithosphère océanique se retrouvent portés en domaine continental ;
- la chaîne de montagnes formée subit une importante érosion qui met à l'affleurement ses granites ;
- des sédiments se déposent en discordance sur l'ancienne chaîne : dès le Mésozoïque dans le Bassin Parisien ; au Cénozoïque dans le Massif Armoricaïn.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

12 Crises biologiques – Causes

Énoncé
p. 162

Lycée Évariste Galois, Sartrouville

⚠ ATTENTION

Le terme « diversité » désigne ici nombre de genres au sein de la seule famille des crinoïdes.

🔍 MÉTHODE

Attention au hors sujet. Analyser les documents dans l'ordre qui vous paraît le plus approprié de manière à sélectionner les informations importantes : l'analyse des documents suivants montre qu'une description fine des crinoïdes n'est pas le sujet. On fera appel au document 1 plus tard, pour leur besoin d'implantation.

Le Document 2 nous apprend que le groupe des Crinoïdes existe depuis l'*explosion Cambrienne*, grande diversification des formes de vie vers 540 Ma. Le nombre de genres connaît ensuite une augmentation assez chaotique jusqu'à atteindre vers 350 Ma une valeur proche de la diversité actuelle (autour de 140 genres). Cette diversité diminue ensuite progressivement : disparition d'une trentaine de genres en 100 Ma puis extinction brutale des 100 restants à la fin du Permien. Grâce à la survie d'un genre préservé de l'extinction, on constate une nouvelle diversification, plus lente, qui se stabilise autour de 20 genres pendant 200 Ma, avant de connaître une forte augmentation depuis 50 Ma.

Par ailleurs, la diversité des crinoïdes montre 7 périodes de chute brutale : des crises biologiques. Malgré la faible résolution temporelle de la courbe, ces crises peuvent potentiellement être associées à des fins de périodes du Paléozoïque.

Une partie de ces variations peut être corrélée aux données paléogéographiques proposées sur le Document 3. Celui-ci révèle une importante migration des masses continentales au cours du Phanérozoïque (540 derniers millions d'années), avec notamment la formation d'une pangée entre le Carbonifère et le Trias (la plupart des masses continentales sont réunies sous la forme d'un supercontinent) et l'éclatement de ces masses continentales depuis le Trias, associé à l'ouverture de différents océans (Mésogée, puis Atlantique et Indien), aboutissant à la situation actuelle.

Il est intéressant de noter que ces grandes tendances géologiques sont assez bien corrélées à la diversité des crinoïdes : la période de regroupement des continents entre le Carbonifère et le Trias voit une diminution de leur nombre de genres, aboutissant à une extinction de masse, tandis que la période de fracturation continentale et d'océanisation depuis le Trias voit une augmentation du nombre de genres aboutissant à une grande diversification au Cénozoïque.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

Cette corrélation peut s'expliquer au vu du Document 1 : on y apprend que les Crinoïdes sont des espèces marines dont la plupart vivent fixées sur les plateformes continentales, c'est-à-dire des portions de lithosphère continentale immergées s'étendant à plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres des côtes. Il s'agit de zones d'eau peu profonde (souvent moins de 100 m de profondeur), qui peuvent facilement être émergées en cas de baisse du niveau marin.

Or lors des périodes de pangée, pour une même superficie continentale, le périmètre des côtes est bien plus restreint que quand les masses continentales sont éclatées en de multiples fragments, ce qui limite d'autant l'aire de répartition possible des crinoïdes (et de toutes les espèces de plateformes).

Par ailleurs, on sait que lors des périodes de réunion des continents, l'activité des dorsales est très limitée par rapport aux époques de fragmentation continentale : celles-ci occupent donc beaucoup moins d'espace dans les océans, dont le niveau baisse. Ce phénomène peut être amplifié par la formation d'immenses calottes polaires sur ces supercontinents, comme c'est le cas au Carbonifère (voir exercice 9 page 330 du chapitre 10).

Les Crinoïdes étant inféodés aux plateformes continentales, ils sont entièrement tributaires de l'immersion de celles-ci. La baisse du niveau marin amorcée au Carbonifère, en provoquant l'émergence des plateformes continentales, a ainsi pu précipiter leur extinction.

Synthèse :

Notre analyse des documents permet de proposer l'hypothèse suivante : les cycles orogéniques sont responsables d'une partie non négligeable de la variation de diversité des Crinoïdes, en faisant varier la surface de plateformes continentales sur lesquelles ils sont fixés. Ainsi, les épisodes de fracturation continentale sont propices à une diversification des crinoïdes en mettant en place de nouvelles plateformes et en provoquant leur immersion grâce à la formation de multiples dorsales qui font déborder les océans. Inversement, la réunion des continents sous la forme de pangées réduit le périmètre des côtes et peut provoquer une émergence des plateformes continentales, pouvant conduire à l'extinction de nombreux genres de crinoïdes.

Remarque : de nombreuses espèces subissent la même dynamique d'extinction au Permien, même si le coup fatal semble être porté par des éruptions volcaniques massives vers 250 Ma.

Une autre partie des variations de cette diversité est toutefois difficilement explicable en premier lieu avec cette hypothèse : c'est notamment le cas de la chute de diversité au Crétacé, alors même que les océans sont en pleine expansion.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

13 Histoire des Alpes

Énoncé
p. 164

MÉTHODE

Avant de commencer : au brouillon (15-20 minutes)

Lire le sujet plusieurs fois et en repérer les limites (ce qui doit être traité, ce qui serait hors sujet).

Noter au brouillon les notions essentielles qui seront à développer, faire une liste de mots clés à mentionner (convergence, ophiolites, failles, rift, métamorphisme, etc.).

Formuler une problématique : il s'agit de comprendre quel problème soulève le sujet (ici celui du déroulement d'un cycle orogénique).

Ébaucher un plan en regroupant de façon logique les notions à développer.

Vérifier que ce plan réponde à la problématique.

Vérifier que chacune des notions apporte un nouvel élément de réponse au problème. Si ce n'est pas le cas, ne pas aborder ces notions dans le développement : la qualité de synthèse est évaluée.

Lorsqu'un document est proposé, comme ici, repérer les informations qui pourront servir à illustrer le développement. Organiser ces informations en fonction du plan choisi (il s'agit ici de replacer ces éléments dans l'ordre) :

- ancienne marge passive : indice de fracturation continentale ;
- « lambeaux de lithosphère océanique » : indices d'océanisation ;
- métamorphisme HP-BT : indice de subduction ;
- plis et chevauchements : indices de collision, etc.

Décider du ou des schémas à réaliser pour illustrer le devoir.

Réfléchir à une conclusion : partie très importante, elle ne doit pas être rédigée dans l'urgence à la fin du devoir.

Introduction

MÉTHODE

L'introduction montre que le sujet est compris et cadré. Elle doit être concise : quelques lignes qui se détachent en en-tête du devoir.

Elle comporte :

- une présentation rapide du sujet qui explicite des termes principaux : il ne s'agit pas de faire une liste de définitions mais de replacer ces termes dans une phrase cohérente qui amène à la problématique ;
- une problématique ;
- l'annonce du plan, qui explique la démarche choisie pour répondre à la problématique formulée.

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

Les Alpes sont une chaîne de montagnes actuelles dont une partie se situe en France, au sud-est du territoire métropolitain. Elles présentent des reliefs élevés (culminant à près de 5 000 m), mis en place lors d'une collision continentale. Cette dernière s'inscrit, à l'échelle des temps géologiques, dans une logique générale d'ouvertures et de fermetures d'océans, appelée cycles orogéniques.

Comment s'enchaînent les étapes successives du cycle orogénique qui a mené à la formation de la chaîne alpine ?

Pour répondre à cette problématique, nous présenterons dans l'ordre les trois principaux processus qui ont mené à la chaîne que nous connaissons aujourd'hui : une fracturation continentale, une subduction, puis une collision.

MÉTHODE

Le plan doit se détacher clairement de la copie. Ne pas hésiter à sauter des lignes et à utiliser des titres explicites, soulignés et en couleur.

Le développement doit être aéré : chaque idée est présentée dans un paragraphe séparé. Faire des phrases courtes allant directement à l'essentiel.

1) Fracturation continentale et océanisation

Le cycle orogénique qui a formé la chaîne des Alpes commence par une étape d'extension, comme en témoignent les failles normales délimitant des blocs basculés toujours visibles dans les massifs cristallins externes (Document 1).

La future région des Alpes était donc un rift continental, où se déposaient des sédiments syn-rift, comme dans le rift actuel de la région Afar.

ATTENTION

Attention au hors-sujet : seules les connaissances en rapport avec le sujet, et d'éventuels exemples pour les illustrer, sont pris en compte dans la notation.

Veiller à utiliser un vocabulaire scientifique précis et à bon escient.

Attention à l'orthographe et à la syntaxe (bannir les abréviations).

Ce contexte de divergence des plaques tectoniques se poursuit par une fracturation continentale, à l'origine de l'ouverture d'un océan : le futur océan alpin.

Quelques millions d'années après cette période, la région connaît donc la mise en place d'un plancher océanique le long d'une dorsale médio-océanique : c'est l'océanisation.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

ATTENTION

Aucune obduction n'est répertoriée dans le Document 1. Il s'agit toutefois d'une notion importante, à mentionner, en l'illustrant de préférence avec un exemple.

Quelques lambeaux de cette lithosphère océanique sont préservés dans la chaîne actuelle : on parle alors d'ophiolites. Celles-ci ont pu être charriées sur le continent lors de phénomènes d'obduction, comme c'est le cas au Chénaillet dans les Alpes.

Quelques millions d'années plus tard, la lithosphère océanique formée devient trop dense et s'enfonce dans l'asthénosphère : elle entre en subduction.

MÉTHODE

L'existence de phrases de transition entre les différentes parties démontre la logique du plan. Bien les démarquer : sauts de ligne et utilisation de connecteurs logiques.

II) Subduction

L'océan alpin entre en subduction sous le socle austro-alpin (voir schéma).

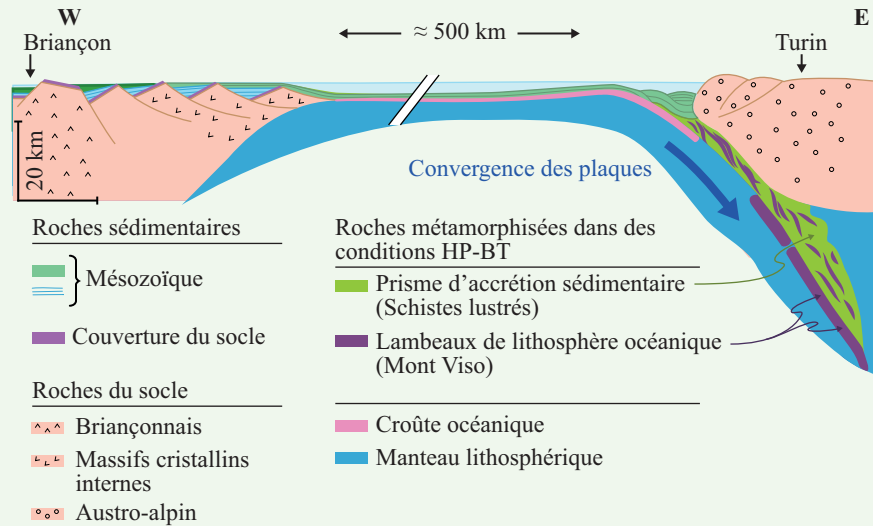


Figure 5.33 – Schéma : Coupe géologique reconstituée à travers la même zone il y a 85 Ma, montrant la subduction de l'océan alpin sous le domaine continental Austro-Alpin (flèche bleue)

LES TRACES DU PASSÉ MOUVEMENTÉ DE LA TERRE • CHAP. 5

MÉTHODE

Selon l'intitulé du sujet, un ou des schémas peuvent illustrer les notions principales. Ils doivent mettre la copie en valeur : grands, encadrés, en couleurs, avec un titre, une légende pertinente, une échelle et éventuellement une orientation.

Le schéma doit suffire à expliquer une notion. Il est déconseillé de répéter à l'écrit les informations mentionnées sur le schéma, ce qui constitue une importante perte de temps.

Adapter le schéma au sujet (ici faire figurer des informations issues du Document 1 : socle austro-alpin, Mont Viso, etc.).

D'autres schémas étaient également possibles, pour illustrer les autres parties du développement (voir page suivante).

La subduction entraîne à de fortes profondeurs (plus de 50 km) les roches de la lithosphère océanique plongeante (Mont Viso), une partie du prisme d'accrétion sédimentaire (schistes lustrés) ainsi que des lambeaux de croûte continentale (massifs cristallins internes). L'enfouissement de ces roches provoque alors leur métamorphisme dans des conditions de Haute Pression - Basse Température (Document 1), caractéristiques de la subduction.

Ce processus est généralement à l'origine d'un magmatisme de subduction à l'origine de l'accrétion continentale, non représenté ici.

Certaines de ces roches sont aujourd'hui visibles en surface, témoignant d'un processus d'exhumation lors d'une collision continentale.

III) Collision continentale

La fermeture de l'océan alpin par subduction provoque la convergence des deux domaines continentaux qui avaient été séparés lors de la fracturation continentale. Ceux-ci finissent par s'affronter lors d'une collision continentale qui suture l'océan alpin.

La convergence des plaques tectoniques se poursuit durant la collision, provoquant le raccourcissement du domaine continental à la faveur des nombreux plis, failles inverses et nappes de charriage (Document 1).

Ces processus sont à l'origine d'un épaississement de la croûte continentale, provoquant le métamorphisme des terrains enfouis (dans des conditions de Moyenne pression – Moyenne Température), ainsi que la fusion partielle (anatexie) d'une partie des minéraux de la croûte.

Ce raccourcissement se maintient jusqu'à l'époque actuelle, comme en témoignent les reliefs élevés des Alpes.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Conclusion

MÉTHODE

La conclusion donne son unité à l'ensemble et influence l'impression finale que le correcteur a du devoir. Elle doit être rédigée à l'avance au brouillon : il est impardonnable de la sacrifier par manque de temps. Elle comporte :

- une synthèse des grandes notions abordées. Celle-ci peut prendre la forme d'un schéma (parfois explicitement demandé dans l'énoncé) ;
- une réponse concise à la problématique (en quoi le développement a-t-il permis d'y répondre ?) ;
- une ouverture sur une autre notion : il ne s'agit pas de proposer un autre sujet ou de caser une notion oubliée, mais de suggérer une suite à cette étude.

La région étudiée correspond à une ceinture orogénique récente typique. En effet, elle a connu l'intégralité des processus qui caractérisent un cycle orogénique, incluant notamment un épisode en divergence (ouverture de l'océan alpin) et un épisode en convergence (suture de cet océan) : on parle ainsi de cycle alpin.

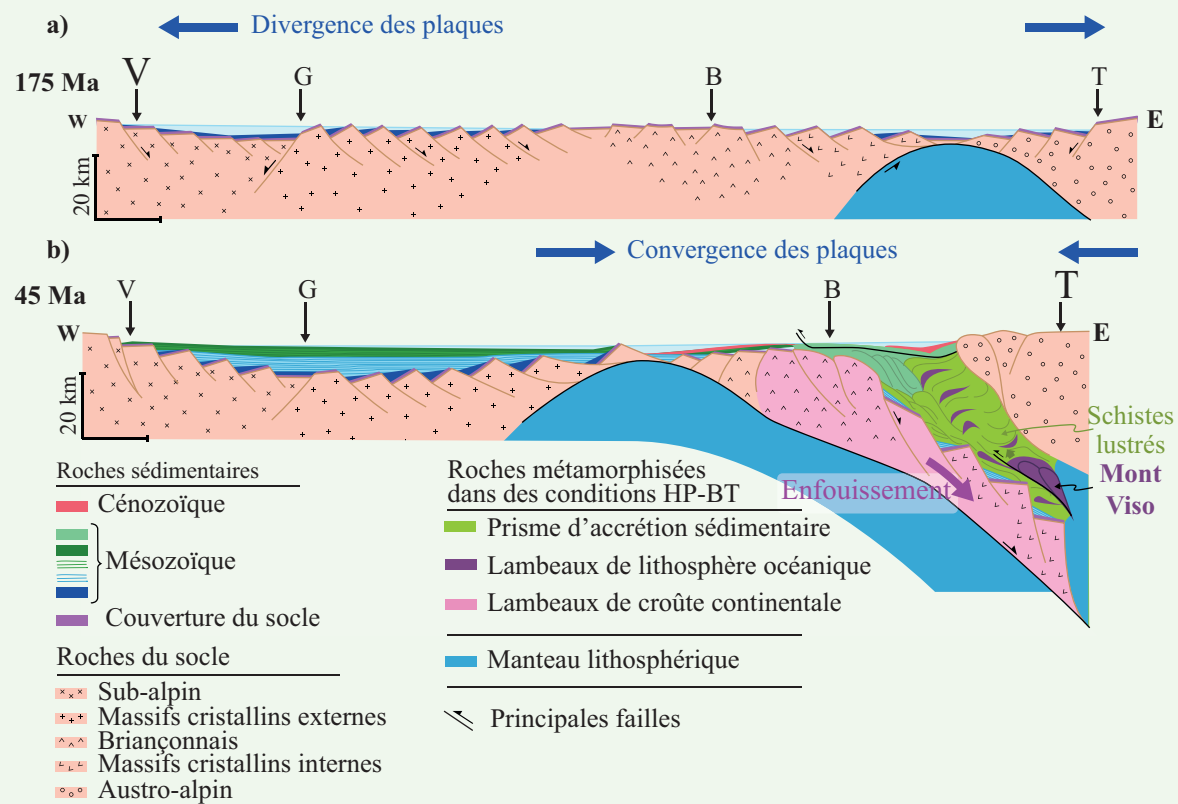
Ces processus se succèdent dans le temps de manière logique : la fracturation continentale entraîne une océanisation ; la lithosphère océanique formée entre inéluctablement en subduction, qui finit par suturer l'océan lors d'une collision à l'origine des reliefs actuels.

POUR ALLER PLUS LOIN

On pourrait s'intéresser à la disparition de ces reliefs par érosion jusqu'à ce que les premiers sédiments se déposent en discordance sur l'ancienne chaîne, et que celle-ci soit elle-même prise dans un nouveau cycle orogénique.

Voir les schémas de coupes géologiques page suivante.

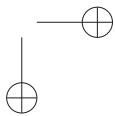
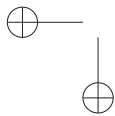
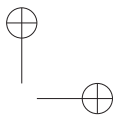
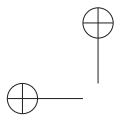
Figure 5.34 – Coupes géologiques reconstituées à travers la même zone : a) lors du rifting continental; b) lors du début de la collision



CORRIGÉS

INTERROS

COURS



L'organisation fonctionnelle des plantes à fleurs

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Les surfaces d'échanges chez les plantes à fleurs
3. Les tissus conducteurs des plantes à fleurs
4. Le développement des plantes à fleurs

1 Introduction



Retrouvez les notions essentielles du cours de ce chapitre en vidéo avec 

Contrairement à la plupart des animaux, les plantes à fleurs, ou *Angiospermes*, ne peuvent pas se déplacer : elles ont *une vie fixée*. Toutefois, pour vivre, les plantes à fleurs doivent réaliser des échanges avec leur environnement, que ce soit avec le sol via les racines, ou avec l'atmosphère via les feuilles.

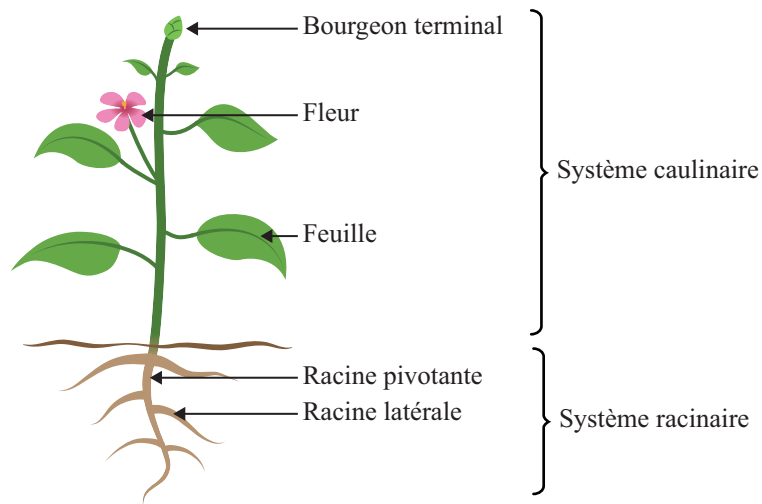


Figure 6.1 – L'organisation générale des plantes à fleurs

Une plante est composée généralement de deux parties :

- un système *caulinaire* (aérien), qui comprend les tiges et les feuilles ;
- un système *racinaire* (souterrain), qui comprend les racines, dont le rôle est de prélever l'eau et les ions dont la plante a besoin. Les racines permettent également d'ancrer la plante dans le sol.

? PROBLÉMATIQUE

En quoi l'organisation des plantes à fleurs leur permet-elle de réaliser des échanges avec leur environnement, et comment est-elle mise en place ?

2 Les surfaces d'échanges chez les plantes à fleurs

2.1 Les surfaces d'échanges aériennes : les feuilles

Les échanges avec l'atmosphère se font majoritairement au niveau des feuilles. Un des rôles des feuilles est de capter de la lumière et d'échanger des gaz avec l'atmosphère. Ceci est nécessaire pour la réalisation de la photosynthèse, qui sera développée dans le chapitre 7.

Les feuilles possèdent bien souvent une grande surface, ce qui permet d'optimiser les échanges avec leur environnement.

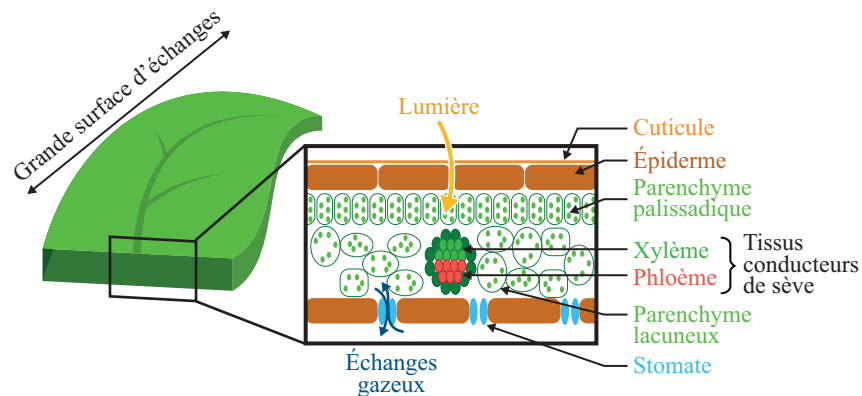


Figure 6.2 – La feuille, une surface d'échange

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

Structure histologique	Description et rôle
Épiderme supérieur	Couche protectrice de la feuille. Elle peut être recouverte d'une cuticule imperméable aux gaz, ce qui protège la plante contre la déshydratation.
Parenchyme chlorophyllien palissadique	Situé sur la face supérieure de la feuille, il contient des cellules chlorophylliennes qui capteront la lumière et réaliseront la photosynthèse.
Parenchyme chlorophyllien lacuneux	Situé sur la face inférieure de la feuille, les lacunes permettent une diffusion efficace des gaz au sein de la feuille. Il est en relation avec l'atmosphère grâce à des milliers de petits orifices, les stomates.
Épiderme inférieur	Couche protectrice de la feuille. Des stomates y sont souvent localisés, permettant les échanges gazeux entre la feuille et l'atmosphère.

Tableau 6.1 – Caractéristiques des éléments de la feuille

Un stomate est constitué de deux cellules stomatiques, bordant un orifice : l'ostiole.

Définition 1 : ostiole

Orifice bordé par deux cellules stomatiques qui mettent en relation l'intérieur de la feuille et l'atmosphère, permettant les échanges gazeux entre la feuille et son environnement.

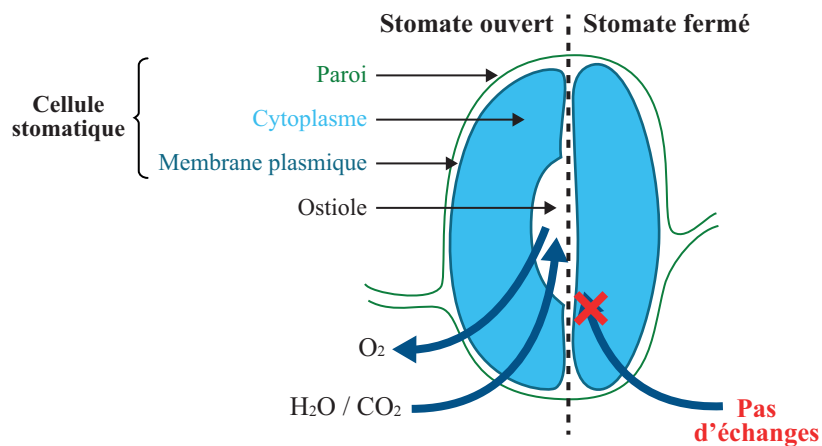


Figure 6.3 – Le stomate, structure régulant les échanges gazeux avec l'atmosphère

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Les stomates permettent à la plante de s'adapter aux conditions environnementales. Ils s'ouvrent principalement à la lumière pour réaliser les échanges gazeux nécessaires à la photosynthèse. Cette ouverture est régulée par les cellules stomatiques : le cytoplasme de ces dernières se gorge d'eau, la pression engendrée fait ouvrir les stomates. À l'inverse, les stomates sont capables de se refermer lorsque l'ensoleillement est maximal (forte chaleur en milieu de journée par exemple), ce qui limite la déshydratation de la plante par transpiration stomatique.

Voir exercice 3.

Certaines plantes sont capables de subsister avec de faibles quantités d'humidité (plantes xérophi les). Au niveau des feuilles, on observe la présence de nombreux poils épidermiques et d'une épaisse cuticule. Elles peuvent être dures, vernissées, fines avec des épines ou enroulées sur elles-mêmes comme l'Oyat afin de limiter les pertes d'eau dues à la transpiration.

Très souvent, les stomates sont protégés au fond de structures, appelées cryptes pilifères comme le laurier rose.

2.2 Les surfaces d'échanges souterraines : l'appareil racinaire

2 PROBLÉMATIQUE

Comment ont lieu les échanges au niveau des racines ?

2.2.1 - L'appareil racinaire permet de réaliser des échanges avec le sol

Les plantes à fleurs sont ancrées dans le sol grâce à un appareil racinaire. Ce dernier permet de puiser l'eau et les sels minéraux, nécessaires au bon fonctionnement de la plante, grâce aux nombreuses ramifications des racines. Celles-ci sont généralement constituées d'une racine principale, et d'un réseau de racines secondaires et de radicelles. Les échanges se réalisent au niveau de *zones pilifères*, où se trouvent des *poils absorbants*.

Définition 2 : poil absorbant

Cellule située au niveau de zones pilifères des racines des plantes. Les poils absorbants présentent un long prolongement cytoplasmique (d'où le nom de poil) et une paroi de faible épaisseur, favorisant ainsi les échanges d'eau et d'ions minéraux avec le sol.

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

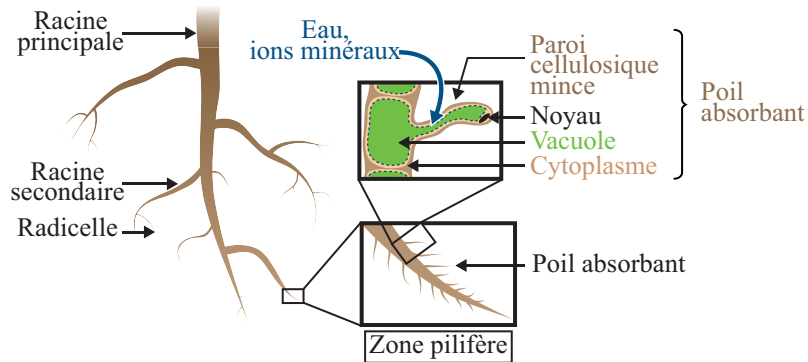


Figure 6.4 – L'appareil racinaire et les échanges avec le sol au niveau des poils absorbants

Des millions de poils absorbants sont présents par racine et constituent une énorme surface d'échanges entre la plante et le sol. À l'échelle d'une plante, les racines présentent donc une interface d'échanges avec le sol qui peut atteindre la dizaine voire la centaine de m^2 .

Cependant, certaines espèces de plantes à fleurs ne sont pas capables de réaliser seules la totalité des échanges avec le sol dont elles ont besoin pour leur fonctionnement. Des associations interspécifiques permettent de palier ce manque.

Voir exercice 6.

2.2.2 - Une association interspécifique : les mycorhizes

PROBLÉMATIQUE

Comment les plantes peuvent-elles s'associer avec d'autres espèces, favorisant les échanges avec le sol ?

Les racines des plantes à fleurs peuvent s'associer avec des champignons, c'est ce qu'on appelle *les mycorhizes*.

Définition 3 : mycorhize

Association symbiotique entre les racines d'une plante et un (des) champignon(s), permettant à la plante d'augmenter considérablement ses apports en eau et en éléments nutritifs. Le champignon reçoit quant à lui de la matière organique de la plante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

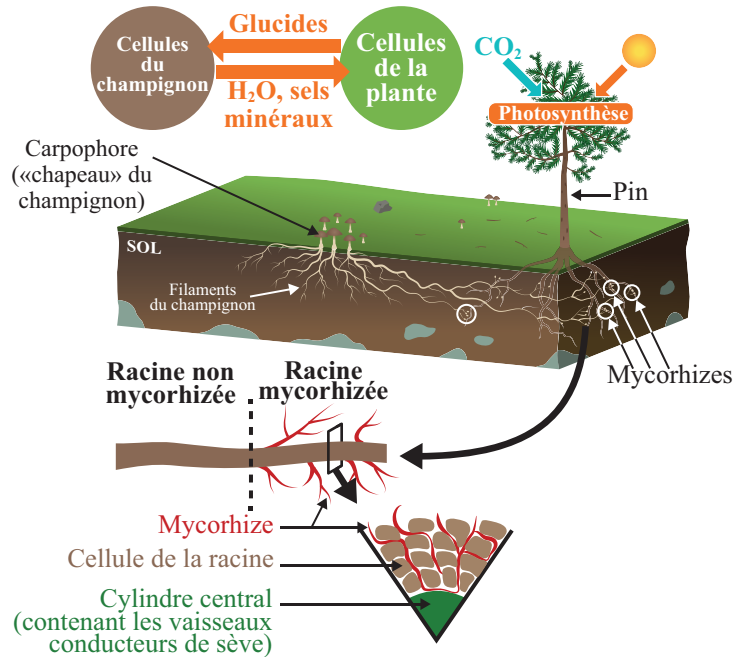


Figure 6.5 – Racine non mycorhizée, racine mycorhizée et échanges associés

Les mycorhizes forment donc de véritables réseaux et s'insèrent jusqu'entre les cellules de la racine. On considère que plus de 80% des végétaux présentent des mycorhizes.

Les mycorhizes sont donc une association entre organismes d'espèces différentes contribuant à une diversification du vivant sans modification génétique, comme vu dans le chapitre 3.

Voir exercice 11.

Dans certaines conditions, comme des conditions de sécheresse, les plantes sont capables d'adapter leur système racinaire. Par exemple, on peut observer un développement en profondeur (pour atteindre parfois les nappes phréatiques) ou en surface (pour optimiser l'absorption de l'eau et des sels minéraux).

À RETENIR

Les plantes à fleurs mettent en relation deux environnements : l'atmosphère et le sol. Elles présentent des adaptations avec des surfaces d'échanges étendues et peuvent même s'associer à d'autres espèces, comme au niveau des mycorhizes.

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

3 Les tissus conducteurs des plantes à fleurs

PROBLÉMATIQUE

Comment les deux interfaces d'échanges que constituent les feuilles et les racines sont-elles mises en relation au sein des plantes à fleurs ?

La vie fixée à l'interface de deux milieux nécessite des circulations de matière (la sève) entre organes aériens et souterrains. Ces transports sont assurés par deux types de tissus conducteurs :

- le *xylème*, qui transporte la *sève brute* issue des organes souterrains ;
- le *phloème*, transporte la *sève élaborée* des feuilles vers les autres organes.

Définition 4 : sève brute

Sève contenue dans le xylème, composée d'eau et d'ions puisés dans le sol, et circulant des racines vers les tiges et les feuilles. Un rôle du xylème est donc d'y transporter l'eau et les ions nécessaires à la photosynthèse.

Définition 5 : sève élaborée

Sève contenue dans le phloème, qui transporte notamment les produits de la photosynthèse des feuilles vers les autres organes de la plante dont les racines, et les organes de stockage (tubercules, etc.).

Le phloème et le xylème sont constitués de deux types de cellules différentes. Le phloème est composé de tubes de cellules vivantes présentant une large paroi, alors que le xylème est formé de cellules mortes dont la paroi est renforcée par un composant hydrophobe : la lignine.

Voir illustration page suivante.

À RETENIR

Les plantes à fleurs présentent deux circulations. La sève brute, composée d'eau et d'ions puisés dans le sol par les racines est conduite par le xylème vers les feuilles. La sève élaborée, contenue dans le phloème, constituée d'eau et des produits de la photosynthèse, est transportée des feuilles vers les racines.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

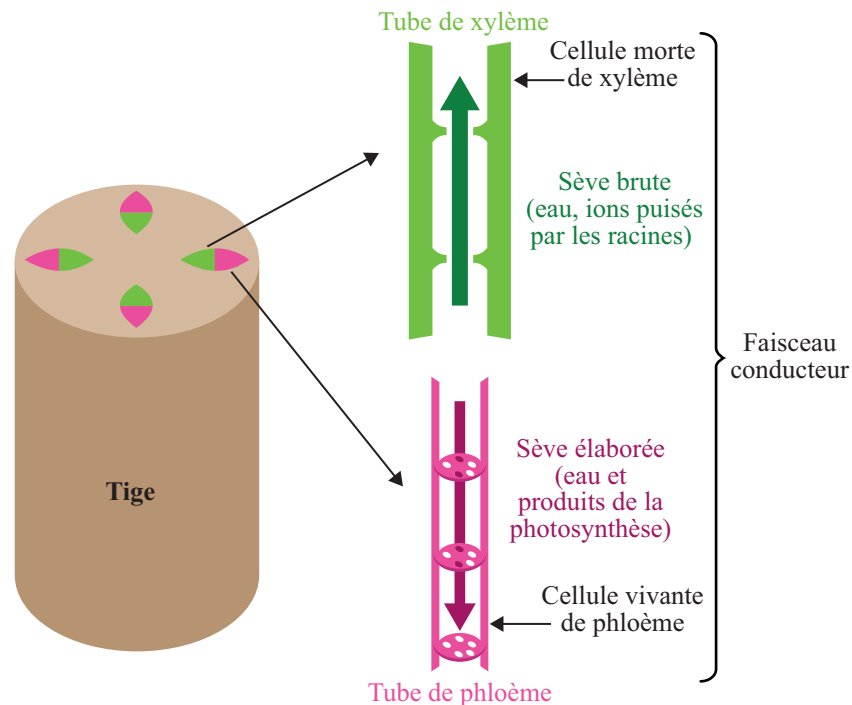


Figure 6.6 – Conduction des sèves chez les plantes à fleurs

4 Le développement des plantes à fleurs

Les plantes à fleurs présentent une variété d'organes, permettant notamment des échanges avec leur environnement (le sol et l'atmosphère), et la conduction des sèves au sein des différents organes.

? PROBLÉMATIQUE

Comment les organes de la plantes sont-ils mis en place ?

Le développement des plantes à fleur fait intervenir deux mécanismes : une croissance par multiplication cellulaire et élongation, suivie d'une différenciation d'organes.

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

4.1 La croissance chez les plantes à fleurs

4.1.1 - La multiplication cellulaire a lieu au sein des méristèmes

Chez les plantes à fleurs, la multiplication cellulaire a lieu en des sites particuliers : *les méristèmes*.

Définition 6 : méristème

Tissu formé de cellules méristématiques qui se divisent par mitoses rapides. Les méristèmes participent au développement des plantes à fleurs.

Les méristèmes sont dits apicaux s'ils sont situés aux extrémités de la plante. Ils peuvent alors être caulinaires (pour l'extrémité de la tige) ou racinaires (pour l'extrémité de la racine). Des méristèmes axillaires existent également à l'aisselle des feuilles, comme c'est le cas pour les bourgeons.

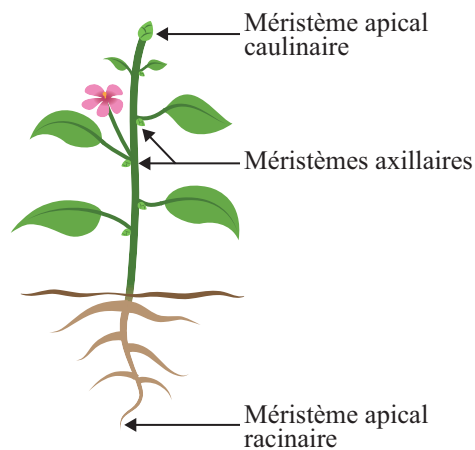


Figure 6.7 – Localisation des différents méristèmes chez les plantes à fleurs

Les mitoses seront à l'origine d'un grand nombre de cellules. Certaines se différencieront dans un second temps et pourront être à l'origine des différents organes de la plante, alors que d'autres poursuivront les divisions cellulaires (expliquant ainsi pourquoi les plantes pouvant vivre plusieurs années ont une croissance continue et potentiellement infinie).

4.1.2 - L'élongation cellulaire

Lorsque les cellules sont formées et différenciées, elles subissent *une élongation cellulaire*, c'est-à-dire que leur taille augmente. Au niveau des racines, les zones de division cellulaire et d'élongation sont régionalisées : la zone d'élongation est localisée en aval du méristème apical racinaire.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

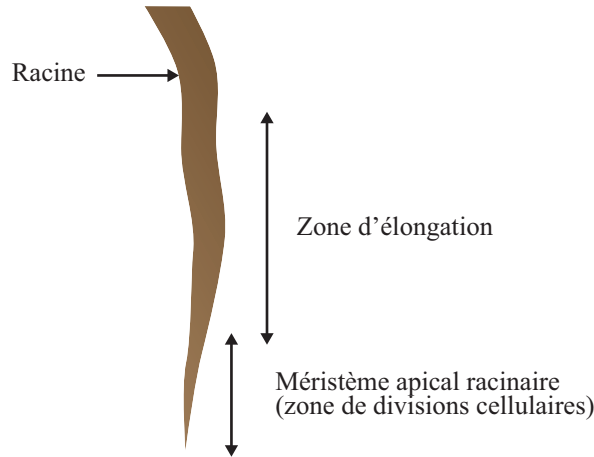


Figure 6.8 – Zones de division cellulaire et d'élongation chez la racine des plantes à fleurs

Qu'elle ait lieu dans la tige ou dans la racine, l'élongation cellulaire est un mécanisme contrôlé par la plante par le biais d'hormones végétales, comme *l'auxine*. En fonction de stimuli comme la lumière ou la gravité, cette dernière agit sur certaines cellules des racines et/ou de la tige. Elle permet ainsi une croissance orientée de la plante. Ceci explique que les racines et les tiges poussent respectivement vers le bas et vers les sources lumineuses. L'auxine stimule également l'activité du bourgeon apical caulinaire au détriment des bourgeons axillaires. C'est ce qu'on appelle *la dominance apicale*.

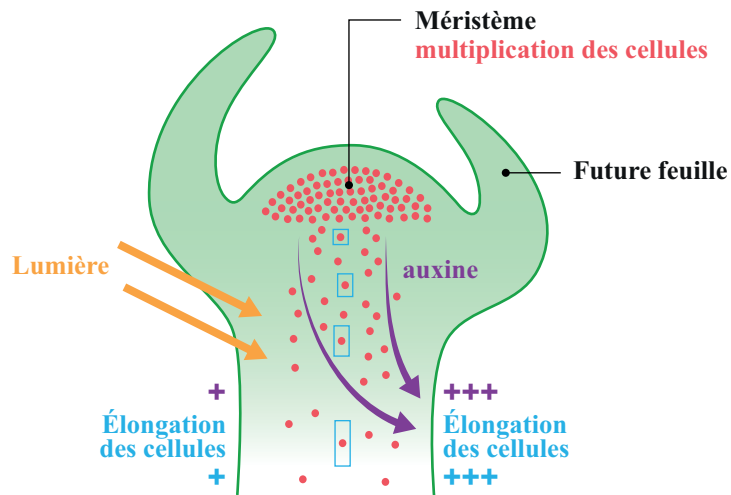


Figure 6.9 – Le méristème caulinaire, zone de croissance

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

D'autres hormones influent sur le développement des plantes, comme les gibbérellines, l'éthylène ou encore les cytokinines. Ces dernières limitent notamment la dominance apicale. Ainsi, en fonction des quantités relatives d'hormones végétales synthétisées par une plante, les bourgeons axillaires seront plus ou moins actifs. Ceci aura une influence sur le port des plantes, c'est-à-dire sur leur aspect général.

Voir exercices 4, 5, 7, 8, 9 et 10.

4.2 La différenciation des organes : l'organogenèse

Les cellules formées par divisions cellulaires peuvent se différencier et acquérir une fonction spécifique. Ces différentes cellules se regroupent et s'associent en tissus. Les différents tissus pourront alors former les différents organes de la plante (feuille, tige, fleur, racines etc.) : c'est l'organogenèse.

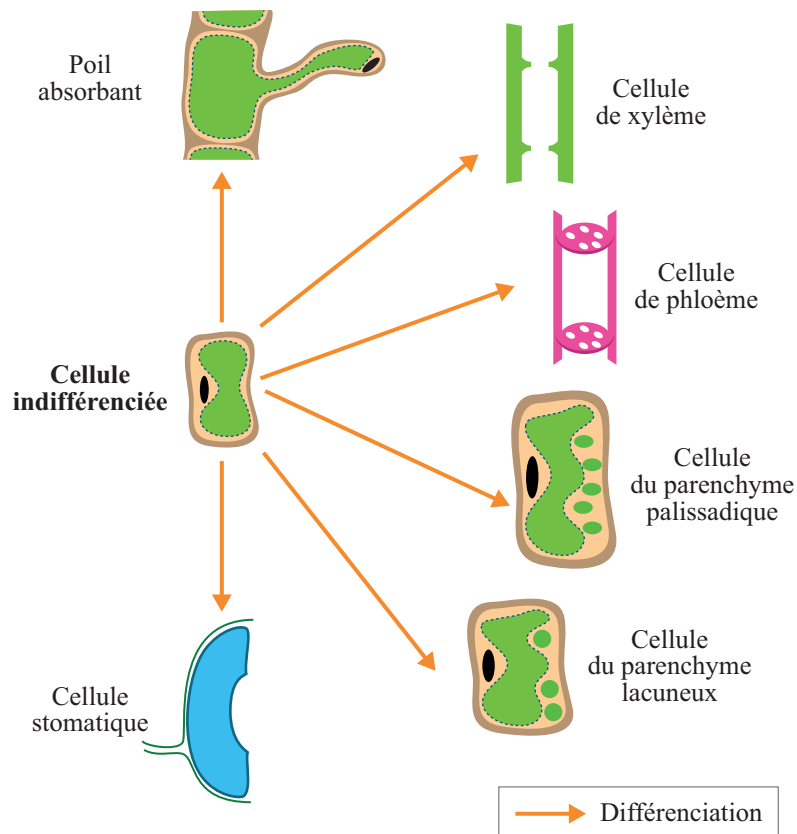


Figure 6.10 – La différenciation des cellules végétales

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

4.3 L'organisation de la tige en phytomères

Le développement des plantes, de par sa nature séquentielle, entraîne l'apparition d'éléments répétés qui sont appelés *les phytomères*.

Définition 7 : phytomère

Unité d'organisation répétée de la tige d'une plante constituée d'un noeud souvent accompagné d'un bourgeon et d'une feuille, et d'un entre-noeud.

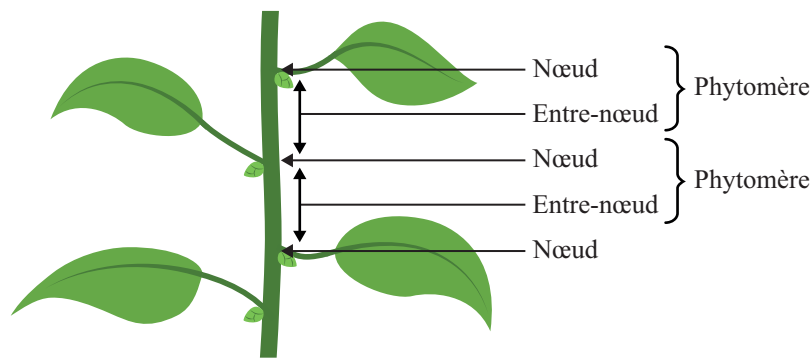


Figure 6.11 – L'organisation en phytomères de la tige

Cette organisation s'explique par le mode de croissance des végétaux, avec des divisions cellulaires suivies d'une elongation et de l'organogenèse.

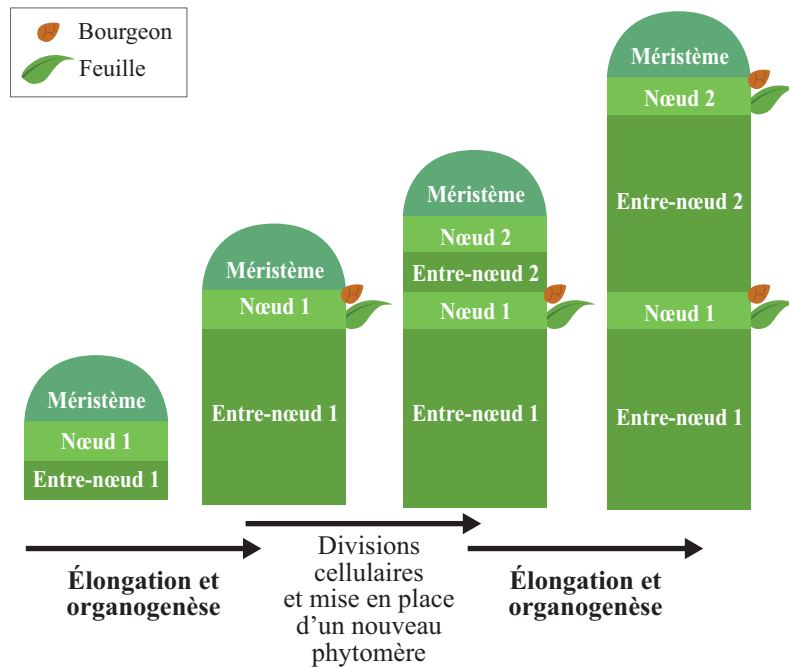


Figure 6.12 – Formation des phytomères chez les plantes à fleurs

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

1 QCM Vérification de connaissances

5 min

Corrigé
p. 208

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1 Le phloème :
 - a conduit la sève élaborée des feuilles jusqu'aux racines ;
 - b conduit la sève élaborée des racines jusqu'aux feuilles ;
 - c conduit la sève brute des feuilles jusqu'aux racines ;
 - d conduit la sève brute des racines jusqu'aux feuilles.
- 2 Le stomate correspond à :
 - a une hormone jouant un rôle dans l'élongation cellulaire ;
 - b un type cellulaire situé au niveau des racines permettant les échanges avec le sol ;
 - c un type de cellules situé dans les vaisseaux conducteurs de la plante ;
 - d un composé de la cuticule des feuilles de la plante ;
 - e un ensemble formé de deux cellules stomatiques bordant un orifice : l'ostiole.

2 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 208

Qui suis-je ?

- 1 Zone de divisions cellulaires, participant à la croissance de la plante.
- 2 Tissu conducteur de la sève brute.
- 3 Cellule de la plante localisée au niveau de la racine, permettant les échanges avec le sol

3 Feuille - Adaptations

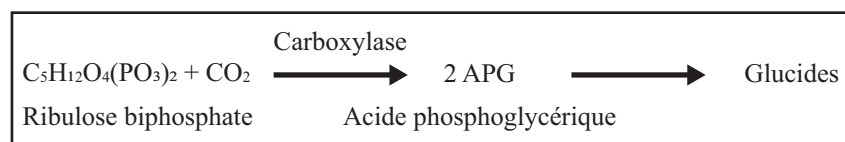


10 min

Corrigé
p. 208

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

La carboxylase est une enzyme qui assure l'incorporation du CO_2 dans des molécules intermédiaires pour la synthèse de glucides lors de la photosynthèse, selon l'équation :



La carboxylase peut être localisée par immunofluorescence : les organites contenant cette enzyme apparaissent en bleu.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

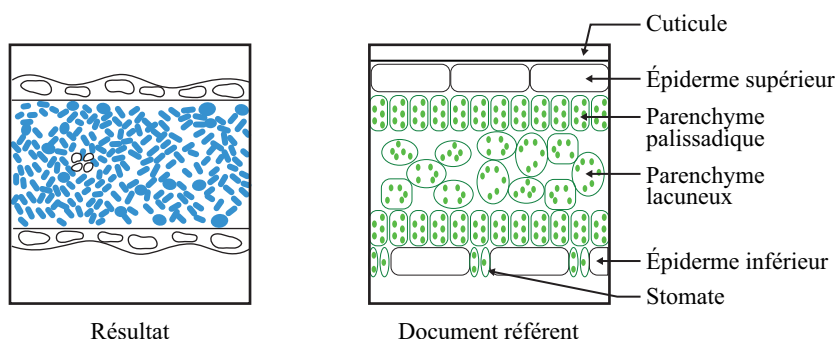


Figure 6.13 – Résultat : coupe transversale de feuille de betterave ($\times 130$) traitée par immunofluorescence (à gauche), et schéma référent d'une coupe transversale de feuille ($\times 130$) (à droite)

- 1 Déterminez le(s) tissu(s) impliqué(s) dans la photosynthèse.
- 2 Identifiez les adaptations de la feuille aux échanges gazeux et à la capture de lumière chez la plante fixée.

4 Croissance - Hormones végétales



10 min

Corrigé
p. 208

Nouveau programme

L'auxine est produite au niveau de l'apex des plantes et elle agit à distance en induisant une elongation cellulaire.

On s'intéresse ici aux modalités du transport de l'auxine.

Une portion de tige est coupée et orientée, A représentant le côté apical, et B, le côté basal.

Les deux extrémités de cette portion sont ensuite mises en contact avec des blocs de gélose contenant ou non de l'auxine.

Après deux heures, les quantités d'auxine sont analysées dans chaque bloc de gélose.

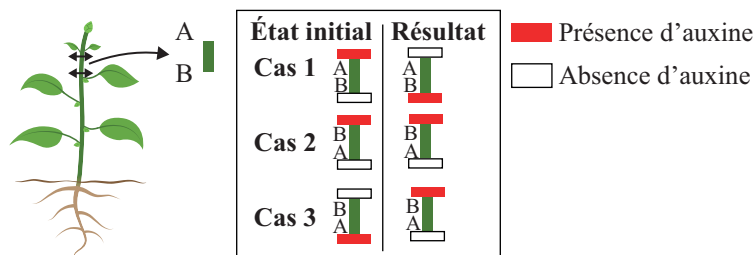


Figure 6.14 – Expériences réalisées et résultats obtenus

À partir de cette expérience, vous indiquerez quelles sont les modalités du transport de l'auxine dans la tige des plantes.

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

5 Croissance - Hormones végétales



20 min

Corrigé
p. 209

Nouveau programme

L'étude des plantes à fleurs a révélé qu'elles étaient capables d'orienter leur croissance notamment en fonction de la gravité : les plantes poussent pour la plupart vers le haut. On sait que ce mécanisme fait intervenir l'auxine en temps qu'hormone végétale.

Document 1

Même après avoir été soumis à des vents violents, ou à un léger piétinement, elles se redressent. Pour s'exécuter, la plante perçoit son positionnement grâce à un type de cellules particulières : les statocytes. Elles sont présentes tout le long de la tige et sont remplies de petits organites qui se déposent à différents endroits de la cellule suivant son inclinaison, comme un niveau à bulle interne à la plante. (...)

La plante possède encore d'autres mécanismes pour évaluer sa posture avec plus de précision. À l'intérieur des cellules végétales des tissus lignifiés se trouvent des protéines d'actine et de myosine (...). Elles forment des câbles qui vont se tendre si la cellule est pliée. Grâce à ces deux mécanismes, la plante discerne son inclinaison et sa courbure. Elle peut ensuite déclencher son processus de redressement. Pour y parvenir, elle ne croît plus de la même manière partout, et les cellules vont s'allonger d'avantage d'un côté que de l'autre. (...)

Source : Sciences et Avenir, 02/2018

Document 2

On souhaite comprendre le rôle de l'auxine dans l'orientation de la croissance des plantes à fleurs, et notamment de leurs racines. Une expérience a été réalisée à partir d'un petit pois germé au cours de laquelle un bloc de gélose contenant de l'auxine a été accolé à la racine pendant 48 heures. Le résultat est présenté ci-dessous.

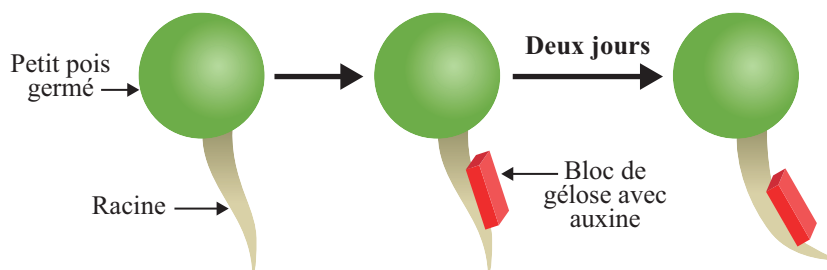


Figure 6.15 – Expérience réalisée

À partir des différents documents proposés, complétez le schéma page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

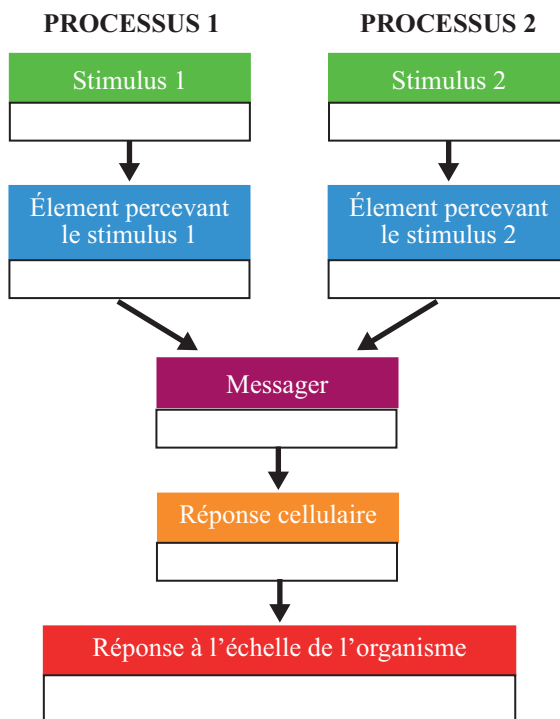


Figure 6.16 – Schéma à compléter

6 Surfaces d'échanges



10 min

Corrigé
p. 210

Lycée Richelieu, RUEIL-MALMAISON

« Chez la plante, les surfaces impliquées dans les échanges sont importantes en regard de la masse, à l'instar des surfaces d'échanges mobilisées par des organismes animaux. »

Justifiez cette affirmation à l'aide des données du document ci-après. Des calculs sont attendus.

Document

- Au niveau des poumons, les échanges gazeux se produisent dans les alvéoles, petits sacs terminant les voies respiratoires. Dans le cas des poumons humains, la surface totale destinée aux échanges est d'environ 130 m², soit la taille d'un terrain de volley. On calcule le poids de 1 kg pour les deux poumons, qui représentent un volume maximal de 4,5 litres.
- Des mesures ont été faites sur le système racinaire d'un plant d'Arabette âgé de 15 jours :
 - surface du système racinaire : 0,81 cm²
 - masse du système racinaire : 1,56 mg.

200

7 À vous les chercheurs !



10 min

Corrigé
p. 210

Nouveau programme

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

Le développement des plantes est un processus régulé par des hormones végétales. Par exemple, la croissance des racines est orientée vers le bas, et celle des tiges, vers une source de lumière.

On souhaite ici étudier l'effet du vent sur la croissance de jeunes pieds de pins nains venant de germer. Vous disposez de plants de pins, et de ventilateurs pouvant souffler à deux intensités (faible et forte).

Écrivez un protocole vous permettant d'analyser l'effet de deux semaines de vent unidirectionnel (dans une seule direction) sur l'orientation de la croissance des jeunes pins nains.

8 Croissance - Hormones végétales



20 min

Corrigé
p. 211

Nouveau programme

La croissance des tiges est un phénomène régulé par la plante, notamment en fonction de son environnement.

En 1880, Charles Darwin et son fils, Francis Darwin, ont réalisé des expériences visant à comprendre les mécanismes liés à cette régulation. Pour ce faire, ils ont mis des pousses d'herbe en présence d'une source lumineuse et ont observé leur croissance dans différentes configurations présentées ci-dessous.

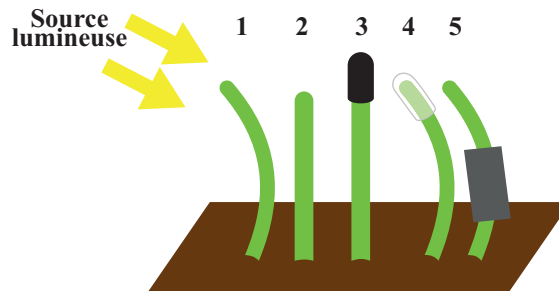


Figure 6.17 – Expérience et résultats de Charles et Francis Darwin

- L'expérience 2 correspond à une pousse dont l'extrémité apicale a été sectionnée.
- L'expérience 3 correspond à une pousse dont l'extrémité apicale se trouve sous un capuchon opaque.
- L'expérience 4 correspond à une pousse dont l'extrémité apicale se trouve sous un capuchon transparent.
- L'expérience 5 correspond à une pousse dont la base de la tige est recouverte d'un écran opaque.

Pour chaque question, trouvez la proposition exacte.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 1** Le premier cas, pour lequel une pousse est mise en présence d'une source lumineuse, montre que :
 - a** la croissance des pousses est insensible à la source lumineuse ;
 - b** une flexion de la tige a lieu, prouvant que la pousse est capable de percevoir la lumière, et d'orienter sa croissance en fonction ;
 - c** les plantes sont sensibles à la gravité, leur permettant de pousser vers le haut ;
 - d** les pousses d'herbe préfèrent l'ombre à la lumière.
- 2** La seconde expérience montre que :
 - a** la croissance n'est plus orientée, prouvant que l'extrémité apicale est nécessaire pour l'orientation de la croissance ;
 - b** la croissance n'est plus orientée, prouvant que l'extrémité apicale est nécessaire pour la perception de la lumière ;
 - c** la croissance n'est plus orientée, prouvant que l'extrémité apicale n'est pas nécessaire pour l'orientation de la croissance ;
 - d** la croissance n'est plus orientée, prouvant que l'extrémité apicale n'est pas nécessaire pour la perception de la lumière.
- 3** La troisième expérience montre que :
 - a** le poids d'un capuchon empêche à la flexion d'avoir lieu ;
 - b** l'extrémité apicale joue un rôle dans la perception de la lumière, d'où l'absence de flexion si un capuchon oblique est ajouté ;
 - c** la présence du capuchon opaque empêche à la flexion d'avoir lieu, que ce soit en empêchant l'extrémité apicale de percevoir la lumière, ou à cause du poids qu'il exerce sur l'extrémité apicale ;
 - d** le capuchon opaque n'a aucun effet puisque la pousse croît normalement.
- 4** La quatrième expérience montre que :
 - a** un capuchon, qu'il soit transparent ou opaque, empêche à la croissance d'être orientée ;
 - b** l'extrémité apicale de la plante est l'unique région capable de percevoir la source de lumière, permettant à la flexion d'avoir lieu ;
 - c** l'extrémité apicale de la plante est une région capable de percevoir la source de lumière, permettant à la flexion d'avoir lieu ;
 - d** la pousse d'herbe se courbe à cause du poids exercé par le capuchon.

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

5 La dernière expérience montre que :

- a** l'ensemble de la tige est capable de percevoir la lumière, permettant une orientation dans la croissance de la plante ;
- b** la base de la tige ne peut percevoir la lumière, suggérant que c'est spécifiquement l'apex de la tige qui joue ce rôle ;
- c** les racines peuvent percevoir la lumière et engendrer une croissance orientée de la tige ;
- d** seule la base de la tige peut percevoir la lumière.

9 A vous les chercheurs !



25 min

→ Corrigé
p. 211

Nouveau programme

Chez les plantes à fleurs, les zones d'élongation sont localisées en des sites particuliers.

Écrivez un protocole vous permettant de déterminer où est (sont) localisée(s) la (les) zone(s) d'élongation sur une racine d'un plant de haricot (aux 5 mm près). Pour ce faire, vous disposez d'un pied de haricot, et d'un marqueur à encre indélébile. Le haricot peut continuer à pousser 48 heures dans du coton humide.

Vous présenterez les résultats attendus.

10 Croissance - Hormones végétales



25 min

→ Corrigé
p. 212

Nouveau programme

L'épinard est une plante qui peut présenter deux ports différents :

- un premier en rosette, correspondant à une tige de taille réduite et des feuilles à même le sol ;
- une seconde, avec une tige plus longue.

À l'aide des documents suivants et de vos connaissances, proposez un schéma du contrôle du port de l'épinard.

Document 1

Des épinards sont cultivés en jours courts (éclairage de 12 heures par jour) ou en jours longs (éclairage de 14 heures par jour).

Des épinards en jours courts sont également traités avec une hormone végétale, la gibbérelline.

Voir illustration page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

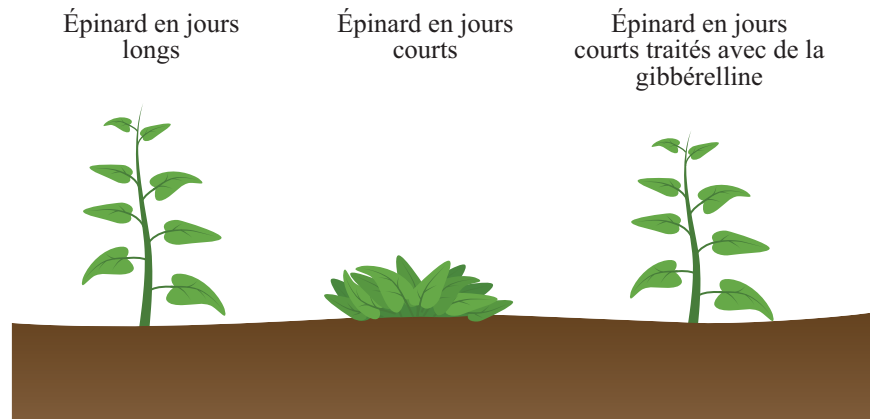


Figure 6.18 – Port d'épinards soumis à des jours longs ou à des jours courts, traités ou non avec de la gibbérelline après deux semaines d'expérience

Document 2

La synthèse de la gibbérelline active, appelée GA1, nécessite plusieurs réactions chimiques avec formation d'intermédiaires, tels qu'une molécule appelée GA20.

Les quantités de GA1 et de GA20 sont suivies au cours du temps chez un épinard soumis à des jours longs.

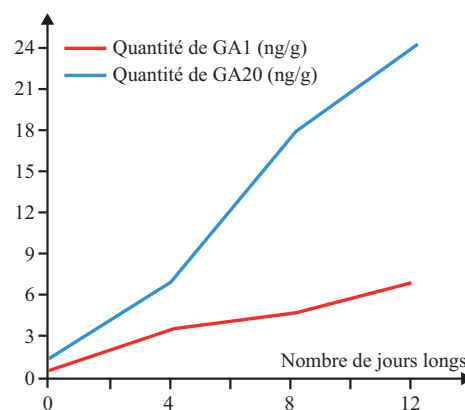


Figure 6.19 – Suivi des quantités de GA1 et de GA20 chez un épinard soumis à des jours longs

On notera que chez une plante soumise à des jours courts, la quantité de ces molécules varie peu.

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

Document 3

On souhaite comprendre le rôle d'une molécule exprimée par l'épinard, BX112, sur le contrôle de la croissance des épinards. Des épinards soumis à des jours longs sont traités ou non avec du BX112 et les quantités de GA1 et de GA20 après 12 jours d'expérience sont indiquées ci-contre.

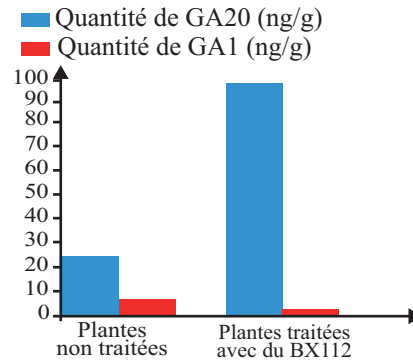


Figure 6.20 – Quantités de GA1 et de GA20 chez des épinards soumis à des jours longs traités ou non avec du BX112

Document 4

Des épinards sont mis en culture en jours longs et traités ou non avec du BX112, du GA20 et / ou du GA1. Le port des épinards est ensuite observé.

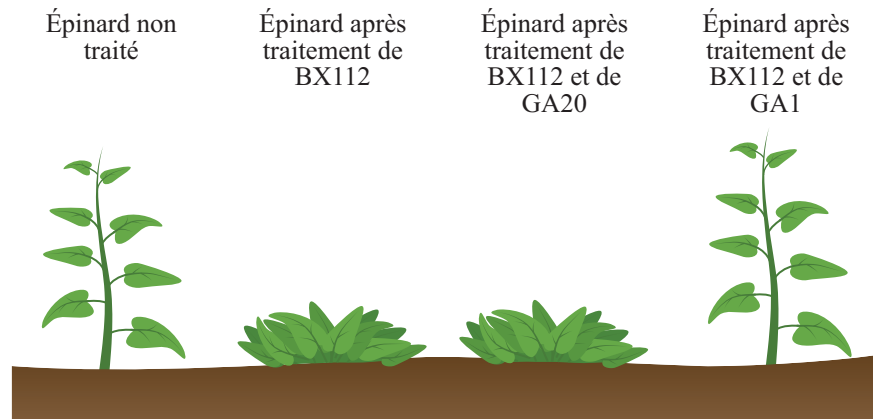


Figure 6.21 – Ports d'épinards soumis à des jours longs traités ou non avec du BX112, du GA20 et / ou du GA1

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

11 Mycorhizes



30 min

Corrigé
p. 215

Nouveau programme

Les mycorhizes correspondent à une association entre une plante à fleurs, et un champignon.

On s'intéresse ici à déterminer les avantages d'une telle association pour un arbre.

Document 1

La zone d'exploration du sol est représentée pour deux arbres : un avec, et un sans mycorhizes.

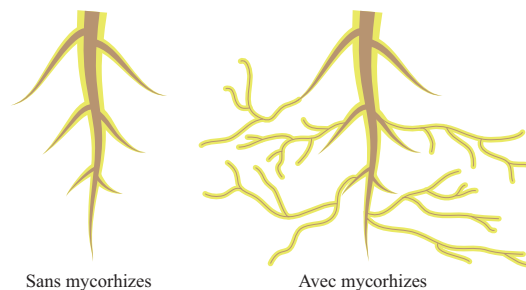


Figure 6.22 – Zone d'exploration (représentée en jaune) d'une racine avec ou sans mycorhizes (le champignon est représenté en noir et la racine, en marron)

Document 2

Deux arbres (un avec mycorhizes et l'autre sans) sont étudiés, leur biomasse foliaire (masse des feuilles) ainsi que leurs taux d'azote et de phosphate sont quantifiés.

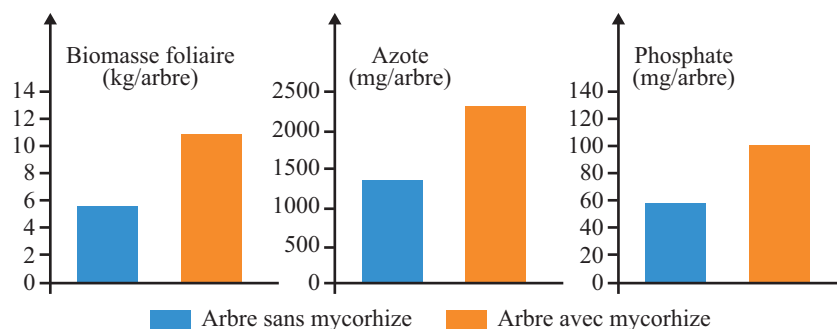


Figure 6.23 – Biomasse foliaire, taux d'azote et de phosphate d'un arbre avec mycorhizes et d'un arbre sans

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

Document 3

Enfin, ces deux arbres sont suivis pendant une année et chaque mois, leur taux d'accroissement (augmentation de taille depuis le mois précédent) est calculé.

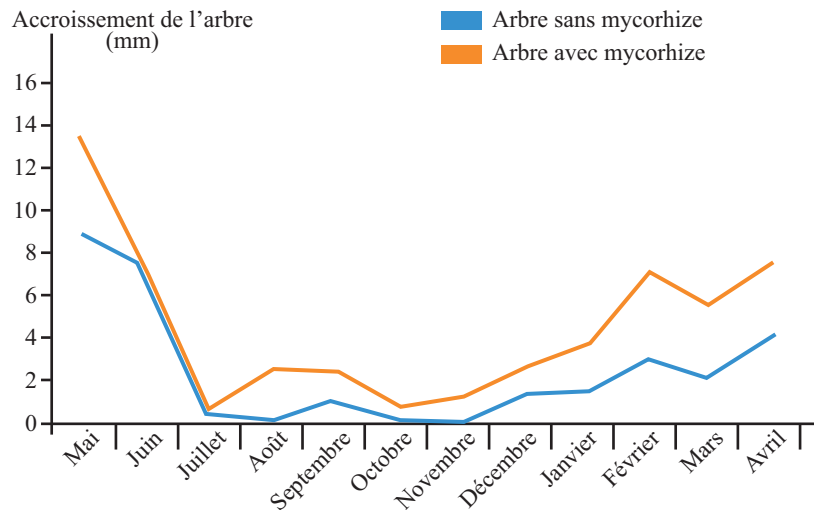


Figure 6.24 – Suivi de l'accroissement d'un arbre avec mycorhizes et d'un arbre sans, pendant un an

Grâce à l'étude de ces documents, discutez du caractère avantageux que représente cette association pour l'arbre.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Vérification de connaissances

→ Énoncé
p. 197

- 1 Réponse **a**. 2 Réponse **e**.

2 Vérification des connaissances

→ Énoncé
p. 197

- 1 Un méristème. 2 Le xylème. 3 Poil absorbant.

3 Feuille - Adaptations

→ Énoncé
p. 197

Lycée Richelieu, RUEIL-MALMAISON

⚠ ATTENTION

Ici, la couleur bleue signale la présence de carboxylase. On suggèrera que la couleur bleue est associée à un tissu impliqué dans la photosynthèse, même si, en pratique, il faudrait le vérifier (la présence d'enzyme ne signifie pas forcément qu'elle est active).

- 1 On souhaite déterminer les tissus impliqués dans la photosynthèse. Le marquage de la carboxylase révèle un marquage bleu au niveau des parenchymes palissadique et lacuneux. C'est donc au sein de ces tissus que la photosynthèse se réalise.
- 2 Deux adaptations principales sont présentes au niveau des feuilles, leur permettant de réaliser la photosynthèse de manière optimale. Tout d'abord, la présence de stomates permet à la feuille de réaliser des échanges gazeux avec l'atmosphère. De plus, les cellules du parenchyme (notamment palissadique) sont alignées, formant une large surface d'échange, favorisant donc la capture de la lumière.

4 Croissance - Hormones végétales

→ Énoncé
p. 198

Nouveau programme

On cherche à comprendre comment est transportée l'auxine dans la tige depuis l'apex d'une plante.

On observe dans le premier cas que le fait de placer un bloc de gélose contenant de l'auxine du côté apical permet un transport de cette hormone : à la fin de l'expérience elle a disparu du premier bloc et est entrée dans la gélose du côté basal. On peut ainsi émettre deux hypothèses concernant le transport de l'auxine :

- l'auxine est transportée de haut en bas à cause de la gravité ;
- elle subit un transport depuis le côté apical vers le côté basal sans influence de la gravité.

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

Dans le deuxième cas, la tige est retournée : l'extrémité apicale est mise en bas, et l'extrémité basale, en haut, en contact avec le bloc de gélose contenant l'auxine. En fin d'expérience, on observe que l'auxine n'a pas été transportée : elle est restée dans le bloc du haut en contact avec l'extrémité basale. Ceci suggère donc que c'est la polarité apicale/basale de la tige, et non pas la gravité, qui conditionne le transport de l'auxine.

Dans le dernier cas, la tige est toujours retournée, mais cette fois, c'est le bloc de gélose du bas en contact avec l'extrémité apicale qui contient l'auxine. On observe alors un transport de l'auxine vers le haut et le côté basal. Ceci confirme donc les résultats obtenus dans la deuxième expérience.

Ainsi, le transport de l'actine est orienté : elle se réalise depuis l'extrémité apicale des plantes vers l'extrémité basale.

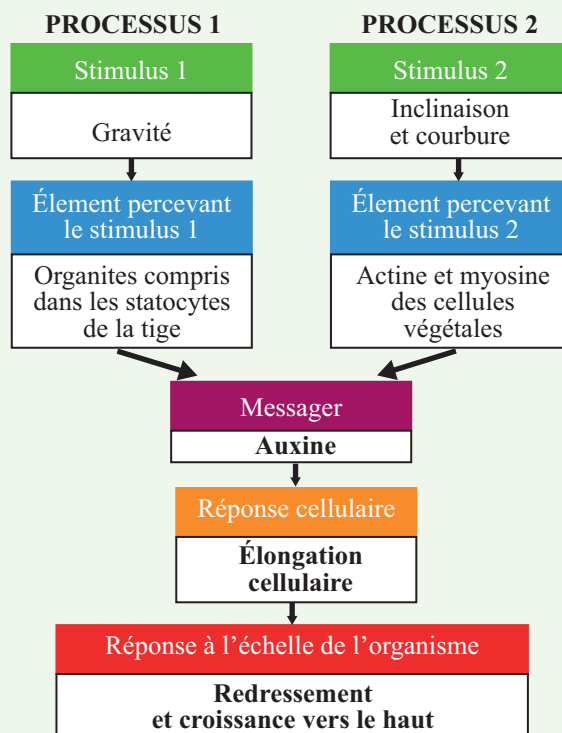
5 Croissance - Hormones végétales

Énoncé
p. 199

Nouveau programme

Grâce au document 1, il est possible de remplir la majorité des cases, sauf le messenger, qui nous est donné dans le document 2.

En effet, on observe que l'auxine contenue dans la gélose accolée à la racine a orienté cette dernière en direction du bloc de gélose. L'auxine est donc capable d'orienter la croissance des racines des plantes à fleurs. On peut donc émettre l'hypothèse que c'est le messenger ici.



COURS

INTERROS

CORRIGÉS

6 Surfaces d'échanges

Énoncé
p. 200

Lycée Richelieu, RUEIL-MALMAISON

On souhaite comparer l'importance des surfaces d'échanges chez les animaux et chez les végétaux. Les surfaces d'échanges choisies sont l'appareil racinaire de l'Arabette des dames et les poumons humains.

MÉTHODE

Pour ce faire, on ne doit pas comparer les données brutes des surfaces : un être humain adulte n'est pas comparable à une Arabette des dames de 15 jours. On souhaite donc analyser *l'importance relative* des surfaces, c'est-à-dire normaliser les valeurs des surfaces en les divisant par les masses des deux organes, afin de les rendre comparables. Dans un premier temps, il faut bien évidemment convertir l'ensemble des données chiffrées dans des mêmes unités.

Chez l'être humain, le rapport surface sur masse est de $130/1 = 130 \text{ m}^2/\text{kg}$.
Chez l'Arabette des dames, on a une surface de $0,81 \text{ cm}^2 = 0,81 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ et une masse de $1,56 \text{ mg} = 1,56 \times 10^{-6} \text{ kg}$, soit un rapport surface sur masse de $\frac{0,81 \times 10^{-4}}{1,56 \times 10^{-6}} = 52 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Ainsi, rapportées à leur masse, les surfaces d'échanges sont extrêmement importantes chez les végétaux, aussi bien que chez les animaux, étant toutes les deux du même ordre de grandeur.

7 À vous les chercheurs !

Énoncé
p. 200

Nouveau programme

MÉTHODE

Pour l'écriture de protocoles, il est important de penser au cas témoin. C'est le groupe auquel nous comparerons les groupes testés, correspondant donc au cas non traité. De plus, dans l'énoncé, on ne donne pas de limites quant au nombre de plants. Pour qu'une expérience soit valide, il faut la répéter plusieurs fois. On choisira donc d'inclure plusieurs plants par groupes.

On souhaite étudier l'effet du vent sur l'orientation de la croissance de jeunes plants de pins nains. Pour ce faire, nous plaçons les plants de pin à une distance suffisante les uns des autres.

Trois groupes de pins sont possibles. Le premier correspond au groupe témoin, c'est-à-dire sans présence de vent. Les ventilateurs pouvant souffler à deux vitesses, il sera donc possible d'avoir deux groupes tests : le premier soumis à un vent d'intensité faible, et le second, à un vent d'intensité forte.

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

Les pins sont ensuite laissés dans des conditions de luminosité et de température optimales pour leur croissance.

Deux semaines plus tard, les résultats sont relevés. Pour comparer l'orientation des pins, il est possible de quantifier l'angle que forme la tige avec une droite verticale.

8 Croissance - Hormones végétales

Énoncé
p. 201

Nouveau programme

Les propositions exactes sont les suivantes :

- 1 Réponse **b**. La croissance de la pousse est effectivement orientée vers la source lumineuse. La pousse est donc capable de percevoir la source lumineuse et d'orienter sa croissance.
- 2 Réponse **a**. Ici, on sait seulement que la croissance n'est plus orientée. On ne connaît pas encore le rôle de l'extrémité apicale (perception de lumière, ou transmission d'un message).
- 3 Réponse **c**. On ne peut pas conclure quant à la perception de la lumière. En effet, le capuchon pourrait exercer une pression sur la pousse, empêchant à la croissance orientée d'avoir lieu.
- 4 Réponse **c**. Aucune autre région de la plante n'a été testée pour l'instant. On peut juste conclure que l'extrémité apicale de la pousse est capable de percevoir la lumière, à l'origine de la flexion.
- 5 Réponse **b**. Effectivement, l'ajout de l'écran opaque au niveau de la base de la tige n'a pas d'effet, la flexion a toujours lieu. L'apex, de la tige semble donc être un site privilégié pour la perception de la lumière, à l'origine de la courbure.

9 A vous les chercheurs !

Énoncé
p. 203

Nouveau programme

On souhaite localiser les zones d'élongation sur une racine de haricot avec une précision de 5 mm. Pour ce faire, nous traçons des traits tous les 5 mm sur la racine du pied de haricot. Il est possible de numéroté les traits.

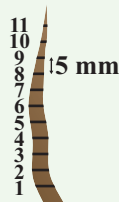


Figure 6.25 – Racine du haricot en début d'expérience

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Le plant de haricot est ensuite placé dans les conditions optimales à sa croissance (en termes de lumière et température), et la racine est placée dans du coton humide.

Au bout de 48 heures, les écarts entre les traits sont quantifiés. Ainsi, si en fin d'expérience, l'écart entre deux traits est toujours de 5 mm, cela suppose la zone concernée n'est pas une zone d'élongation. En revanche, les zones pour lesquelles l'écart entre deux traits a augmenté correspondent à des zones d'élongation.

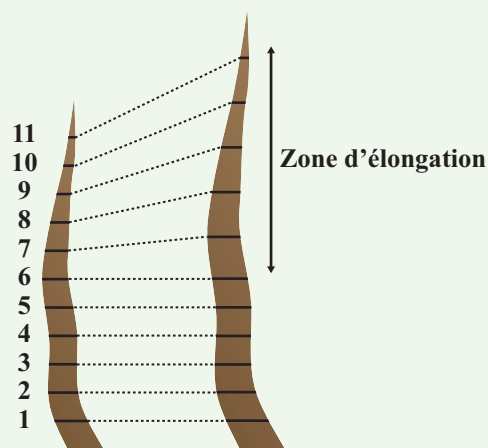


Figure 6.26 – Racine du haricot en début et en fin d'expérience

Dans la racine, la zone d'élongation est localisée en amont du méristème apical racinaire (ici, approximativement entre les traits 6 et 11).

10 Croissance - Hormones végétales

Énoncé
p. 203

Nouveau programme

MÉTHODE

On souhaite ici comprendre comment le port des épinards est régulé et d'en réaliser un schéma bilan. Chaque document permet donc d'ajouter une pièce au puzzle, il est conseillé de commencer le schéma à partir du premier document et de l'aggrémenter au fur et à mesure.

Dans le premier document, on observe qu'un plant d'épinard soumis à des jours longs (éclairage de 14 heures) a réalisé une croissance importante comparé au port en rosette du plant d'épinard soumis à des jours courts (éclairage de 12 jours). Ainsi, la photopériode, correspondant au temps d'éclairage par jour, peut être perçue par les épinards et influe sur leur port.

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

De plus, un plant d'épinard soumis à des jours courts et traité avec une hormone, la gibbérelline, subit une croissance importante. On peut donc en déduire que cette hormone peut contrôler le port des épinards. Une hypothèse pourrait être qu'une photopériode longue permet une synthèse de gibbérelline augmentée et que cette hormone induit l'élongation cellulaire.

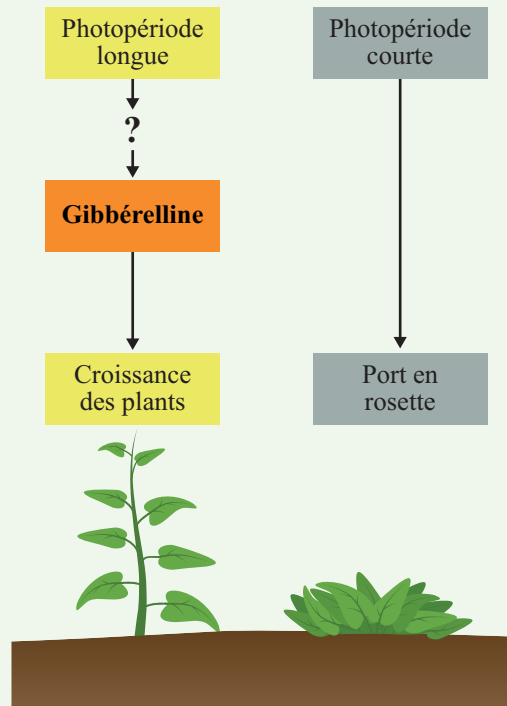


Figure 6.27 – Schéma bilan intermédiaire

Dans le second document, on étudie l'évolution de la quantité de gibbérelline active (GA1) et d'un intermédiaire de sa voie de biosynthèse (GA20) au cours du temps chez une plante soumise à des jours longs, qui est donc censée croître. Globalement, on observe que les quantités de ces deux molécules augmentent au cours du temps, celle de l'intermédiaire GA20 augmentant de façon plus importante que celle de GA1. En effet, après 12 jours longs, l'épinard possède 23 ng/g de GA20, et 7 ng/g de GA1, contre environ 1 ng/g pour chaque molécule en début d'expérience. On en conclue donc qu'une longue photopériode permet effectivement une synthèse accrue de gibbérelline, puisqu'il est indiqué dans l'énoncé que des plantes en jours courts ne subissent pas ou peu de variation des quantités de ces deux molécules.

Voir illustration page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

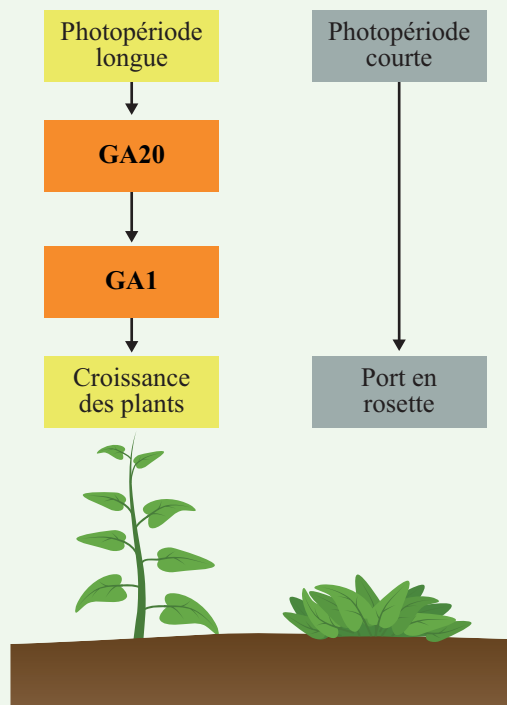


Figure 6.28 – Schéma bilan intermédiaire

Dans le troisième document, on étudie le rôle d'une molécule naturellement présente chez les épinards, BX112, dans le contrôle de la croissance des plants d'épinards soumis à des jours longs. Après 10 jours de jours longs et de traitements avec du BX112, on observe que la quantité de GA20 a été multipliée par 5 comparée au contrôle non traitée, alors que celle de GA1 est diminuée de plus de moitié. Pour expliquer ceci, on peut suggérer que BX112 inhibe la voie de biosynthèse de GA1 à partir de GA20, ce qui conduit à une accumulation de cet intermédiaire alors que l'hormone active n'est pas produite.

Ceci est validé par l'étude du document 4, qui montre que le traitement avec du BX112 d'un épinard soumis à des jours longs (avec une croissance importante), induit un port en rosette. À l'échelle de l'épinard, la diminution de la quantité de GA1 traduit ainsi une faible croissance. De plus, alors que traiter les plantes avec du GA20 n'empêche pas l'effet du BX112, le traitement avec du GA1, quant à lui, permet de restaurer la croissance des plants. Ainsi, BX112 inhibe bien la biosynthèse de GA1, empêchant la croissance des plants.

Voir illustration page ci-contre.

L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES PLANTES À FLEURS • CHAP. 6

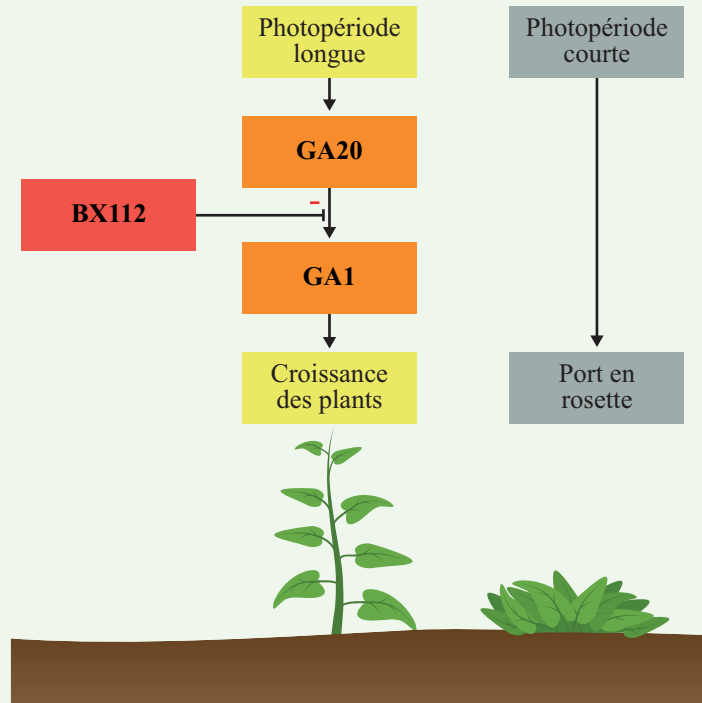


Figure 6.29 – Schéma bilan

11 Mycorhizes

Nouveau programme

Énoncé
p. 206

MÉTHODE

Comme pour la plupart des ensembles documentaires, il est grandement recommandé de faire des liens entre les différents documents. Pour ce faire, il est possible d'émettre des hypothèses en fin d'analyse d'un document, hypothèse qui sera, ou non, vérifiée grâce au document suivant.

On souhaite ici comprendre le caractère avantageux de l'association avec un champignon pour un arbre.

Dans un premier temps, dans le document 1, les zones d'exploration du sol d'un arbre avec mycorhizes et d'un arbre sans sont représentées. Sans mycorhizes, on remarque que les zones d'exploration du sol sont restreintes aux racines de l'arbre. En présence de mycorhizes en revanche, en plus des racines, les champignons sont capables de former des zones d'exploration à plus grande distance de l'arbre. On peut donc suggérer que les mycorhizes permettent d'effectuer des échanges avec le sol, dans des zones qui ne sont pas atteignables pour les racines de l'arbre.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

Le document 2 nous présente ensuite la biomasse foliaire et les taux d'azote et de phosphate des deux arbres étudiés. On remarque que l'arbre présentant des mycorhizes a plus d'azote et de phosphate que l'arbre sans (d'un facteur de 1,5 à 2 à chaque fois). L'augmentation des taux de ces éléments peut être expliquée par le document 1 : des zones d'exploration plus étendues seraient à l'origine d'échanges augmentés avec le sol. De plus, cela se traduit par une biomasse foliaire augmentée également en présence de mycorhizes (d'un facteur de presque 2). Cela suggère donc que les arbres associés à des champignons se développent davantage que les arbres seuls.

Enfin, le document 3 représente le suivi de l'accroissement des deux arbres étudiés. Tout au long de l'année, on observe que l'arbre mycorhizé a un accroissement supérieur à l'arbre seul. Il est possible de quantifier l'accroissement total annuel en ajoutant les données relevées chaque mois. L'arbre avec mycorhizes a alors un accroissement total de plus de 60 mm, contre seulement une trentaine de mm pour l'arbre sans mycorhizes. L'association avec les champignons permet donc un accroissement plus important pour les arbres.

Ainsi, les mycorhizes permettent une exploration du sol augmentée, et donc des échanges augmentés avec le sol. Cela se traduit par une biomasse plus importante et un accroissement plus rapide, conférant donc des avantages certains pour les arbres concernés.

Chapitre

7

Les grandes fonctions des plantes

Plan du chapitre

1. Introduction
2. La production de matière organique par les plantes à fleurs
3. La reproduction chez les plantes à fleurs, entre vie fixée et mobilité

1 Introduction



 Retrouvez les notions essentielles du cours de ce chapitre en vidéo avec 

Nous avons pu voir dans le chapitre 6 en quoi l'organisation structurale d'une plante à fleurs (Angiosperme) lui permet d'assurer ses fonctions nutritives. Nous savons notamment que la plante est capable de produire de la matière organique par photosynthèse. Par ailleurs, la plante a pu développer des stratégies pour permettre la reproduction sexuée.

2 PROBLÉMATIQUE

Malgré leur vie fixée, comment les plantes à fleurs réalisent-elles les grandes fonctions de production de matière organique et de reproduction ?

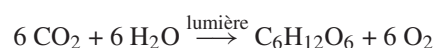
2 La production de matière organique par les plantes à fleurs

2.1 La localisation de la photosynthèse

2.1.1 - Les feuilles constituent des surfaces d'échange

Les plantes à fleurs sont dites autotrophes : elles produisent leur propre matière organique à partir de matière minérale par le biais de la *photosynthèse*.

L'équation-bilan simplifiée (équation plus précise en fin de chapitre) de la fabrication du glucose par photosynthèse s'écrit ainsi :



La matière organique, produite par photosynthèse, sera alors utilisée par les différentes cellules pour réaliser les différentes fonctions cellulaires. La photosynthèse correspond donc à la synthèse d'une molécule à haut potentiel énergétique à partir de CO_2 . Ce métabolisme utilise l'énergie de la lumière pour se réaliser.

La photosynthèse se produit dans les cellules chlorophylliennes, c'est-à-dire celles qui possèdent des chloroplastes, au sein desquels est présente de la chlorophylle.

Les feuilles doivent donc être capables de capter les différents éléments nécessaires à la réalisation de la photosynthèse. Tout d'abord, les cellules du parenchyme palissadique sont alignées en une large surface, optimisant la captation de lumière. De plus, ces cellules sont alimentées par des tissus conducteurs visibles à l'œil : ils forment les nervures de la feuille. Le xylème permet ainsi l'apport d'eau depuis les racines, captée dans le sol (voir chapitre 6). Enfin, les stomates représentent des orifices par lesquels les gaz comme le CO_2 peuvent entrer. Ils circulent efficacement au sein de la feuille grâce aux lacunes.

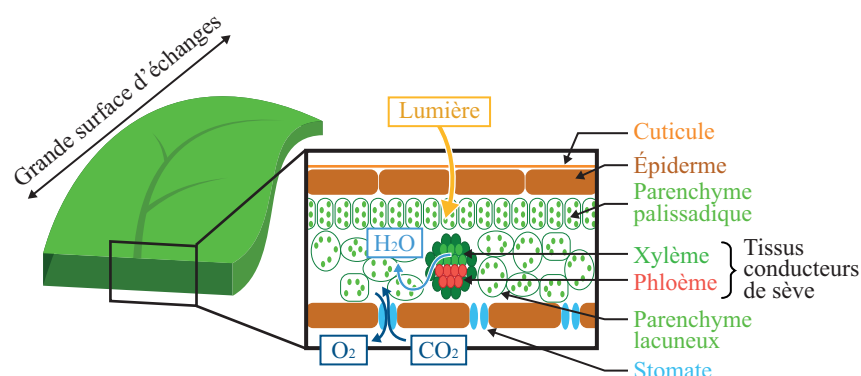


Figure 7.1 – La feuille, siège de la photosynthèse, est capable de capter les éléments nécessaires aux réactions chimiques

Les feuilles peuvent présenter des adaptations à leur environnement (défense contre les phytophages, etc.).

Voir exercices 3 et 4.

2.1.2 - Les chloroplastes des cellules végétales

Les chloroplastes sont des organites présents chez les cellules végétales, au sein desquels se déroule la photosynthèse.

Observés au microscope, les chloroplastes se présentent sous forme de petits organites en général ovoïdes, de quelques micromètres de longueur. Leur couleur verte est due aux pigments chlorophylliens que ces organites renferment. L'observation des chloroplastes en microscopie électronique à transmission montre que ceux-ci sont limités par deux membranes.

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

L'intérieur de l'organite est rempli d'un gel hydraté, le stroma, qui contient de nombreuses molécules dissoutes. Le chloroplaste est par ailleurs parcouru par un réseau de membranes formant des sacs clos aplatis, les thylakoïdes, qui s'empilent en granums. C'est dans l'épaisseur de ces membranes que sont inclus les pigments chlorophylliens.

Définition 1 : thylakoïde

Compartiment du chloroplaste formé d'une membrane délimitant l'espace intrathylakoïdal. Les thylakoïdes des chloroplastes peuvent s'assembler en granums.

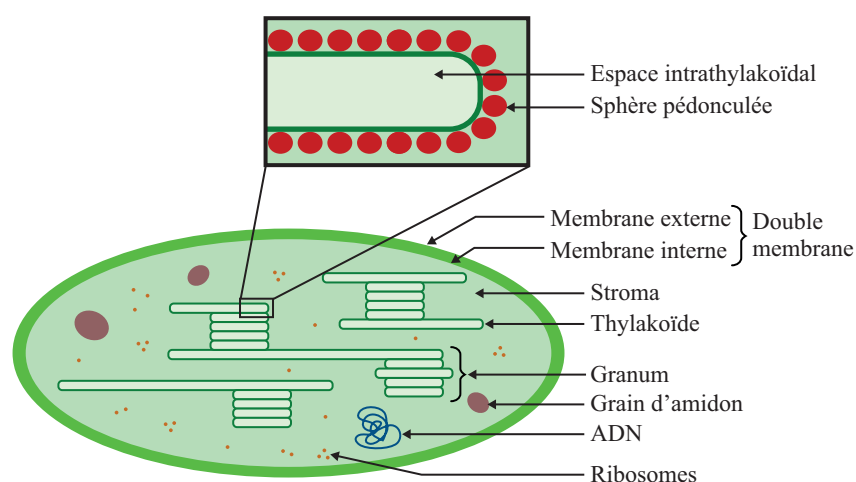


Figure 7.2 – L'organisation des chloroplastes

2.2 Le déroulement de la photosynthèse

La photosynthèse est divisée en deux parties : la phase photochimique et la phase non photochimique (aussi appelée phase chimique).

? PROBLÉMATIQUE

Comment se déroule la phase photochimique de la photosynthèse ?

2.2.1 - La phase photochimique de la photosynthèse

La phase photochimique, comme son nom l'indique, permet la formation d'énergie chimique, à partir d'énergie lumineuse. Cette phase nécessite des pigments photosynthétiques, qui sont rassemblés en complexes appelés *photosystèmes* dans la membrane des thylakoïdes. Le rôle des pigments est d'absorber les rayonnements lumineux à des longueurs d'ondes données, c'est pourquoi ils sont colorés. Une fois l'énergie lumineuse absorbée, elle est convertie en énergie chimique permettant aux premières réactions de la photosynthèse de s'effectuer.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Ceci explique pourquoi le spectre d'absorption des pigments photosynthétiques se superpose à l'efficacité de la photosynthèse.

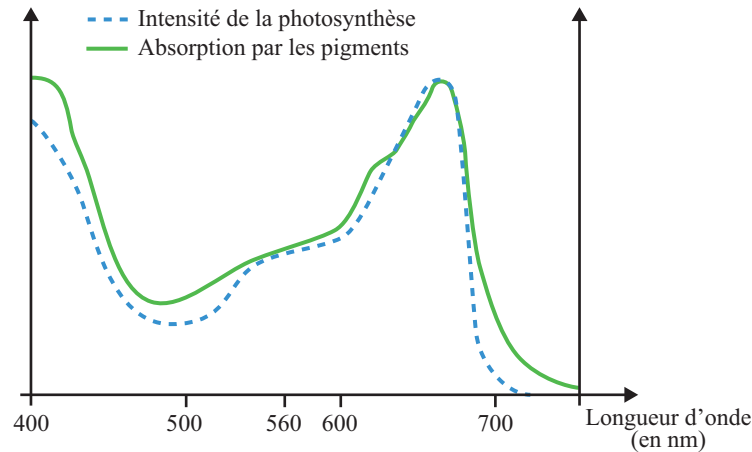
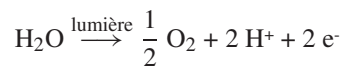


Figure 7.3 – Intensité de photosynthèse et absorption par les pigments photosynthétiques en fonction de la longueur d'ondes de la radiation

L'énergie est transmise à des enzymes localisées du côté de l'espace intrathylakoïdal, qui sont responsables de la photolyse de l'eau.

Définition 2 : photolyse de l'eau

Réaction chimique permise par apport d'énergie lumineuse, au cours de laquelle une molécule d'eau est transformée en dioxygène, protons et électrons.



La photolyse de l'eau induit ainsi une production de protons H^+ dans l'espace intrathylakoïdal. À terme, cela conduit à une forte différence de concentration de part et d'autre de la membrane des thylakoïdes, assimilable à une énergie. Dans la membrane des thylakoïdes sont également présentes des sphères pédonculées, aussi appelées *ATP synthétases*. Ces dernières laissent passer les protons depuis l'espace intrathylakoïdal vers le stroma. Ce flux de protons fournit à l'ATP synthétase de l'énergie lui permettant la synthèse d'une molécule énergétique : l'ATP.

Les électrons, quant à eux, sont pris en charge par des complexes de protéines appartenant à la *chaîne photosynthétique*, puis par l'accepteur d'électrons final appelé coenzyme R, qui passera alors sous sa forme réduite : RH_2 .



Cette réaction ayant lieu dans le stroma, elle y entraîne une consommation de protons H^+ , contribuant donc à la diminution de la concentration en H^+ . Ceci favorise donc davantage le fonctionnement de l'ATP synthase, et donc la synthèse d'ATP.

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

On considère que la photolyse de 12 molécules d'eau est nécessaire à formation d'une molécule d'ATP.

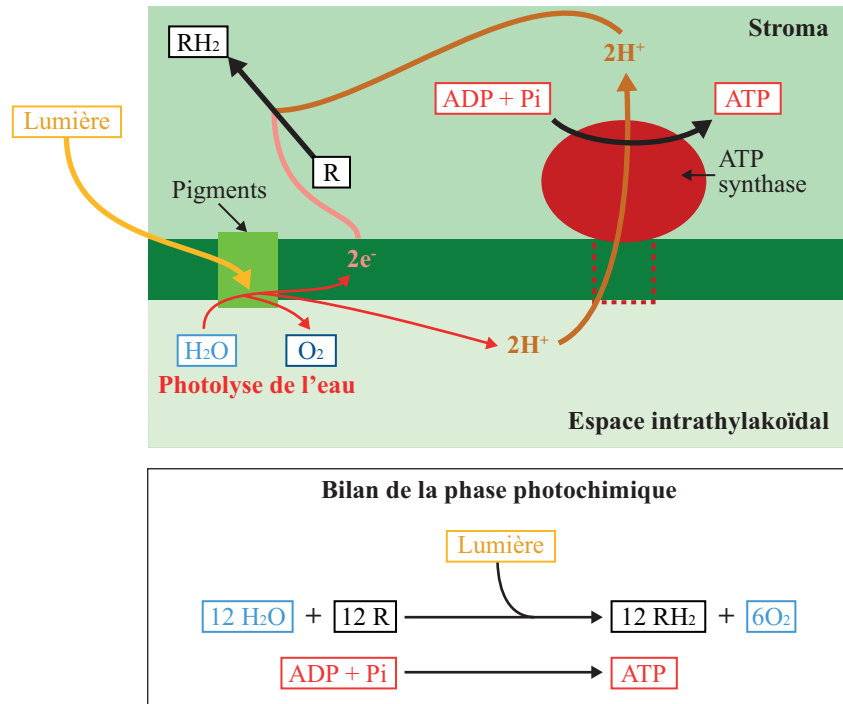


Figure 7.4 – La phase photochimique de la photosynthèse

2.2.2 - La phase chimique de la photosynthèse

Suite à la phase photochimique, deux intermédiaires ont été produits : le RH_2 et l'ATP. Ces molécules seront impliquées lors de la phase chimique, qui se déroule dans le stroma des chloroplastes.

Elle est représentée par le *cycle de Calvin-Benson*, qui correspond à une suite de réactions chimiques permettant l'incorporation de CO_2 dans des molécules organiques comme des glucides.

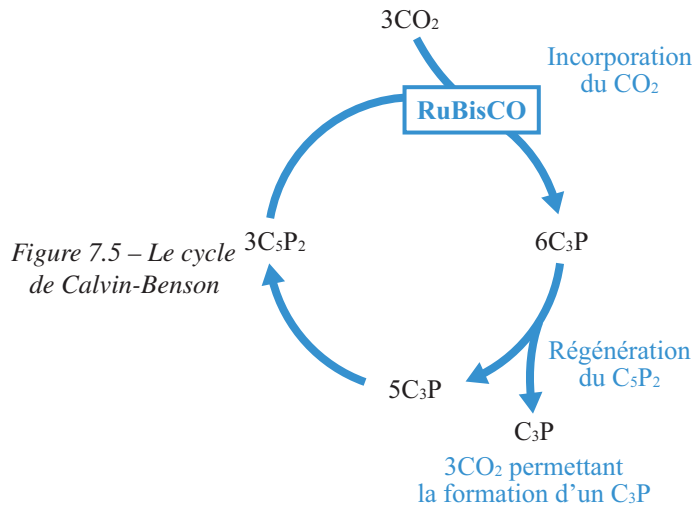
Tout d'abord, du CO_2 est incorporé à une molécule à cinq carbones et deux groupements phosphates, symbolisée C_5P_2 . Deux molécules à trois carbones, C_3P , sont alors formées. Cette réaction est catalysée par la RuBisCO (enzyme la plus présente sur Terre) et nécessite de l'énergie sous forme d'ATP et un donneur d'électrons, le coenzyme réduit RH_2 .

Puis, le C_5P_2 est régénéré, permettant au cycle de continuer.

COURS

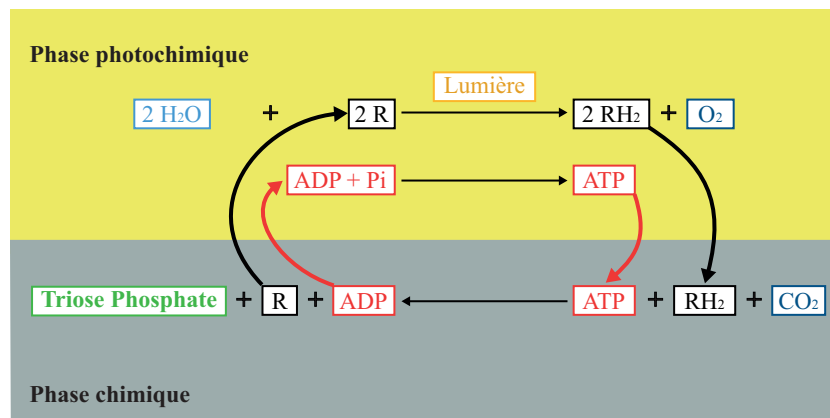
INTERROS

CORRIGÉS



On considère que 5 molécules à trois carbones permettent de reformer 3 molécules à cinq carbones. L'incorporation de 3 molécules de CO_2 permettra la formation de 6 C_3P . Les 5 premiers participeront à une nouvelle formation du C_5P_2 , alors que le sixième sera inclus dans la synthèse de sucres comme le glucose ou le saccharose.

Ainsi, la phase chimique ne dépend pas directement de la lumière, mais il existe un véritable couplage entre les deux phases de la photosynthèse : l'ATP et le coenzyme RH_2 réduits nécessaires à la phase chimique sont régénérés lors de la phase photochimique.



LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

	Phase photochimique	Phase chimique
Localisation	Thylakoïdes	Stroma
Réactions chimiques	Chaîne d'oxydoréduction à partir d'énergie lumineuse	Cycle de Calvin-Benson
Produits formés	O ₂ , ATP et RH ₂	Glucose, R et ADP+Pi
Couples d'oxydoréduction	O ₂ (Ox) / H ₂ O (Red) R (Ox) / RH ₂ (Red)	O ₂ (Ox) / H ₂ O (Red) CO ₂ (Ox) / C ₆ H ₁₂ O ₆ (Red)

Tableau 7.1 – Bilan des deux étapes de la photosynthèse

2.2.3 - Le devenir de la matière organique synthétisée

Les molécules organiques nouvellement synthétisées peuvent ensuite circuler dans toute la plante au sein du phloème, en prenant part à la composition de la sève élaborée. Elles sont nécessaires à la vie de la plante, pouvant intervenir dans la croissance et le port, c'est-à-dire sa forme générale (*via* la synthèse de cellulose et de lignine, qui sont des constituants des parois). Elles peuvent aussi être intégrées dans la formation de tanins et d'anthocyanes, qui sont des molécules de défense contre des prédateurs dits *phytophages* (qui se nourrissent de plantes). Enfin, ces molécules peuvent être mises en réserve sous forme de saccharose, d'amidon, de protéines ou de lipides, permettant de résister à des conditions défavorables, ou de réaliser la reproduction. *Des organes de réserves* peuvent être impliqués ici, comme les tubercules ou les bulbes.

Voir exercices 5 à 9.

À RETENIR

Les plantes à fleurs sont capables de réaliser la photosynthèse, suite de réactions chimiques ayant lieu dans les chloroplastes. La photosynthèse est divisée en deux parties dépendantes l'une de l'autre : la phase photochimique et la phase chimique. Grâce à l'énergie lumineuse, de l'ATP et un coenzyme réduit RH₂ sont produits lors de la phase photochimique. Ces derniers participeront à la transformation de CO₂ en matière organique qui pourra être utilisée par la plante pour ses différentes fonctions.



Voir une vidéo du National Geographic Channel sur la photosynthèse avec

3 La reproduction chez les plantes à fleurs, entre vie fixée et mobilité

Les Angiospermes possèdent deux modes de reproduction : une reproduction asexuée, ne faisant intervenir qu'un organisme parent à l'origine d'autres organismes en ayant recours à des mitoses, et une reproduction sexuée, nécessitant la rencontre d'un gamète mâle et d'un gamète femelle.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Du fait de leur vie fixée, les plantes font face à deux contraintes majeures concernant leur reproduction : dans le cas d'une reproduction sexuée, les gamètes mâles et les gamètes femelles pouvant provenir de deux organismes différents doivent se réunir, alors que les parents sont immobiles et parfois à distance. De plus, les individus nouvellement formés doivent être dispersés, évitant ainsi toute compétition pour les ressources avec les parents.

❓ PROBLÉMATIQUE

Quels sont les mécanismes permettant la reproduction des plantes à fleurs malgré leur mode de vie fixée ?

3.1 La reproduction asexuée des plantes à fleurs

La reproduction asexuée permet la génération de nouveaux organismes à partir d'un seul organisme parent. Elle repose sur une capacité des cellules végétales, la *totipotence*.

Définition 3 : totipotence

Capacité qu'ont certaines cellules à pouvoir se différencier en tous types cellulaires.

Selon l'espèce, des cellules, pouvant aussi bien appartenir à la tige, la racine qu'à des feuilles, se divisent par mitoses. Elles se différencieront ensuite pour aboutir à un nouvel organisme.

Des organes peuvent d'ailleurs être préalablement être mis en place, comme des stolons (tige aérienne) ou des drageons (tige souterraine). Les nouveaux individus bourgeonneront à partir de ces derniers, à une certaine distance du parent. Bien que limitée, une dispersion des organismes dans l'espace est donc possible.

Ces organes dégénéreront enfin avant de disparaître, rendant aux individus leur indépendance.

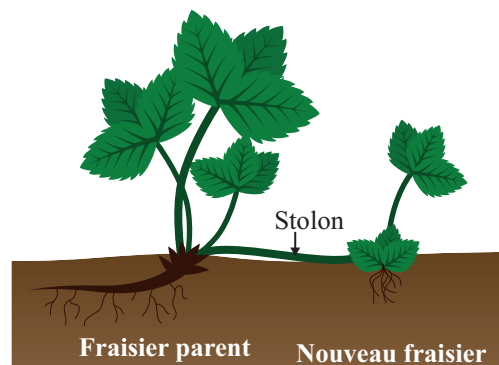


Figure 7.7 – La reproduction asexuée : l'exemple du fraisier

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

Comme vu dans le chapitre 1, la reproduction asexuée conduit à la formation de clones, qui présentent un même génotype.

L'Homme est capable de détourner cette capacité pour multiplier des plants à partir d'un seul pied parent. *Le bouturage* et *le marcottage* sont les deux principales techniques utilisées.

Le bouturage correspond au prélèvement d'un fragment du pied mère (comme un fragment de tige) afin de le planter. Des cellules au niveau du site de la coupe vont alors se différencier, se multiplier et reformer les organes manquants, comme des racines.

Afin de réaliser du marcottage, une portion d'un rameau du pied mère est enterrée, et sa région apicale peut être laissée à l'air libre. Au cours du temps, un nouveau plant se développera : des racines vont se former et les parties aériennes vont croître. Le rameau enterré dégènera, individualisant le pied parent et le pied nouvellement formé.

À RETENIR

Ainsi, la reproduction asexuée permet la génération de nouveaux individus à partir d'un seul organisme parent. Cependant, la dispersion des individus et la diversification génétique des individus reste limitée.

3.2 La reproduction sexuée des Angiospermes

Chez les Angiospermes, la reproduction sexuée fait intervenir les fleurs, qui sont les organes reproducteurs.

3.2.1 - L'organisation des organes reproducteurs : les fleurs

Les fleurs présentent une organisation qui peut être divisée en trois parties.

- Les sépales et les pétales, plus ou moins développés, sont les pièces fertiles de la fleur. Elles ne jouent pas de rôle direct dans la fécondation. En revanche, colorées, elles peuvent attirer des animaux, comme nous le verrons ci-après.
- L'organe reproducteur femelle est composé d'un stigmate et d'un style reliés à l'ovaire, où se situent les ovules. Ensemble, ils forment le pistil. L'ensemble des pièces reproductrices femelles forment le gynécée.
- L'organe reproducteur mâle est constitué de filets portant les anthères. C'est de ces dernières que sont libérés les grains de pollens. L'ensemble des pièces reproductrices mâles forment l'androcée.

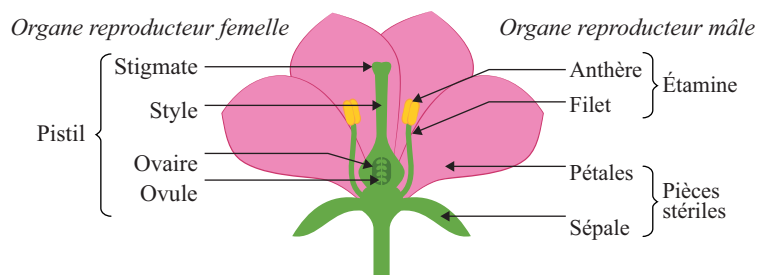


Figure 7.8 – Organisation d'une fleur vue en coupe longitudinale

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Selon les espèces, les deux organes reproducteurs peuvent être présents (fleurs hermaphrodites) ou alors un seul des organes est présent.

3.2.2 - La rencontre des gamètes chez les plantes à fleurs

Chez les Angiospermes, les gamètes mâles sont localisés au sein des grains de pollen et les gamètes femelles, dans l'ovaire. La fécondation, c'est-à-dire la rencontre entre le gamète mâle et le gamète femelle, nécessite un transport du grain de pollen jusqu'à l'appareil reproducteur femelle : c'est la *pollinisation*.

Définition 4 : pollinisation

Transport d'un grain de pollen de l'anthère au stigmate du pistil.

Certaines espèces de plantes à fleurs sont capables de s'auto-féconder : elles ont recours à l'*autogamie*.

Définition 5 : autogamie

Fécondation d'un ovule d'une plante par un gamète mâle provenant de cette même plante.

Chez la plupart des espèces d'Angiospermes, l'autogamie est impossible en raison de mécanismes dits d'incompatibilités. Elles réalisent alors de l'*allogamie*.

Définition 6 : allogamie

Fécondation croisée, c'est-à-dire fécondation d'un ovule d'une plante par un gamète mâle provenant d'une autre plante.

Seule l'allogamie permet un brassage des génomes, à l'origine d'une diversification du vivant. Cependant, les plantes ayant une vie fixée, des agents de transport des grains de pollen sont nécessaires pour que la pollinisation puisse se réaliser. Pour certaines espèces, l'agent de transport est le vent. Ces espèces sont alors dites *anémogames*. Chez d'autres espèces, la pollinisation repose sur une collaboration étroite entre la plante alors dite *zoogame* et un animal pollinisateur. Si cet animal est un insecte, la zoogamie est qualifiée d'*entomogamie*. Des adaptations favorisant la pollinisation sont visibles chez les deux partenaires, qui sont le résultat d'une coévolution.

Définition 7 : coévolution

Évolution parallèle de deux espèces en étroite interaction.

Exemple : un grand nombre de fleurs sont colorées et odorantes, ce qui attire les animaux pollinisateurs. De plus, des nectaires sont souvent présentes à la base des anthères, qui sont des organes qui synthétisent le nectar, un liquide sucré. Des insectes butineurs se nourrissant de nectar devront ainsi entrer dans la fleur, se recouvrant de pollen au contact des anthères. En passant à une autre fleur, certains grains de pollen entreront en contact avec le stigmate, permettant ainsi une fécondation croisée.

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

Chez l'abeille, des adaptations sont également présentes, comme des poils et des corbeilles au niveau des pattes postérieures, ce qui favorise le transport du pollen.

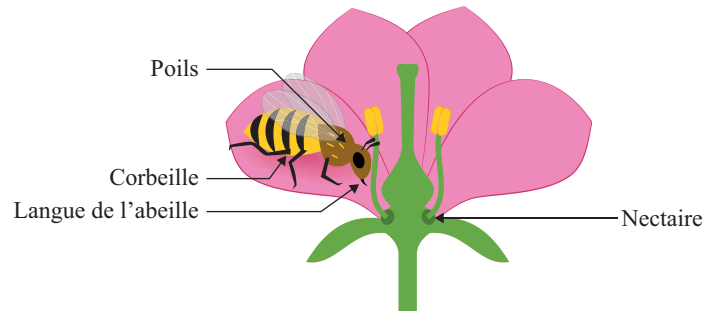


Figure 7.9 – Exemples d'adaptations favorisant la pollinisation par des abeilles

Une fois le pollen en contact du stigmate, un tube pollinique va se former, et entrer au sein du style pour atteindre les ovaires. Les gamètes mâles y seront alors libérés, permettant à la fécondation d'avoir lieu.

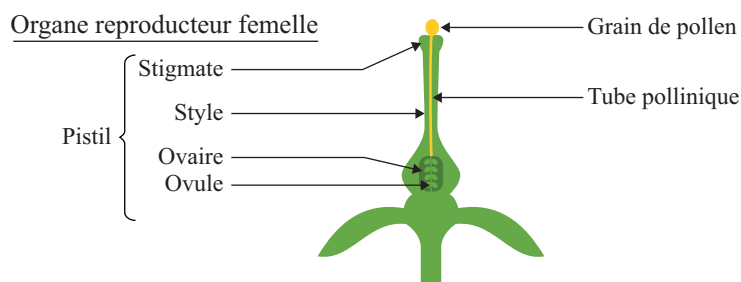


Figure 7.10 – Formation du tube pollinique (seul l'appareil reproducteur femelle est représenté)

3.2.3 - La formation du fruit et sa dispersion

PROBLÉMATIQUE

Une fois la fécondation réalisée, quels sont les processus à l'origine des fruits, et de leur dispersion ?

Une fois les ovules fécondés, la fleur se transforme. Les pétales, les étamines et le pistil régressent. L'ovaire, quant à lui, augmente de volume et est à l'origine du futur fruit.

Les ovules fécondés forment les graines, qui sont constituées de l'embryon de la futur plante, d'une enveloppe protectrice, ainsi que de réserves énergétiques nécessaires à la graine pour sa germination.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

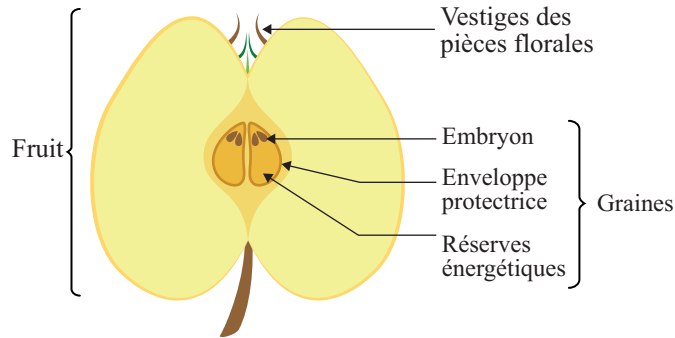


Figure 7.11 – Coupe transverse d'un fruit

La dissémination des fruits est une étape importante. En effet, une grande distance avec les plants parents limitera une potentielle compétition pour les ressources.

Des agents physiques peuvent être responsables de cette dissémination comme le vent, ou l'eau. De plus, des espèces animales peuvent encore une fois participer à la mise en mouvement des végétaux. Certains fruits sont par exemple dotés de crochets, leur permettant de s'accrocher aux poils d'animaux. Enfin, certains fruits sont charnus. En s'en nourrissant, des oiseaux ou des mammifères dissémineront les graines en même temps que leurs déjections.

Voir exercices 10 à 12.

➔ À RETENIR

Ainsi, les plantes à fleurs possèdent deux modes de reproduction : une reproduction asexuée et une reproduction sexuée. La première n'implique qu'un seul parent, et n'induit qu'une faible colonisation de l'espace et peu de diversification génétique. C'est le contraire pour la reproduction sexuée. La vie fixée des plantes à fleurs n'est pas une limite pour leur reproduction sexuée, puisque la pollinisation ainsi que la dissémination des graines reposent sur des espèces animales ou des facteurs physiques comme le vent et l'eau. Une fois dispersées, les graines vont germer, et être à l'origine de nouvelles plantes.

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

1 VÉRIFICATION DE CONNAISSANCES

5 min

Corrigé
p. 242

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1 La pollinisation :
 - a permet la dispersion des plantes à fleurs ;
 - b est une étape préalable à la fécondation, au cours de laquelle le pollen est transporté jusqu'au stigmate d'une fleur ;
 - c est nécessairement associée à une espèce animale ;
 - d est une étape primordiale de la reproduction asexuée.
- 2 La phase photochimique de la photosynthèse :
 - a permet la synthèse d'ATP, réaction catalysée par des pigments qui sont situés dans la membrane des thylakoïdes ;
 - b est indépendante de la phase chimique ;
 - c est un ensemble de réactions au cours desquelles du CO_2 est incorporé pour former de la matière organique ;
 - d a lieu dans toutes les cellules de la plante ;
 - e permet la synthèse d'ATP et de coenzyme réduit nécessaires à réalisation de la phase chimique.

2 VÉRIFICATION DES CONNAISSANCES



5 min

Corrigé
p. 242

Qui suis-je ?

- 1 Ensemble formé par un embryon, des réserves nécessaires à sa germination, et une enveloppe protectrice
- 2 Capacité pour une cellule à pouvoir se différencier en tous les types cellulaires d'un organisme
- 3 Prolongement mis en place par le pollen permettant l'apport des gamètes jusqu'à l'ovaire de la plante à fleurs, en passant par le style..

3 Plante fixée - Défenses



5 min

Corrigé
p. 242

Lycée Lamartine, Paris

On étudie les effets de l'attaque de chenilles d'un papillon : la piéride, sur une plante : la moutarde noire, en quantifiant la densité des poils présents sur les feuilles de la plante.

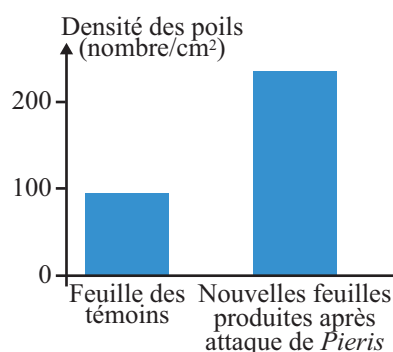


Figure 7.12 – Densité des poils présents sur les feuilles de la plante

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Pour chaque proposition, choisissez la ou les bonne(s) réponse(s) :

- 1 Le paramètre « densité de poils » mesure :
 - ☐ a la masse de poils ;
 - ☐ le nombre de poils ;
 - ☐ le nombre de poils par unité de surface.
- 2 La densité des poils sur les feuilles après attaque de chenille augmente :
 - ☐ de 50 % environ ;
 - ☐ de manière non significative ;
 - ☐ de 167 % environ.
- 3 On peut faire l'hypothèse que :
 - ☐ a les poils favorisent le développement des chenilles ;
 - ☐ b les poils contiennent une molécule hautement toxique pour les chenilles ;
 - ☐ c les poils gênent la consommation du limbe des feuilles par les chenilles ;
 - ☐ d les poils gênent la ponte des œufs par les chenilles de piéride.

4 Plante fixée - Adaptations



10 min

Corrigé
p. 242

Lycée Lamartine, Paris

La gentiane de Koch vit dans les pelouses alpines, à plus de 2 000 m d'altitude. Ce milieu est caractérisé par une température moyenne de 2°C, un enneigement stable, des vents forts et un rayonnement ultraviolet (UV) intense. Cette plante présente un appareil aérien peu développé sans tige et avec des feuilles plaquées au sol, un bourgeon terminal souterrain et une racine contenant des réserves de glucides. La couleur de ses fleurs est due à l'accumulation d'anthocyanes, pigments capables d'absorber les UV.

À partir des informations tirées du document, explicitez les différentes adaptations morphologiques de la gentiane de Koch aux contraintes de vie en altitude.

Altération de l'ADN (unités arbitraires)

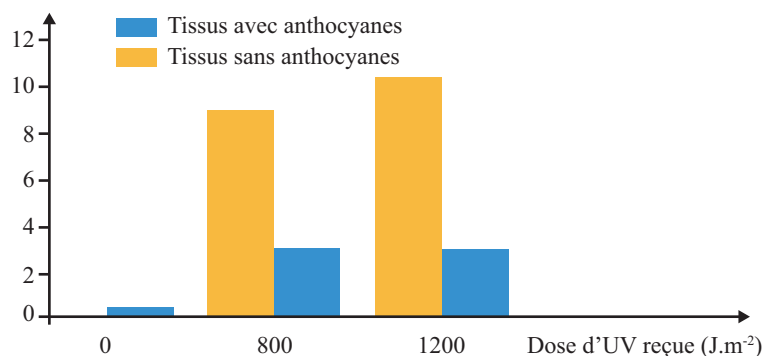


Figure 7.13 – Effet de doses variables d'UV sur l'altération de l'ADN dans les tissus végétaux

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

5 Plante - Insecte - Coévolution



Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

La coévolution entre insectes pollinisateurs et les plantes entomogames qu'ils fréquentent fait l'objet de nombreuses publications scientifiques. Dans son ouvrage « Des insectes et des plantes » publié en 1974 (collection Que sais-je, Presses Universitaires de France), Christian SOUCHON écrit :

« Il existe même de véritables adaptations de la fleur à ce mode de pollinisation par les insectes. La sauge (...) nous en donnera un exemple. Ses étamines ont une morphologie complexe : au sommet du filet s'articule un axe qui porte à son extrémité supérieure une demi-anthère fertile et à l'extrémité inférieure une demi-anthère atrophiée, formant une sorte de pédale sur laquelle vient buter tout insecte pénétrant dans la fleur, ce qui provoque un mouvement de bascule de la demi-anthère fertile sur le dos de l'animal qui se trouve ainsi chargé de pollen. Remarquons que le stigmate d'une fleur jeune est immature et se trouve au dessus du dos de l'animal : sa pollinisation n'est donc pas possible, mais si l'insecte (...) visite une fleur plus âgée, la surface stigmatique épanouie se trouve à un niveau plus bas et peut entrer en contact avec le dos de l'insecte »

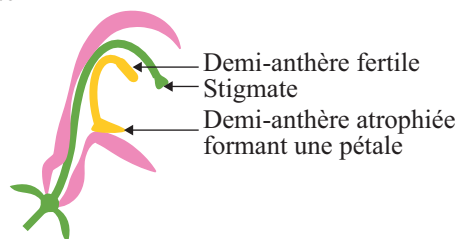


Figure 7.14 – Organisation de la fleur de sauge

Montrez en quoi l'organisation de la fleur de la sauge représente un exemple original d'adaptation de l'appareil floral à la pollinisation par les insectes.

6 Plante - Insecte - Coévolution



Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

La Vanille est une plante introduite en 1819 sur l'île de la Réunion. Dans son pays d'origine, le Mexique, la pollinisation de la Vanille est assurée par une petite abeille, la Mélipone. Cet insecte n'existe pas à la Réunion. Lors de l'introduction de la Vanille à la Réunion, les fleurs de Vanille donnaient très rarement une gousse (moins d'une fleur sur 100), ceci parce qu'il existe à l'intérieur de la fleur une fine languette qui empêchait tout contact entre les étamines et le pistil.

En 1841, Edmond Albius, un jeune esclave réunionnais, imagine une méthode artificielle de pollinisation de la vanille. Avec une simple épine, il soulève la languette qui masque le pistil. Ensuite, avec le doigt, il rabat l'étamine sur le pistil.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

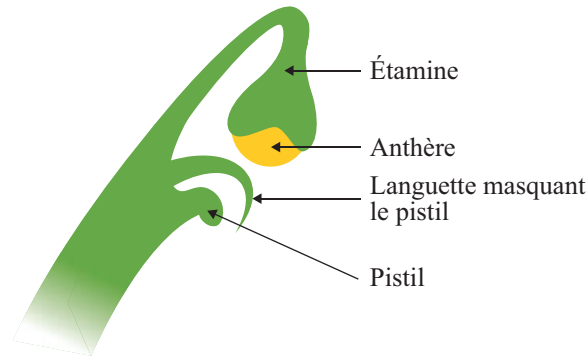


Figure 7.15 – Schéma d'une fleur de Vanille

- 1 Indiquez en quoi le couple (fleur de vanille, abeille *Mélipone*) représente un exemple de coévolution.
- 2 Montrez comment l'action de l'être humain a contribué à la survie de la Vanille sur l'île de la Réunion.

7 Photosynthèse - Echanges gazeux



15 min

Corrigé
p. 244

Lycée Corot, Savigny/Orge

Des chlorelles, algues vertes unicellulaires, sont cultivées dans un milieu nutritif constitué d'eau (H_2^{16}O) et de substances minérales. Dans ce milieu barbote un mélange gazeux contenant en proportions égales, du dioxygène $^{16}\text{O}_2$ et du dioxygène lourd $^{18}\text{O}_2$. L'arrivée de ce mélange gazeux est stoppée au temps zéro, moment où débutent les mesures expérimentales ; la culture est alors placée alternativement à l'obscurité ou à la lumière.

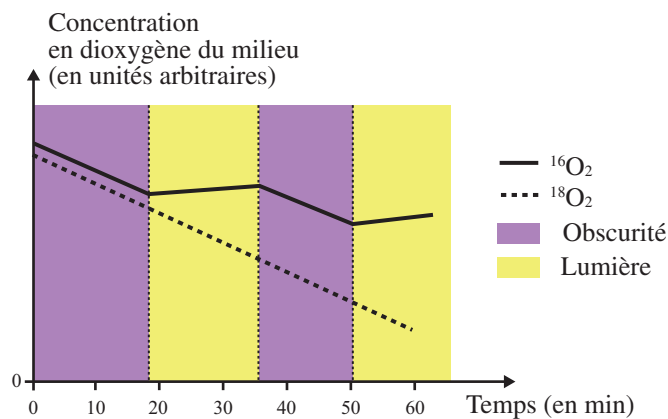


Figure 7.16 – Concentration en dioxygène 16 et 18 en fonction du temps et de l'éclairement

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

À partir des informations fournies par le document, expliquez comment on peut distinguer l'origine du dioxygène impliqué dans la respiration et la photosynthèse.

8 Photosynthèse - biosynthèse



25 min

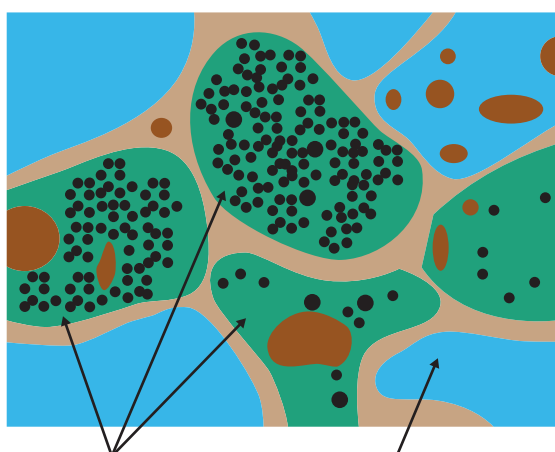
Corrigé
p. 245

Lycée Notre Dame du Grandchamp, Versailles

A partir des informations extraites des documents A et B et à l'aide de vos connaissances, expliquez comment l'hévéa peut produire des molécules de caoutchouc.

Document A

Dans l'écorce de l'hévéa, il existe des cellules particulières appelées cellules laticifères.



Cellules laticifères
les vésicules noires contiennent
les molécules de caoutchouc

Tube criblé où circule
la sève élaborée contenant
des acides aminés et du saccharose

Figure 7.17 – Schéma d'une électronographie d'une coupe d'écorce (non chlorophyllienne) d'un hévéa

Les cellules laticifères possèdent une enzyme particulière : la rubbertransférase-REF.

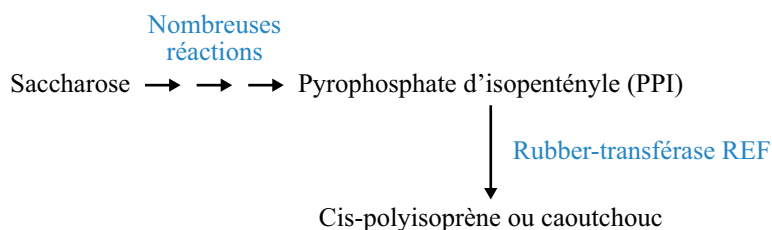


Figure 7.18 – Étapes simplifiées de la biosynthèse du caoutchouc

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Document B

Des cellules chlorophylliennes extraites des feuilles sont éclairées et alimentées en CO_2 marqué au carbone 14 pendant un temps très bref. Elles reçoivent ensuite à nouveau du CO_2 non marqué. Les tracés indiquent la quantité de carbone marqué retrouvé dans certaines molécules extraites de ces cellules.

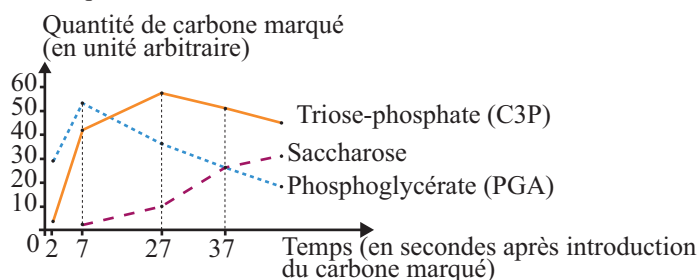


Figure 7.19 – Évolution au cours du temps de la radioactivité de molécules des cellules chlorophylliennes

9 Photosynthèse - Biocarburants



35 min

Corrigé
p. 245

Lycée Notre Dame du Grandchamp, Versailles

La diminution des réserves de carburant fossile rend nécessaire le développement de nouvelles sources d'énergie, notamment la production de biocarburants. Actuellement, ceux-ci peuvent être produits à partir de la culture de certaines espèces (soja, moutarde, palmier à huile, algues vertes unicellulaires).

À partir de la mise en relation des données des documents et des connaissances, montrez que certaines molécules organiques produites lors de la photosynthèse peuvent être à l'origine des biocarburants. Donnez des arguments qui conduiraient à privilégier l'une des cultures présentées.

Document A : conditions de culture d'algues vertes

Des algues vertes unicellulaires dotées de chloroplastes sont cultivées dans différents milieux. Le premier jour (J0) et le 7^{ème} jour (J7), on mesure à l'aide d'un spectrophotomètre l'absorbance de la lumière des suspensions d'algues.

Absorbance en unités arbitraires	À la lumière		À l'obscurité	
	Milieu avec ajout de CO_2	Milieu sans ajout de CO_2	Milieu avec ajout de CO_2	Milieu sans ajout de CO_2
J0	0,05	0,05	0,05	0,05
J7	0,62	0,15	0,05	0,05

Tableau 7.2 – Résultats de mesure d'absorbance des cultures d'algues (l'absorbance est la mesure d'absorption d'un faisceau lumineux par la suspension d'algues ; cette valeur est proportionnelle à l'abondance des algues)

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

Document B : expérience historique de Calvin

Des algues vertes unicellulaires sont placées dans un bioréacteur éclairé contenant un milieu nutritif adéquat pour que se réalise la photosynthèse. On leur fournit du CO_2 radioactif durant 5 secondes.

Résultats de l'expérience de Calvin : des chromatographies sont réalisées à partir des constituants des algues puis leur radioactivité est révélée. Tous ces composés radioactifs sont des molécules organiques.

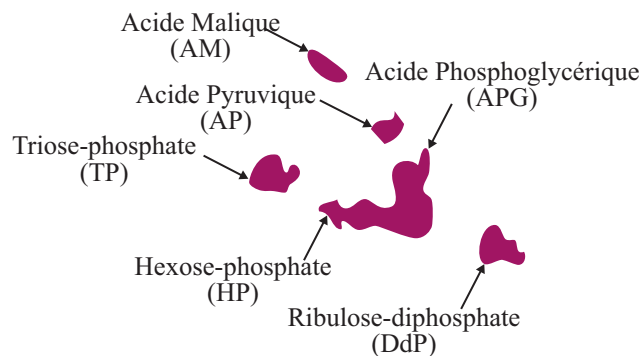


Figure 7.20 – Résultat de la chromatographie

Document C : synthèse des lipides dans les cellules chlorophylliennes

Dans le chloroplaste éclairé, de petites molécules sont d'abord produites et la synthèse d'acides gras s'effectue grâce à des acides gras synthétases (enzymes du chloroplaste). Les acides gras entrent dans la constitution des lipides, soit membranaires, soit de réserve. Les algues unicellulaires cultivées dans des milieux appropriés accumulent de grandes quantités de lipides de réserve. Ils sont extraits, puis leur raffinage permet de produire des biocarburants.

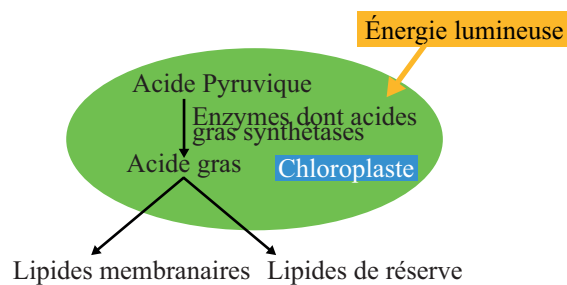


Figure 7.21 – Une voie de synthèse des lipides

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Document D

Type de cultures	Biocarburants produits (L/ha/an)	Types de surfaces utilisées
Soja	446	Agricoles
Moutarde	1300	Agricoles
Palmier à huile	5950	Agricoles
Algues vertes unicellulaires	45 000 à 137 000	Non agricoles

Tableau 7.3 – Comparaison de la production de biocarburants de différentes cultures en fonction de la surface cultivée

10 Plante - Primate - Coévolution



15 min

Corrigé
p. 246

Lycée Charlemagne, Paris

Dans les forêts tropicales de la réserve forestière de Kibale (Ouganda), les primates représentent 25 à 40% des mangeurs de fruits. Une étude menée à montré que les fruits constituaient 82% de la ration alimentaire des chimpanzés. On a également estimé que les différents singes rejettent sur 1 km² les graines de 35 000 fruits par jour, dans leurs crottes ou en les crachant.

À l'aide de l'étude des documents suivants et de vos connaissances, montrez que la collaboration entre les plantes à fleurs et les primates dans les forêts tropicales est le résultat d'un processus de coévolution que vous expliquerez.

Document 1 : pourcentage de germination de graines issues ou non d'excréments pour 4 espèces végétales de la réserve de Kibale

Espèce étudiée	Pourcentage de germination	
	Graines issues d'excréments	Graines non issues d'excréments
Chrysophyllum	33.2	0
Tabernaemontana	19.5	11
Mymusops	87.5	0
Aframorum	42.9	0

Remarque : les graines non issues d'excréments sont restées au pied de la plante qui les a engendrées.

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

Document 2 : les préférences alimentaires des Gibbons d'une forêt de Bornéa

Type de fruits	Proportion dans la ration alimentaire	Proportion parmi les fruits de la forêt
À pulpe sucrée et juteuse	83%	45%
À pulpe fibreuse et juteuse	3%	2%
À pulpe très réduite	11.7%	23%
Fruit sec	30%	30%

Document 3 : la teneur en sucre des pulpes des fruits tropicaux

Sur les différents continents, les plantes à fleurs et à fruits charnus se sont diversifiées en même temps que les primates. La sélection naturelle a créé des fruits dont les pulpes ont des teneurs en sucre très élevées, avoisinant celles des variétés les plus succulentes sélectionnées par les horticulteurs. Par exemple, le genre *Santiria* présente des formes avec une quantité de sucre exceptionnelle : les trois-quarts de sa matière sèche, ce qui constitue une véritable confiture naturelle !

*D'après C.M. Hladik « le comportement alimentaire des primates »
Primatologie n°5 (2002)*

Document 4 : teneur en sucre et énergie

Les macaques, comme les saïous d'Amérique, les chimpanzés et très probablement les premiers hominidés, doivent ressentir une forte motivation pour trouver, chaque jour, des ressources dispersées mais variées et riches en énergie. Qui dit motivation, dit nécessairement récompense, c'est-à-dire que les primates utilisant les fruits les plus riches en sucres en perçoivent aussi l'agréable saveur, ce qui les encourage à poursuivre leur longue et exténuante quête alimentaire. Et nous savons que le plaisir immédiat que procure la perception d'aliments sucrés entraîne une sécrétion de substances de la famille des opiacés dans le centre du plaisir de l'encéphale. Le développement de l'acuité gustative et de la réponse hédonique (le plaisir de déguster) ont donné de l'efficacité aux primates qui s'appliquent à découvrir les fruits les meilleurs, agissant ainsi comme des « jardiniers de la forêt » qui sélectionnent peu à peu les arbres ou les lianes qui les produisent.

*D'après C.M. Hladik « le comportement alimentaire des primates »
Les courriers de la nature n°227 (2006)*

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

11 Photosynthèse - Pigments



35 min

Corrigé
p. 247

Lycée La Favorite Saint Thérèse, Lyon

On cherche à établir les relations entre l'absorption de lumière, l'ATP et la synthèse de molécules organiques dans les chloroplastes d'une cellule chlorophyllienne.

Répondez au problème posé à l'aide des résultats expérimentaux présentés dans les documents.

Document A

Les Chlorelles sont des algues unicellulaires. À la suite d'une mutation, on a pu obtenir des chlorelles incolores. À la lumière, après plusieurs jours de culture dans un milieu exclusivement minéral, on constate que seules les chlorelles vertes se multiplient alors que la population de chlorelles incolores reste stable. Cultivées dans les mêmes conditions mais à l'obscurité, aucun des deux types de chlorelles ne se multiplie.

Document B

Des chloroplastes isolés intacts sont mis en suspension dans un milieu nutritif contenant de l'ADP et des phosphates marqués au ^{32}P . On étudie l'incorporation dans l'ATP de ce phosphore radioactif par les chloroplastes dans différentes conditions d'éclairement au cours du temps.

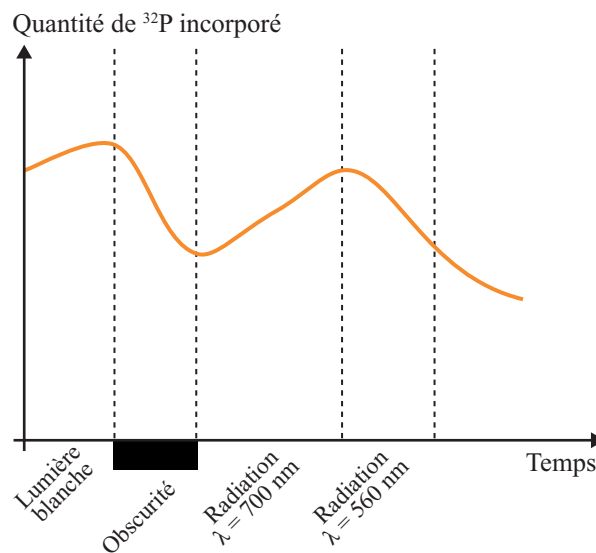


Figure 7.22 – Incorporation de ^{32}P dans l'ATP par suspension de chloroplastes en fonction de l'éclairement

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

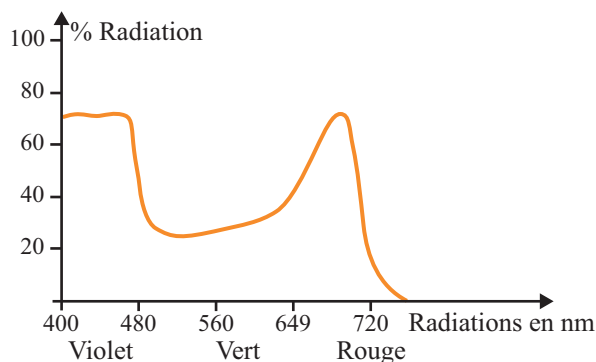


Figure 7.23 – Spectre d'absorption d'une suspension de chloroplastes

Document C

Des expériences sont réalisées à partir de fragments de chloroplastes séparés en deux fractions :

- une fraction constituée uniquement de thylakoïdes exposés à la lumière ;
- une fraction liquide provenant du stroma, laissée à l'obscurité et additionnée de dioxyde de carbone marqué à l'isotope radioactif ^{14}C .

Conditions expérimentales		Quantité de ^{14}C fixé dans le stroma, mesurée en coups par minute
1	Stroma laissé à l'obscurité + ATP	45 000 l'étirement causé par le choc
2	Stroma laissé à l'obscurité	3 500
3	Stroma laissé à l'obscurité et thylakoïdes ayant séjourné à la lumière	100 000

Tableau 7.4 – Résultats des expériences sur les conditions de la fixation du dioxyde de carbone dans les chloroplastes

12 Photosynthèse

Lycée La Rochefoucauld, Paris



40 min

Corrigé
p. 248

Les documents présentent des expériences effectuées sur des algues vertes unicellulaires, les Chlorelles, afin de déterminer les premières molécules organiques formées lors de la photosynthèse.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Document A

Des Chlorelles fortement éclairées sont mises en présence de $^{14}\text{CO}_2$ pendant des temps variables. À l'issue de ces expositions, les algues sont tuées immédiatement et leurs molécules organiques sont triées par chromatographie bidimensionnelle. Suivant leur taille, les molécules migrent et se disposent à des places précises sur le support. Les chromatogrammes obtenus sont radio-graphés.

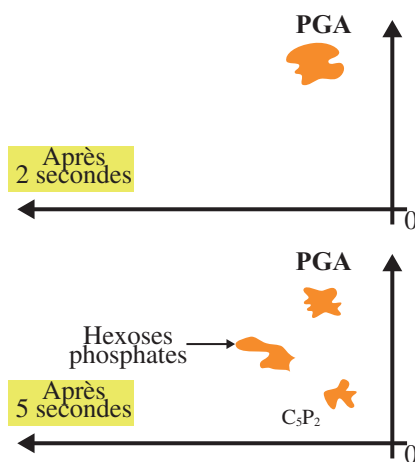


Figure 7.24 – Résultat des chromatographie et autoradiographie après culture sur milieu avec du $^{14}\text{CO}_2$ (les hexoses sont des oses à 6 atomes de carbone)

Document B

On mesure les variations de concentration des molécules mises en évidence par la 1^{ère} expérience. Ces mesures sont réalisées dans deux conditions expérimentales : à la lumière (a) et à la lumière avec présence puis absence de CO_2 (b).

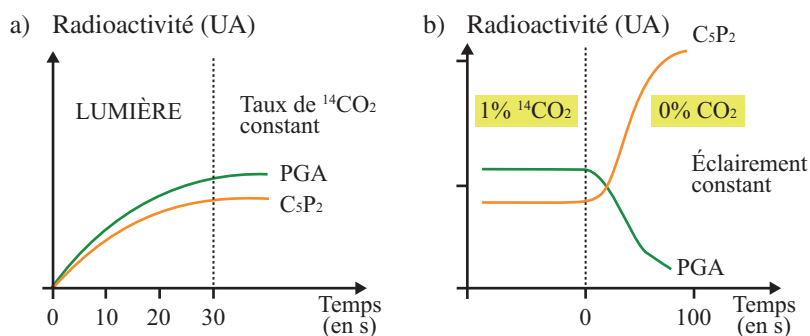


Figure 7.25 – Mesure de la radioactivité des molécules organiques produites à la lumière avec CO_2 tout le temps (a) et avec CO_2 pendant le début de l'expérience uniquement (b)

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

- 1 D'après la simple analyse des autoradiographies, dans quelle mesure peut-on préciser l'ordre de formation des 3 molécules organiques ?
- 2 En utilisant vos connaissances, expliquez d'une part l'apparition de PGA radioactif, d'autre part la formation de C_5P_2 et d'hexoses phosphates (on précise de que le PGA est une molécule à 3 atomes de carbone).
- 3 Dans la 2^{ème} expérience, formulez une hypothèse pouvant expliquer la stabilisation des taux de PGA et de C_5P_2 radioactifs au bout de 30 minutes (cas a).
- 4 Comment interprétez-vous l'évolution de ces taux lorsque l'on supprime le CO_2 (cas b) ?

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 VÉRIFICATION DE CONNAISSANCES

Énoncé
p. 229

ATTENTION

La pollinisation ne permet pas la dispersion des plantes à fleurs étant donné qu'aucun plant ne subit de déplacement : le pollen est transporté vers une plante déjà existante.

- 1 Réponse **b**.
- 2 Réponse **e**.

2 VÉRIFICATION DES CONNAISSANCES

Énoncé
p. 229

- 1 Un fruit
- 2 La totipotence
- 3 Le tube pollinique

3 Plante fixée - Défenses

Énoncé
p. 229

Lycée Lamartine, Paris

Les réponses correctes sont :

- 1 Réponse **c** : l'unité de la densité, en nombre/cm² nous indique que c'est effectivement un nombre de poils par unité de surface.
- 2 Réponse **c** : la densité initiale est d'environ 90 poils/cm², elle est de 240 poils/cm² sur les nouvelles feuilles, soit une augmentation de 167%. En effet, $[(240 - 90)/90] \times 100 = 167\%$.
- 3 Réponses **b** et **c** : les nouvelles feuilles sont produites après une attaque par *Pieris*, il est donc peu probable que la réaction de la plante favorise le développement des chenilles, au contraire. De plus, les chenilles ne pondant pas d'œufs, la réponse d. est également éliminée.

4 Plante fixée - Adaptations

Énoncé
p. 230

Lycée Lamartine, Paris

On souhaite ici comprendre les adaptations morphologiques de la gentiane de Koch à la vie en altitude.

MÉTHODE

Avant de discuter des adaptations de la gentiane de Koch à la vie en altitude, il faut précisément définir quelles en sont les contraintes.

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

La vie en altitude présente des contraintes fortes : la température est relativement basse (moyenne de 2°C), les vents sont forts, l'enneigement est stable, et les rayonnements UV sont intenses.

D'après l'énoncé, la gentiane de Koch présente des adaptations pour la vie en altitude.

Tout d'abord, on apprend que cette plante possède un appareil aérien peu développé sans tige, et des feuilles plaquées au sol, ce qui est associé à une faible prise aux vents qui sont dans cet environnement violents.

De plus, avec un bourgeon terminal souterrain et une racine contenant des réserves énergétiques, la gentiane est probablement résistante à la neige. Elle peut probablement continuer à vivre temporairement sans nécessité de photosynthèse.

Enfin, le graphique montre les altérations de l'ADN pour des tissus avec et sans anthocyanes qui sont soumis à des rayonnements UV. On observe que les tissus avec anthocyanes présentent moins d'altérations de l'ADN induites par les UV que les tissus en possédant (réduction d'un facteur de plus de 2 pour des doses d'UV de 800 et 1 200 J.m⁻²). La gentiane de Koch possédant des anthocyanes, elle est donc plus résistante aux rayonnements UV intenses.

La gentiane de Koch présente donc des adaptations qui lui permettent de résister aux contraintes de la vie en altitude.

5 Plante - Insecte - Coévolution

Énoncé
p. 231

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

On souhaite déterminer en quoi la fleur de la sauge sauvage représente un exemple original d'adaptation à la pollinisation par les insectes.

Tout d'abord, il est suggéré dans le texte que les étamines et le pistil de la sauge ne sont pas matures en même temps : les anthères matures sont présents sur les fleurs jeunes, et le pistil mature, sur les fleurs plus âgées. Ceci laisse donc supposer que la sauge ne peut pas réaliser l'autogamie. Le pollen devra donc être transporté vers une autre fleur d'une autre plante.

Les étamines de la sauge présentent une organisation particulière : une demi-anthère est atrophiée, et forme une pédale sur laquelle appuie tout insecte entrant dans la fleur. Par un mouvement de levier, la demi-anthère fertile se trouve alors en contact avec le dos de l'insecte, permettant au pollen de s'y coller. Une fois l'insecte sur une fleur plus âgée (et donc possédant un pistil mature), les grains de pollen entreront en contact avec le stigmate, permettant ainsi la pollinisation.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

6 Plante - Insecte - Coévolution

Énoncé
p. 231

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

- 1 La coévolution correspond à l'évolution parallèle de deux espèces en étroite interaction, avec mise en place d'adaptations en lien avec cette interaction.

Le couple fleur de vanille, *Mélipone* présente un exemple de coévolution car la fleur de vanille possède une languette masquant le pistil, empêchant l'autogamie. De plus, lors de son import à la Réunion, les plants de vanille ne se reproduisaient plus, ce qui suggère qu'en l'absence de la *Mélipone*, la pollinisation n'était plus possible. Seule cette espèce semble donc capable de jouer ce rôle.

- 2 Sans *Mélipone*, la survie de la Vanille était compromise à la Réunion. En soulevant la languette masquant le pistil et en appuyant sur l'étamine la mettant en contact avec le pistil, l'être humain a permis à l'autogamie de se réaliser.

L'être humain permet donc par action manuelle aux plants de vanille de s'affranchir de la *Mélipone*, contribuant à sa survie à la Réunion.

7 Photosynthèse - Echanges gazeux

Énoncé
p. 232

Lycée Corot, Savigny/Orge

On souhaite prédire l'origine du dioxygène impliqué dans la respiration et dans la photosynthèse, c'est-à-dire savoir le(s)quel(s) du $^{16}\text{O}_2$ ou du $^{18}\text{O}_2$ joue(nt) un rôle dans ces deux processus.

On dispose d'une culture de chlorelles qui sont soumises à des phases de lumière et d'obscurité. L'évolution des concentrations en $^{16}\text{O}_2$ et $^{18}\text{O}_2$ est quantifiée au cours du temps.

Or, on sait que la phase photochimique de la photosynthèse, pendant laquelle l' O_2 est produit lors de la photolyse de l'eau, ne peut se dérouler qu'en présence de lumière. En revanche, la respiration a lieu indépendamment de la présence de lumière.

On remarque qu'à l'obscurité, les concentrations en $^{16}\text{O}_2$ et en $^{18}\text{O}_2$ diminuent. Ceci indique donc que les deux isotopes sont consommés lors de la respiration des chlorelles.

En revanche, à la lumière, la concentration en $^{16}\text{O}_2$ augmente, alors que celle en $^{18}\text{O}_2$ continue de diminuer. Or, le ^{16}O ne peut provenir que de la molécule d'eau. Ainsi, seul le $^{16}\text{O}_2$ est formé lors de la photosynthèse. Il est à noter qu'en présence de lumière, les deux isotopes continuent d'être consommés par la respiration.

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

8 Photosynthèse - biosynthèse

Énoncé
p. 233

Lycée Notre Dame du Grandchamp, Versailles

On souhaite ici comprendre comment l'hévéa est capable de synthétiser du caoutchouc.

Le document A nous présente dans un premier temps un schéma d'une électrographie d'une coupe d'écorce non chlorophyllienne d'un hévéa. Des cellules laticifères, comportant des vésicules de caoutchouc y sont présentes. On peut supposer que c'est au sein de ces cellules que se réalise la synthèse de caoutchouc. De plus, des tubes criblés sont présents à proximité des cellules laticifères, laissant suggérer que des échanges entre la sève et ces cellules sont possibles. Les étapes de la biosynthèse de caoutchouc sont ensuite indiquées. Du saccharose est transformé en PPI, puis en caoutchouc grâce à l'action d'une enzyme, la rubber-transférase-REF.

L'écorce étant un organe non chlorophyllien, aucune photosynthèse n'est possible ici. Ainsi, les molécules de saccharose nécessaires à la synthèse de caoutchouc pourront être acheminées *via* la sève élaborée.

Dans le document B, des cellules chlorophylliennes sont ensuite mises en présence transitoirement de $^{14}\text{CO}_2$, avant de recevoir de nouveau du CO_2 non marqué. Ceci permet donc de suivre le devenir du ^{14}C au sein des feuilles, suite à son incorporation. On étudie donc la quantité de ^{14}C au cours du temps pour trois molécules, le C3P, le PGA et le saccharose. On observe que le PGA et le C3P marqués présentent plus ou moins la même évolution : une augmentation transitoire lors des premiers temps de l'expérience (respectivement jusque 7 et 27 secondes), avant de diminuer. Ces deux molécules sont donc synthétisées avant d'être consommées au sein des cellules chlorophylliennes. Le saccharose marqué, quant à lui, met un temps plus important à être synthétisé (à partir de 7 secondes) et sa quantité augmente jusqu'à la fin de l'expérience. On peut donc suggérer que lors de la photosynthèse, des intermédiaires sont synthétisés (d'abord PGA, puis C3P). Ces derniers semblent être ensuite transformés en saccharose.

Ainsi, on peut en déduire que la synthèse de caoutchouc nécessite trois étapes : la synthèse de saccharose suite à la photosynthèse, son transport par la sève élaborée jusqu'aux cellules laticifères, et sa transformation en caoutchouc notamment grâce à la rubber-transférase-REF.

9 Photosynthèse - Biocarburants

Énoncé
p. 234

Lycée Notre Dame du Grandchamp, Versailles

On souhaite démontrer dans un premier temps que la photosynthèse permet la synthèse de molécules organiques qui peuvent être à l'origine de biocarburants. Dans un second temps, on souhaite privilégier une des cultures présentes.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

Dans le document A, des algues vertes unicellulaires sont placées à la lumière ou à l'obscurité pendant 7 jours et leur développement est suivi par lecture d'absorbance. On remarque qu'à l'obscurité (avec et sans CO_2) et en présence de lumière sans CO_2 , l'absorbance est la même à J7 qu'à J0 (0,05). Les algues ne se sont donc pas développées. Cependant, en présence de CO_2 et de lumière, l'absorbance est passée de 0,05 à 0,62. Les algues peuvent donc se développer uniquement en présence de lumière et de CO_2 , c'est-à-dire dans des conditions permettant la photosynthèse.

Dans le document B, des algues sont placées dans un bioréacteur éclairé contenant un milieu nutritif. Du CO_2 marqué est ajouté pendant 5 secondes. Une chromatographie, mettant en évidence les molécules synthétisées à partir du CO_2 radioactif est présentée. On remarque la présence d'un grand nombre de molécules marquées, dont l'acide pyruvique. Ainsi, la photosynthèse a permis la formation de ces molécules.

Le document C nous présente la voie de synthèse des lipides dans les cellules chlorophylliennes. De l'acide pyruvique est transformé en acides gras par des enzymes dont l'acide gras synthétase, puis en lipides membranaires et en lipides de réserve. Une fois extraits, ces derniers peuvent être utilisés pour produire des biocarburants. Ces réactions nécessitent de l'acide pyruvique, qui fait partie des molécules mises en évidence dans le document B. Ainsi, la photosynthèse chez les algues vertes unicellulaires permet la formation d'acide pyruvique, qui sera transformé en lipides de réserve, permettant la production de biocarburants.

Enfin, le document D propose l'utilisation de cultures de soja, de moutarde, de palmier à huile et d'algues vertes unicellulaires pour la production de biocarburants. On observe que les productions sont moindres chez les trois premiers types de culture (respectivement 446, 1 300 et 5 950 L/ha/an), alors qu'elles sont au moins dix fois supérieures avec les algues vertes (de 45 000 à 137 000 L/ha/an). De plus, les trois premières cultures nécessitent des surfaces agricoles, ce qui n'est pas le cas pour les algues.

Ainsi, les algues vertes unicellulaires sont capables de synthétiser des lipides de réserves permettant la production de biocarburants. Ceci nécessite la production d'acide pyruvique, qui est un des produits de la photosynthèse. Présentant un rendement important et ne nécessitant pas de surfaces agricoles, il sera possible de privilégier la culture d'algues vertes unicellulaires pour la production de biocarburants.

10 Plante - Primate - Coévolution

Énoncé
p. 236

Lycée Charlemagne, Paris

Le but de cet exercice est de montrer que les plantes à fleurs des forêts tropicales et les primates collaborent, suite à une coévolution.

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Tout d'abord, le document 1 nous présente les pourcentages de germination de graines de quatre espèces, selon qu'elles soient issues d'excréments ou non. Dans les quatre cas, les graines germent davantage si elles sont issues d'excréments avec des pourcentages de germinations compris entre 33.2 et 87.5% , contre 0 et 11% de germination pour les graines non issues d'excréments. Ainsi, pour une graine de ces espèces, le fait d'être mangée confère une plus grande probabilité de germer, suggérant une collaboration animale/végétale ici.

Dans un second temps, le document 2 montre les préférences alimentaires des Gibbons, selon le type de fruits. On observe que les fruits principalement mangés par les Gibbons sont ceux à pulpe (99.7% de la portion alimentaire), alors que les fruits secs (0.3% de la portion alimentaire) sont très présents dans la forêt (représentant 30% des fruits). Les Gibbons ont donc une préférence pour les fruits à pulpe, surtout si la pulpe est sucrée et juteuse.

Les document 3 et 4 nous apprennent que les fruits se sont diversifiés en même temps que les primates, suggérant une coévolution. Dans les forêts, certains fruits sont effectivement extrêmement sucrés. La saveur de ce type de fruits provoque chez les primates une sécrétion d'opiacés dans le centre du plaisir de l'encéphale, associée à une sensation de plaisir. Ceci explique donc pourquoi les primates ont pu sélectionner les fruits les plus sucrés, en les mangeant préférentiellement.

En conclusion, les primates constituent un grand groupe mangeur de fruits. Ils préfèrent les fruits les plus sucrés, dont ils vont se nourrir. Ce processus s'apparente à de la sélection, puisque le fait d'être mangé favorise pour une graine sa germination. On a donc bien ici une coévolution : les fruits, en raison de la pression de sélection apportée par les primates, produisent des fruits très sucrés, et les primates participent à la dispersion des graines en les crachant, ou *via* l'élimination de leurs excréments.

11 Photosynthèse - Pigments

Énoncé
p. 238

Lycée La Favorite Saint Thérèse, Lyon

On souhaite comprendre le lien entre absorption de lumière, ATP et synthèse de matière organique chez les chlorelles.

Dans le *document A*, nous apprenons tout d'abord que des chlorelles mutantes incolores sont incapables de se développer. De même, des chlorelles non mutantes ne peuvent se multiplier qu'en présence de lumière. Ceci laisse donc suggérer que la lumière et la présence de pigments (responsables de la couleurs) comme la chlorophylle sont nécessaires pour le développement des chlorelles.

Le *document B* correspond à une expérience au cours de laquelle des chloroplastes subissent un éclaircissement (lumière blanche) suivi d'une phase d'obscurité, de lumière à une longueur d'ondes de 700nm et enfin de lumière à

560 nm. L'intégration de ^{32}P dans l'ATP est suivie, permettant de quantifier la synthèse d'ATP lors des différentes phases de l'expérience. Globalement, on remarque que lors des phases de lumière blanche et de lumière avec une longueur d'ondes de 700 nm, la quantité de ^{32}P assimilée augmente. Lors de ces phases, des processus permettant la synthèse d'ATP ont donc lieu dans les chloroplastes. Cependant, la quantité de ^{32}P incorporé diminue lors des phases d'obscurité et de lumière à 560 nm. Ceci laisse donc supposer que lors de ces phases, l'ATP nouvellement formé est hydrolysé.

Or, le spectre d'absorption des chloroplastes nous indique qu'une radiation de 700 nm correspond à une absorption maximale (70% d'absorption), contre seulement 40% pour 560 nm.

On peut ainsi corréler la synthèse d'ATP et la lumière par la réalisation de la photosynthèse au sein des chloroplastes. En présence de lumière blanche, de l'ATP est effectivement synthétisé. C'est également le cas pour des radiations aux longueurs d'ondes précises, si et seulement si l'absorption de la lumière par les pigments chloroplastiques est suffisante.

Enfin, le *document C* montre la quantification de ^{14}C fixé par le stroma (c'est-à-dire la synthèse de molécules organiques) en présence ou non d'ATP et de thylakoïdes ayant séjourné à la lumière. On remarque qu'en ajoutant de l'ATP au stroma laissé à l'obscurité, la fixation de ^{14}C est augmentée (45 000 coups par minute contre seulement 3 500). Ainsi, le stroma est capable de fixer le ^{14}C et donc de synthétiser de la matière organique, mais il nécessite de l'ATP. De plus, en ajoutant au stroma laissé à l'obscurité des thylakoïdes ayant séjourné à la lumière, la fixation du ^{14}C est davantage augmentée (100 000 coups par minutes). Ceci suggère donc que les thylakoïdes peuvent assister le stroma pour la synthèse de matière organique (possiblement en synthétisant de l'ATP).

Ainsi, on a pu démontrer ici que des chlorelles sans chlorophylle ou laissées à l'obscurité ne pouvaient se développer. Ceci peut s'expliquer par leur incapacité à réaliser la photosynthèse. En effet, les chloroplastes sont capables de synthétiser de l'ATP en présence de lumière (si l'absorption par les chloroplastes est suffisante). Le stroma, quant à lui, semble utiliser cet ATP nouvellement formé pour synthétiser de la matière organique.

12 Photosynthèse

Lycée La Rochefoucauld, Paris

Énoncé
p. 239

1 MÉTHODE

Les chlorelles sont mises en présence de $^{14}\text{CO}_2$. Le ^{14}C étant radioactif, il peut être mis en évidence par autoradiographie. Ainsi, on souhaite suivre l'incorporation du ^{14}C dans la matière organique formée.

LES GRANDES FONCTIONS DES PLANTES • CHAP. 7

MÉTHODE

La chromatographie bidimensionnelle correspond à une première migration des molécules étudiées dans une direction, avant une seconde migration dans une direction perpendiculaire à la première. Cette double migration permet une meilleure séparation des molécules, qui seront ici mises en évidence par autoradiographie.

D'après le document A, on observe qu'après deux secondes d'exposition à la lumière, seul le PGA est visible par autoradiographie. Après cinq secondes d'exposition, en plus du PGA, la présence d'hexoses phosphates et de C_5P_2 est mise en évidence.

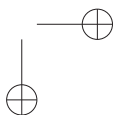
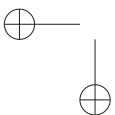
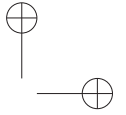
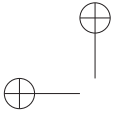
Ainsi, deux secondes d'exposition suffisent à la synthèse de PGA, qui est donc formé en premier. Les hexoses phosphates et le C_5P_2 sont synthétisés ensuite (visibles après cinq secondes). Toutefois, il n'est pas possible de discerner lequel des deux est le premier formé.

- 2 Lors de la phase chimique, du CO_2 est intégré à de la matière organique, qui est dans un premier temps du C_5P_2 . Puis, cette molécule, à six carbones, est divisée en deux molécules de PGA. Il est donc logique que le PGA soit la première molécule visible présentant le carbone marqué. Suite à des réactions chimiques, le PGA est transformé en triose phosphate, dont une portion servira à régénérer le C_5P_2 . L'autre portion de trioses phosphates est impliquée dans la synthèse d'hexoses phosphates. Ceci explique ainsi le fait que les molécules d'hexoses phosphates et de C_5P_2 apparaissent ensuite par autoradiographie. Ces étapes se déroulent au sein du cycle de Calvin.
- 3 En présence continue de $^{14}CO_2$, on remarque que la radioactivité des molécules de PGA et de C_5P_2 augmente dans un premier temps, suggérant que le carbone radiactif est intégré dans ces deux molécules. Cependant, après une trentaine de minutes, les taux de radioactivité deviennent stables. On peut alors supposer qu'il s'agit du moment où les molécules de PGA et de C_5P_2 présenteront toutes un ^{14}C . La phase chimique étant un cycle, il n'est donc pas possible d'intégrer plus d'atomes de carbones marqués.
- 4 On observe qu'à partir de l'arrêt de l'apport en CO_2 , la radioactivité augmente pour le C_5P_2 jusqu'à atteindre un plateau, et diminue pour le PGA pendant 100 secondes, au terme desquelles elle s'annule. Il semble donc que les atomes de ^{14}C ont été rétrocédés au C_5P_2 par le PGA. Ceci peut s'expliquer par le fait que suite à l'arrêt de l'apport en CO_2 , la transformation de C_5P_2 en PGA ne peut plus avoir lieu. Ainsi, le C_5P_2 s'accumule, d'où l'augmentation de sa radioactivité. De plus, le PGA continue d'être consommé sans être resynthétisé, ce qui explique la diminution de sa radioactivité.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre

8

La domestication des plantes

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Les processus de sélection à l'origine de la domestication
3. Les conséquences génétiques de la domestication des plantes

1 Introduction

L'agriculture est née avec la sédentarisation de l'être humain au cours du Néolithique. Maîtriser l'exploitation des plantes constitue donc un enjeu majeur pour l'humanité. En effet au cours des siècles, comme il l'a fait pour les animaux, l'être humain a modifié certaines plantes en sélectionnant artificiellement certains caractères pour son usage propre et les a ainsi domestiquées. Ce processus fut à l'origine de nouvelles espèces comme le blé ou le maïs.

PROBLÉMATIQUE

Par quels moyens l'être humain a-t-il pu domestiquer des espèces végétales et quelles en ont été les conséquences ?

2 Les processus de sélection à l'origine de la domestication

PROBLÉMATIQUE

Quels procédés ont participé à la domestication des plantes par l'être humain ?

2.1 Une sélection des caractères les plus avantageux

2.1.1 - De la plante sauvage à la plante domestiquée

Au début de l'agriculture, l'être humain s'est intéressé à des espèces de plantes sauvages. N'ayant aucune idée des bases génétiques de l'évolution, l'être humain a sélectionné avec soin pour ses semis, les graines qui possédaient les caractères les plus avantageux. C'est ce qu'on appelle la *sélection massale*.

Définition 1 : sélection massale

Méthode de sélection empirique correspondant au choix des graines pour les futurs semis en fonction de caractères avantageux pour la culture (taille des graines, des fruits, goût, aspect visuel, etc.), permettant une augmentation des rendements.

Cette sélection artificielle a permis l'apparition de caractères nouveaux chez la plante, non plus sauvage, mais dès lors domestiquée. Dans certains cas, cela a même conduit à une spéciation, c'est-à-dire à la création d'une nouvelle espèce.

Exemple : la téosinte est une espèce de plante sauvage du Mexique. Elle présente un épi avec seulement quelques grains. Des études ont démontré que le maïs que nous connaissons aujourd'hui provient de la téosinte, domestiquée il y a plus de 7 000 ans. Le maïs et la téosinte ne peuvent pas se reproduire entre eux et conduire à une descendance fertile : ce sont deux espèces différentes.

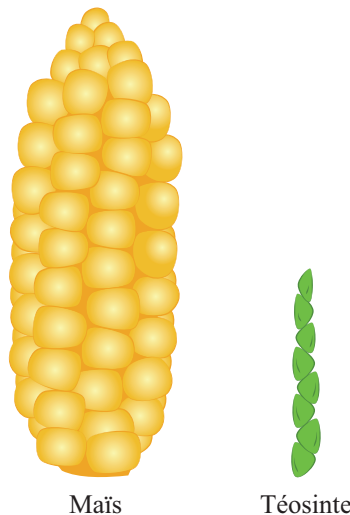


Figure 8.1 – Dessin d'un épi de maïs (à gauche) et d'un épi de téosinte (à droite)

Afin de nourrir un nombre d'êtres humains en constante augmentation, un des objectifs de la domestication est ainsi d'améliorer de façon quantitative et qualitative, les productions végétales. Parmi les améliorations recherchées, on peut trouver :

- une augmentation de rendement ;
- une résistance aux mauvaises conditions climatiques ;
- une résistance aux maladies et aux insectes ;
- une amélioration de la qualité intrinsèque de certaines plantes destinées à une utilisation autre que l'alimentation (pharmaceutique, textile, carburant, etc.).

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

2.1.2 - Des nouvelles variétés au sein d'une même espèce

Dans une même espèce, des groupes existent, présentant chacun des caractéristiques propres.

Exemple : les pommes Pink Lady sont reconnues comme étant très savoureuses et étant de couleur jaune à rouge, alors que les Granny-Smith sont plus acidulées et sont vertes. Ces groupes sont appelés *des variétés*.

Définition 2 : variété

Sous-groupe de plantes d'une même espèce qui présentent certaines mêmes caractéristiques majeures (concernant le goût des fruits, la taille, la couleur, etc.).

Ainsi, les variétés présentent des avantages et des inconvénients pour chaque utilisation. Il est alors possible de croiser des plants de deux variétés présentant chacune un avantage. Après une sélection des descendants qui sont alors appelés *des hybrides*, et des croisements consécutifs, une nouvelle variété ayant les avantages recherchés peut alors être créée. La création de nouvelles variétés contribue à la biodiversité.

Voir exercices 3 et 8.

2.2 Les apports du génie génétique

Aujourd'hui, les processus de sélection artificielle sont grandement accélérés par l'utilisation de biotechnologies. Il est en effet possible d'utiliser différentes techniques pour modifier directement le génome de plantes, au cours de ce qu'on appelle *la transgénèse*.

Une de ces techniques correspond à l'utilisation d'une bactérie, *Agrobacterium tumefaciens*. Cette bactérie est naturellement capable d'insérer une partie de son génome directement dans le génome des cellules des racines de la plante. Les scientifiques sont capables de détourner ce mécanisme d'infection en choisissant la séquence d'ADN qui est insérée, codant par exemple un gène intéressant pour l'agriculture. En effet, une fois l'insertion réalisée, les cellules de la plante expriment la/les protéine(s) choisie(s).

Cette technique est basée sur la capacité de *totipotence* des cellules végétales, c'est-à-dire qu'elles peuvent, dans certaines conditions, permettre la régénération d'un plant entier à partir d'un massif de cellules.

Ce massif de cellules, appelé *cal*, est d'abord mis en contact avec *Agrobacterium tumefaciens* modifiée génétiquement. Après le transfert génétique, les cellules sont mises en culture afin de régénérer des plants qui seront à l'origine d'une nouvelle variété.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

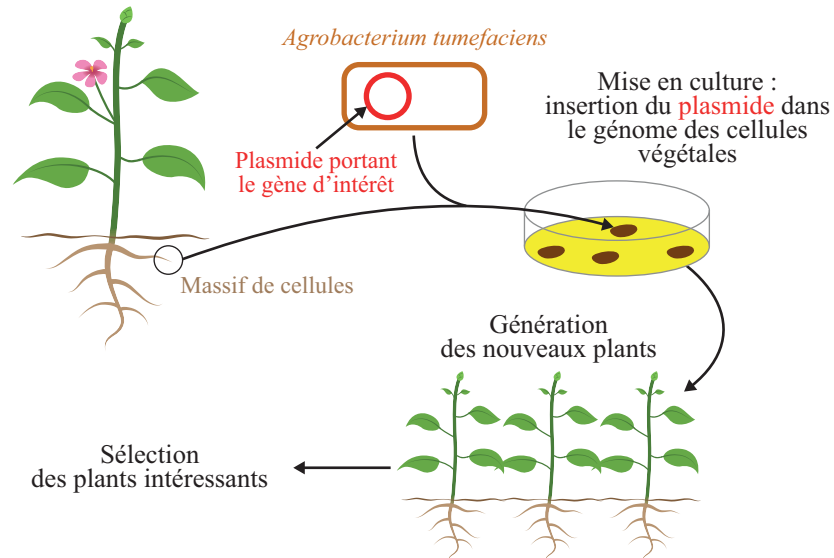


Figure 8.2 – Utilisation d'*Agrobacterium tumefaciens* dans la création de nouvelles variétés

Voir exercice 4 page 260.

➔ À RETENIR

Depuis le Néolithique, l'être humain a été capable de sélectionner artificiellement des caractères chez des plantes sauvages qui sont à l'origine des variétés d'espèces domestiquées. Aujourd'hui, l'utilisation de biotechnologies permet d'accélérer ce processus de sélection, et de cibler des gènes intéressants pour l'agriculture.

3 Les conséquences génétiques de la domestication des plantes

? PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les conséquences de la domestication sur les espèces de plantes, et chez l'être humain ?

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

3.1 Conséquences de la domestication sur les plantes

3.1.1 - Le syndrome de domestication

Par le biais de la domestication, l'être humain privilégie des caractéristiques plus ou moins génériques. Ainsi, la plupart des espèces domestiquées présentent des propriétés communes. C'est le *syndrome de domestication*.

Définition 3 : syndrome de domestication

Ensemble de caractères présents chez la plupart des espèces domestiquées, mais absentes chez les espèces sauvages.

Chez les plantes, cela se traduit par exemple par une augmentation de la taille et du nombre des graines et des fruits. De même, l'être humain récoltant les fruits ou les graines des plantes qu'il domestique, une perte de dissémination est visible chez certaines espèces.

Exemple : le Blé présente une organisation qui permet une récolte facilitée et une dissémination limitée comparée à l'espèce sauvage à laquelle il est apparenté, l'Amidonnier.

Enfin, l'être humain, en protégeant ses cultures, a induit le développement de fragilités du système immunitaire des plantes domestiquées : ces dernières ne sont plus capables de se défendre seules face aux pathogènes. Elles sont donc dépendantes de l'action de l'être humain pour survivre.

3.1.2 - Une homogénéisation génétique des populations

L'être humain exerce une pression de sélection constante sur les espèces domestiquées pour la conservation ou l'amélioration de certains caractères. Ceci induit progressivement un appauvrissement de la diversité allélique des populations domestiquées, réduisant donc le polymorphisme au sein des cultures.

Cette homogénéisation génétique a notamment pour conséquence une réduction de la capacité de la population à répondre à des perturbations.

Exemple : Dans le cas de survenues de maladies, si une bactérie, un champignon ou un virus peut infecter un plant, il peut théoriquement infecter l'ensemble de la culture. Des champs entiers peuvent alors être ravagés. En 1845 en Irlande par exemple, un champignon, le mildiou, a dessimé une grande partie des cultures de pommes de terre. Ceci engendra alors une grande famine qui fut à l'origine de près d'un million de morts.

Pour éviter qu'un tel épisode ne se reproduise et rétablir une certaine diversité génétique, l'être humain tente d'exercer une pression amoindrie.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Exemple : l'étude des espèces sauvages ne nécessitant aucune action humaine pour leur développement permet d'envisager des pratiques culturelles nouvelles, nécessitant par exemple moins d'engrais. Enfin, les agriculteurs peuvent avoir recours à la lutte biologique pour réduire le nombre de ravageurs (comme la libération de coccinelles dans des champs pour lutter contre les pucerons).

Voir exercices 5 et 7.

3.2 Conséquences de la domestication sur l'être humain

La sédentarisation de l'être humain et la domestication des premières espèces végétales a induit la naissance de savoir-faire et de traditions. Les plantes domestiquées ont alors rythmé la vie des êtres humains et se sont intégrées à leur culture. Une transmission culturelle de ces savoir-faire est alors née, subissant à long terme une *évolution culturelle*.

L'emploi des plantes domestiquées pour l'alimentation s'est alors transformé en pression de sélection pour l'être humain : les allèles conférant un avantage pour la digestion de ces aliments ont davantage été sélectionnés. Ainsi, la domestication a également engendré des modifications génétiques chez les êtres humains.

Voir exercices 6 et 9.

➔ À RETENIR

La sélection artificielle intrinsèque à la domestication a conduit à des modifications génétiques chez les végétaux. Les populations des différentes espèces se sont homogénéisées génétiquement, ce qui a entraîné une fragilisation des espèces et une dépendance vis-à-vis de l'être humain. Des conséquences ont également été visibles chez l'être humain, la domestication des végétaux ayant pris une place majeure dans l'histoire de l'humanité.

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

1 QCM Vérification de connaissances

5 min

Corrigé
p. 270

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1 Lors de la domestication, les plantes :
 - a sont toujours capables de se multiplier sans aucune action de l'être humain ;
 - b ne subissent des pressions de sélection que de leur environnement abiotique, c'est-à-dire des conditions de pressions, de température, d'ensoleillement etc. ;
 - c peuvent toujours se reproduire avec les espèces sauvages et conduire à une descendance fertile ;
 - d présentent peu à peu une certaine homogénéisation génétique.
- 2 *Agrobacterium tumefaciens* :
 - a est le champignon responsable de la crise de la pomme de terre en Irlande ;
 - b est un virus qui insère son génome dans le génome des plantes, présentant un risque pour les cultures ;
 - c est une bactérie utilisée aujourd'hui pour modifier le génome de plantes en y insérant un plasmide ;
 - d est une bactérie permettant la régénération des plantes à partir d'un massif de cellules ;
 - e infecte des cellules végétales et conduit à leur mort.

2 Vérification des connaissances

★

5 min

Corrigé
p. 270

Qui suis-je ?

- 1 Conséquence de la domestication, qui entraîne le fait que des caractères sont présents chez la plupart des espèces domestiquées, mais absentes chez les espèces sauvages.
- 2 Sous-groupe de plantes appartenant à une même espèce qui présentent les mêmes caractéristiques majeures (concernant le goût de fruits, la taille, la couleur, etc.).
- 3 Mode de sélection empirique visant à sélectionner les graines pour les futurs semis en fonction de caractéristiques avantageuses pour la culture.

3 Nouvelles variétés

★★

10 min

Corrigé
p. 270

Lycée Richelieu, Rueil Malmaison

Les blés cultivés (blé dur et blé tendre) ont des caractéristiques communes avec des espèces sauvages comme l'amidonnier sauvage et l'engrain sauvage. Le blé dur est utilisé pour faire de la semoule et des pâtes et le blé tendre pour faire de la farine.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Document A : comparaison des blés cultivés et d'espèces sauvages morphologiquement proches

Les fleurs de ces végétaux sont regroupées par trois et rassemblées dans des épis; chaque fleur ne donne qu'un seul grain; le grain est entouré par des glumelles qui tombent soit spontanément (grain nu), soit lors du battage des épis (grain vêtu).

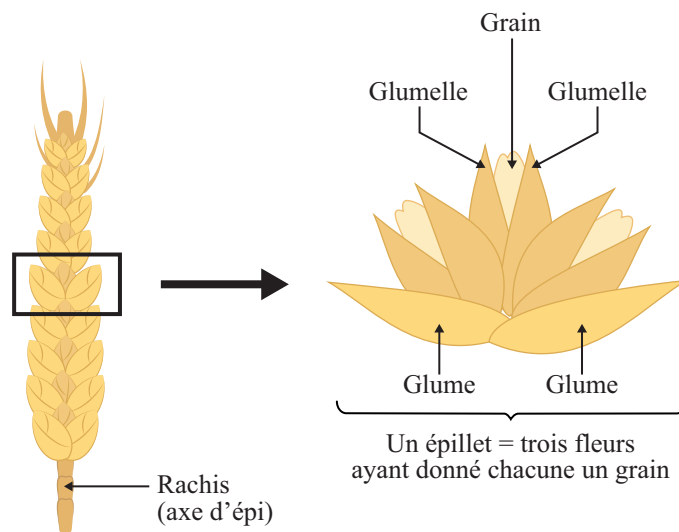


Figure 8.3 – Organisation d'un épi de blé

Caractère	Engrain et amidonnier (sauvages)	Blé dur et Blé tendre (cultivés)
Solidité de l'épi	Rachis très fragile → dissémination des graines facilitées	Rachis solide → récolte facilitée
Forme des graines à maturité	Vêtus → les glumelles protègent le grain	Nus → séparation grains/glumelles et formation de farine facilitée
Maturation des grains des différents individus	Étalée dans le temps → probabilité augmentée de rencontrer des conditions favorables pour la maturation	Synchrone → récolte facilitée

Tableau 8.1 – Caractéristiques du blé et de deux espèces sauvages proches morphologiquement du blé

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

Document B

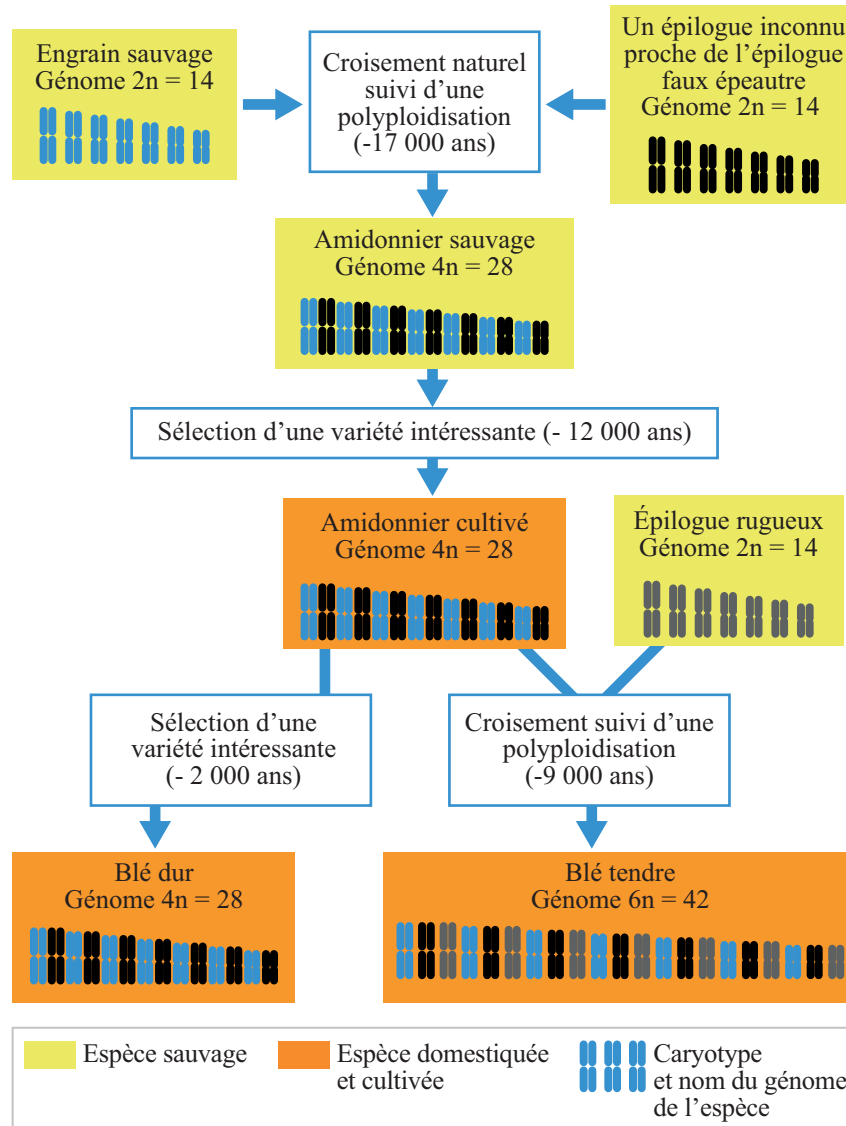


Figure 8.4 – Organisation d'un épi de blé

On cherche à comprendre comment l'être humain a créé des espèces végétales intéressantes pour ses besoins.

Choisissez les réponses exactes pour chaque série de propositions faites page suivante et placez de manière visible sur le document B les interventions de l'être humain.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

1/ La récolte des grains est facilitée par : a) un rachis fragile b) des grains groupés en un épi c) une maturité synchrone des grains d) des glumes se séparant du grain	2/ Le Blé dur : a) est une variété de la même espèce que le Blé tendre b) possède 7 chromosomes c) a été créé à partir de l'Eglope rugueux d) possède 14 paires de chromosomes
3/ L'amidonnier sauvage : a) est de la même espèce que l'amidonnier cultivé b) a été obtenu par un croisement effectué par l'Homme c) est une espèce ancestrale du Blé dur et du Blé tendre	4/ L'obtention des deux blés : a) est l'œuvre intégrale de l'Homme b) a nécessité le recours aux biotechnologies c) a suivi les mêmes étapes d) est ancienne à l'échelle de l'Homme

4 Transgénèse



20 min

Corrigé
p. 271

Lycée Guynemer, Compiègne

Agrobacterium tumefaciens est une bactérie qui se développe dans le sol. Elle constitue aujourd'hui un matériel de choix dans la réalisation des transgénèses végétales.

À partir des informations des documents et de vos connaissances, dégagez les arguments permettant de justifier que cette bactérie effectue une transgénèse naturelle. Présentez ensuite les principales étapes permettant d'obtenir un organisme génétiquement modifié, intéressant en agronomie, à l'aide de cette bactérie.

Document A

Agrobacterium tumefaciens infecte naturellement les végétaux supérieurs présentant des blessures à la base de la tige. En réaction à cette infection, les cellules du végétal se multiplient et forment une tumeur qui libère dans le milieu des opines (deux acides aminés couplés). Les bactéries présentes dans le sol près de la tumeur sont alors capables d'utiliser ces opines comme source d'azote, mais aussi de carbone et d'énergie.

La réaction du végétal est due au transfert d'un petit ADN, l'ADN-T, depuis la bactérie jusque dans le génome des cellules de la plante par l'intermédiaire d'un plasmide appelé plasmide Ti.

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

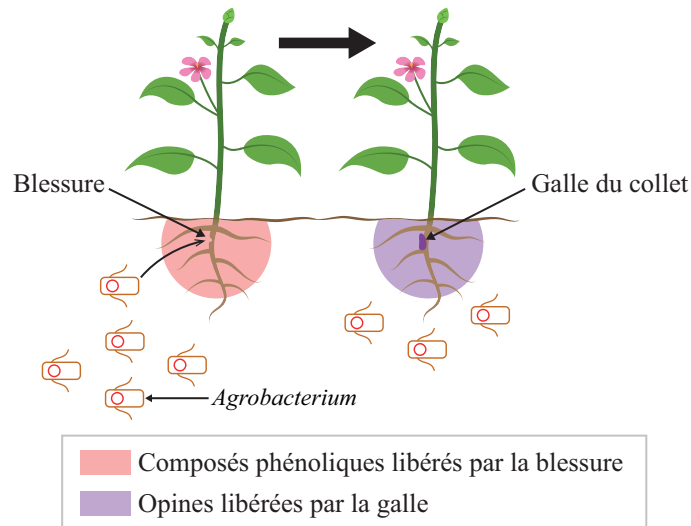


Figure 8.5 – Transfert d'un fragment d'ADN d'*Agrobacterium tumefaciens* dans le génome d'une plante supérieure par l'intermédiaire du plasmide Ti (les échelles ne sont pas respectées)

Document B

Le plasmide Ti est un petit plasmide de 215 milliers de paires de bases.

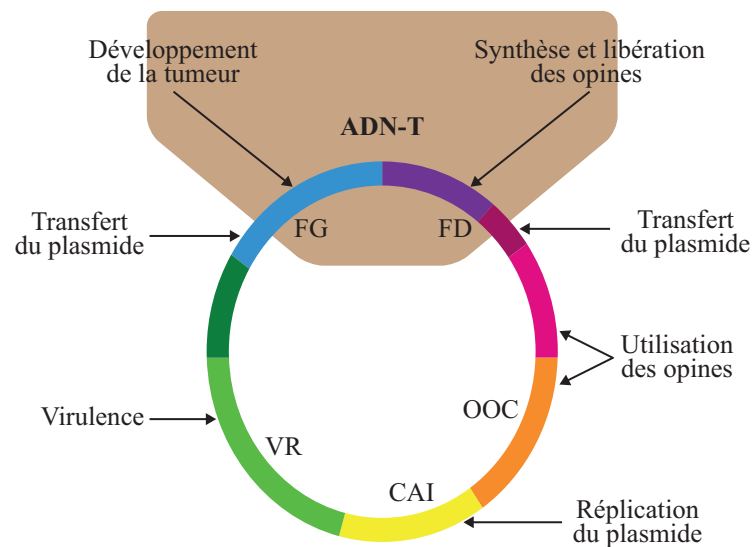


Figure 8.6 – Les régions du plasmide responsables de ses propriétés

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Document C

Le schéma ci-dessous donne quelques étapes d'une transgénèse réalisée à partir du plasmide Ti et de plants de colza. L'ADN-T du plasmide Ti a été remplacé par un ADN comportant deux gènes essentiels :

- un gène permettant l'amélioration de la composition en acides gras des graines de colza ;
- un gène de résistance à un antibiotique.

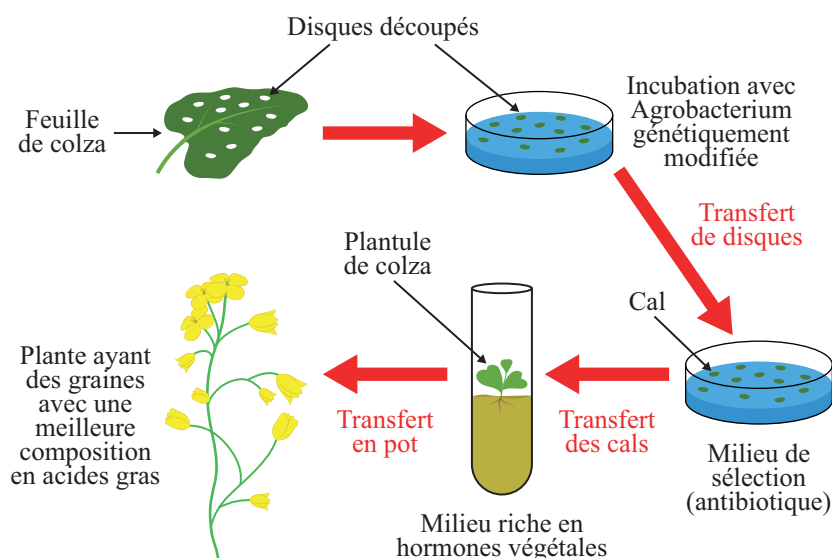


Figure 8.7 – Étapes d'une transgénèse

5 Domestication et immunité

Nouveau programme



20 min

Corrigé
p. 272

La Cavendish est la variété de bananes (aussi appelé cultivar) la plus vendue dans le monde. Toutefois, cette culture est menacée aujourd'hui en raison d'une maladie causée par un champignon, le *Fusarium oxysporum*. À partir du document et de vos connaissances, proposez une hypothèse concernant les désastres causés par cette maladie, et les possibilités existantes pour les réduire.

« En 2016, la Cavendish représentait 95% des exportations mondiales de bananes, selon des chiffres de la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture). Or cette variété est depuis vingt ans menacée par un champignon, le *Fusarium oxysporum*, responsable de la maladie de Panama ou fusariose. Une fois atteint, le bananier est détruit de l'intérieur et son système vasculaire dysfonctionne. Ses feuilles jaunissent progressivement avant que la plante ne se dessèche complètement. La chair blanc crème

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

des fruits se transforme en bouillie fétide. Le champignon responsable résiste aux fongicides et est presque impossible à éradiquer. La seule solution pour éviter la contamination est d'abandonner la plantation, une fois les végétaux infectés. Le champignon vit dans la terre et peut y demeurer plusieurs années. Devant cette situation critique, de nombreux observateurs et certaines publications ont conclu à une disparition programmée du fruit(...)

Plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre (...). Un premier volet met à contribution la génétique et la sélection des plantes. Des chercheurs estiment qu'une réponse durable ne comprend plus le développement d'un clone unique, mais un éventail de cultivars génétiquement différents. La faible fertilité des bananes comestibles rend difficile la découverte d'un hybride. A l'état sauvage, les espèces de bananes abondent, mais nombre sont vulnérables à la souche infectieuse et ne seraient pas cultivables à une grande échelle. Il est aussi possible de sélectionner et d'améliorer les variétés, comme en isolant les gènes résistants aux maladies chez les bananes. Cette recherche a pu être réalisée lorsque les génomes de la banane et des champignons ont été séquencés en 2012 et 2014 respectivement. »

Source : Le Temps Environnement, Septembre 2017

6 Conséquences de la domestication



20 min

Corrigé
p. 273

Nouveau programme

Les oméga-6 sont des molécules lipidiques énergétiques nécessaires à l'être humain. Par exemple les muscles, le cerveau et le foie ont besoin d'acide arachidonique (un type d'oméga-6) pour fonctionner.

L'acide arachidonique ne peut pas être synthétisé par l'être humain : il peut en absorber en consommant de la chair animale. L'être humain peut également en synthétiser à partir d'acide linoléique, un précurseur de l'acide arachidonique présent chez les plantes comme le colza.

Document A

La voie de synthèse de l'acide arachidonique à partir d'acide linoléique est représentée.

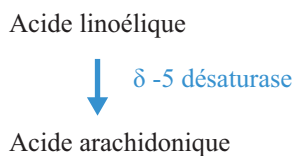


Figure 8.8 – Voie de synthèse partielle de l'acide arachidonique

Document B

La δ -5 désaturase est présente chez l'être humain sous deux allèles : l'allèle D et l'allèle A. L'allèle D confère à cette enzyme une activité supérieure à l'allèle A.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Les fréquences alléliques de la δ -5 désaturase ont été quantifiées pour des populations native d'Amérique et Européenne.

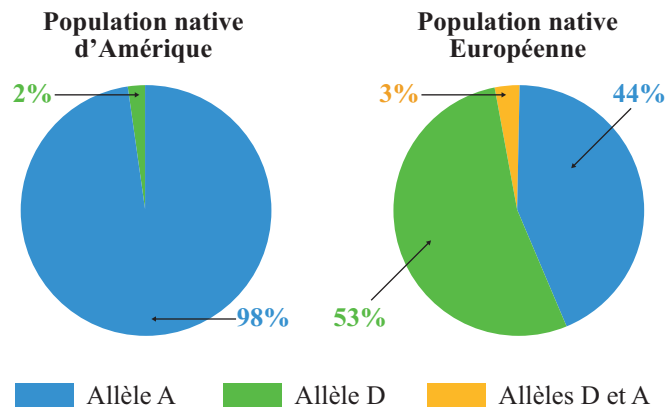


Figure 8.9 – Fréquences alléliques de la δ -5 désaturase pour des population native d'Amérique, et Européenne

Les populations natives d'Amérique sont reconnues comme ayant une alimentation riche en oméga-6.

À partir de l'étude de ces documents et de vos connaissances, expliquez en quoi le type d'alimentation peut entraîner une pression de sélection suffisante pour favoriser les différents allèles de la δ -5 désaturase.

7 Domestication et immunité



25 min

Corrigé
p. 273

Lycée Charlemagne, Paris

La domestication des plantes sauvages par l'être humain a pour effet de sélectionner certains caractères utiles à l'être humain. Cette sélection et la protection des plantes domestiquées entraînent une modification des modes de défense naturels chez ces plantes.

Document A

Les plantes de la famille des Brassicacées (chou, moutarde, radis, colza ...) contiennent naturellement des substances appelées glucosinates. Sous l'effet d'une enzyme produite par la plante et libérée lors de la destruction des cellules, ces glucosinates sont convertis en thiocyanates qui donnent aux Brassicacées leur saveur amère et piquante.

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

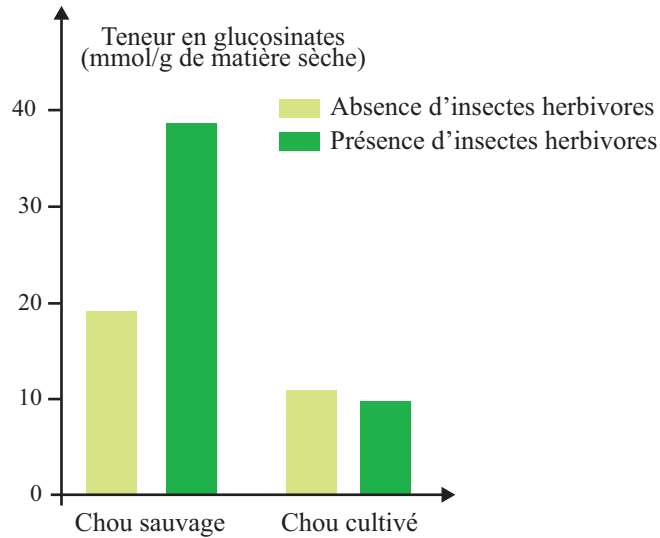


Figure 8.10 – Teneur moyenne en glucosinates d'un chou sauvage et d'un chou cultivé en présence ou en absence d'insectes herbivores

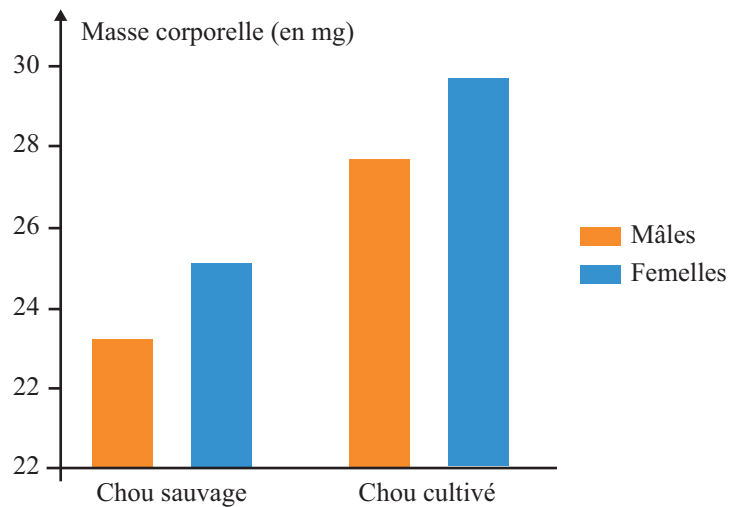


Figure 8.11 – Document B : effets de la consommation des feuilles de chou sauvage ou cultivé sur la masse corporelle des chenilles d'un papillon, la Piéride.

Document C

C'est dans les graines que la teneur en glucosinates est la plus élevée. On a relevé les effets de la consommation de graines sur différents animaux. Les résultats sont présentés ci-dessous.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Espèce	Effets observés
Vache	Avortements, ralentissement de croissance
Porc	Avortements, mort si forte consommation
Cheval	Peu d'effets
Volaille	Diminution de la ponte, forte mortalité
Humain	Dérèglements de la thyroïde

Document D

Des travaux visant à modifier les qualités nutritionnelles de variétés de colza ont été réalisés.

	Variétés de colza initiales		(2)	
	Nom	(1)	Nom	(1)
Variété canadienne	Torch	93	Canola	28
Variétés européennes	Midas	154	Régent	26
Variétés européennes	Jet neuf	169	Darmor	41

(1) Teneur en glucosinates (en $\mu\text{mol/g}$) de matière sèche

(2) Nouvelles variétés de colza après amélioration génétique par croisement

Tableau 8.2 – Comparaison de la teneur moyenne en glucosinates chez différentes variétés de colza

À l'aide de l'étude des documents et de vos connaissances, montrez que la sélection exercée par l'être humain sur les plantes cultivées de la famille des Brassicacées contribue à diminuer l'aptitude de ces plantes à la vie dans les écosystèmes naturels.

8 Nouvelles variétés - Croisement



25 min

Corrigé
p. 274

Lycée Sophie Germain, Paris

Au début du XX^{ème} siècle, à Oran, on remarque dans une pépinière où avaient été semés des mandariniers, des pieds différents du mandarinier. Les fruits obtenus ont la taille d'une mandarine, mais ils sont sucrés. La nouvelle variété de fruit est appelée clémentine, en l'honneur du père Clément, directeur des cultures, qui avait fait les semis. L'origine de cette nouvelle variété d'arbre fruitier n'est pas facile à déterminer avec certitude car les arbres qui produisent des agrumes (citronniers, orangers, pamplemoussier, mandariniers,...) s'hybrident facilement et les croisements naturels sont nombreux.

Par une utilisation rigoureuse du document A et de vos connaissances, indiquez les génotypes des arbres producteurs de clémentines et interprétez les observations historiques présentées par les documents B et C.

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

Document A

Une première hybridation (croisement 1) entre des orangers à fruits amers (bigaradiers) et des mandariniers à fruits doux donne des orangers à fruits sucrés. On considérera que les lignées croisées sont homozygotes.

Le croisement des orangers à fruits sucrés obtenus précédemment avec des mandariniers à fruits doux (croisement 2) donne en proportions identiques les 4 phénotypes suivants dans des proportions identiques :

- orangers à fruits sucrés ;
- orangers à fruits doux ;
- mandariniers à fruits sucrés, appelés clémentines ;
- mandariniers à fruits doux.

Document B : extrait d'un compte-rendu de l'Académie des Sciences de 1909

De nos observations, il semble possible de tirer les conclusions suivantes :

- le bigaradier est capable de s'hybrider avec le mandarinier ;
- de cette hybridation, il résulte un certain nombre de variétés ayant des caractères mixtes entre le bigaradier et le mandarinier, comme le clémentinier.

Document C : extrait d'un Bulletin d'information agricole de 1926

« Dès mes premières observations, j'avais constaté que le clémentinier devait être d'origine hybride et ses caractères indiquaient comme père le bigaradier à feuilles de saules, introduit d'Espagne, et vivant au voisinage des mandariniers.

Les semis de graines de clémentiniers ayant reproduit, à la station botanique, un certain nombre de bigaradiers, le doute n'existe plus.

Comme la mandarine, la clémentine a des fruits de grosseur assez inégale. Le grand avantage de la clémentine est d'être plus précoce que la mandarine. De novembre à fin décembre, on peut cueillir des fruits très doux et préférés à la mandarine qui est encore acide. »



Conséquences de la domestication



30 min

Corrigé
p. 275

Nouveau programme

La domestication a entraîné des modifications du régime alimentaire des êtres humains. L'amidon, présent dans les céréales, par exemple, fut davantage consommé. Lors de la digestion, l'amidon est dégradé par une enzyme, l'amylase.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

L'être humain produit deux types d'amylases : l'amylase pancréatique, et l'amylase salivaire. Suite à des duplications, le gène codant l'amylase salivaire appelé AMY1, est présent sous de nombreuses copies en proportions variables dans la population.

À partir de l'exploitation des documents et de vos connaissances, établissez un lien entre le nombre de copies du gène AMY1 et la domestication des plantes.

Document A

Le nombre de copies du gène AMY1 a été quantifié chez des individus, en même temps que la masse d'amylase présente dans leur salive.

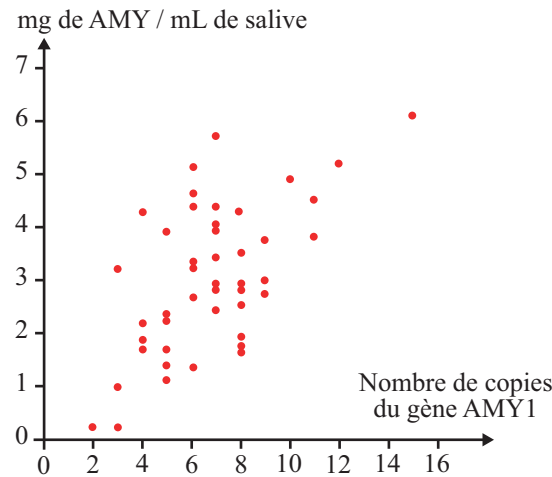


Figure 8.12 – Nombre de copies du gène AMY1 et masse d'AMY1 dans la salive d'individus

Document B

Des individus à haut nombre de copies (entre 4 et 11 copies) et à faible nombre de copies (entre 2 et 4) ont ingéré 50g d'amidon. Leur taux de glucose sanguin est suivi pendant deux heures.

Voir schéma page suivante.

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

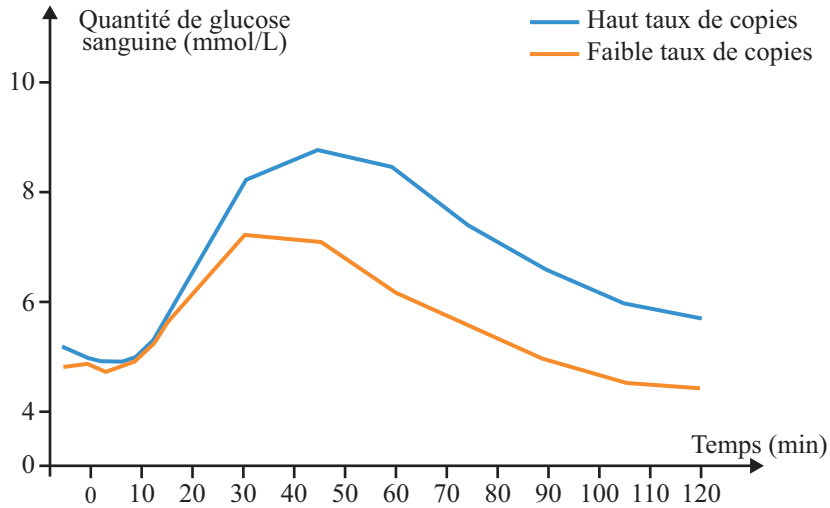


Figure 8.13 – Taux de glucose sanguin chez des individus à faible et à haut nombres de copies du gène *AMY1* après ingestion de 50 g d'amidon

Document C

Des chercheurs ont quantifié le nombre de copies du gène *AMY1* dans deux groupes :

- le premier groupe comporte trois populations consommant traditionnellement de l'amidon : des Japonais, des Européens et des Hazda (population Tanzanienne se nourrissant de tubercules riches en amidon) ;
- le second groupe comprend des populations à faible consommation d'amidon : les Biaka et les Mbuti (populations Africaines de chasseurs-cueilleurs) et une population Asiatique, les Yakut.

Les chercheurs ont pu remarquer que 70% des individus testés dans le premier groupe possèdent 6 copies ou plus du gène *AMY1*, alors que dans le deuxième groupe, 70% des personnes ont moins de 6 copies.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Vérification de connaissances

Énoncé
p. 257

- 1 Réponse **d**.
- 2 Réponse **c**.

2 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 257

- 1 Le syndrome de domestication
- 2 Une variété
- 3 La sélection massale

3 Nouvelles variétés

Énoncé
p. 257

Lycée Richelieu, Rueil Malmaison

⚠ ATTENTION

Attention au questionnaire à choix multiples : il faut commencer par une analyse fine des documents avant de tenter de répondre aux questions.

- 1 Réponses **b** et **c**. Selon le tableau, un rachis fragile est associé à une dissémination des grains facilitée, ce qui ne serait pas intéressant pour la récolte. De plus, les glumelles, et pas les glumes, se séparent du grain.
- 2 Réponse **d**. Les deux Blés n'appartiennent pas à la même variété. Le Blé dur possède $4n = 28$, soit 7 paires de chromosomes en 4 exemplaires. Enfin, l'épiglope rugueux a participé à la création du Blé tendre, et non du Blé dur.
- 3 Réponses **a** et **c**. L'amidonnier sauvage a participé à la création des deux Blés selon le document B. De plus, il présente le même nombre de chromosomes que l'amidonnier cultivé, donc il est issu. Il appartient donc à la même espèce.
- 4 Réponse **d**. Ces processus ont eu lieu il y a 12 000 ans, aucun recours aux biotechnologies n'était donc possible. L'être humain n'est pas l'unique acteur ici (des croisements naturels et de la sélection naturelle ont également eu lieu).

Les interventions de l'être humain correspondent aux étapes de sélection des variétés intéressantes, ainsi que lors des croisements non spontanés.

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

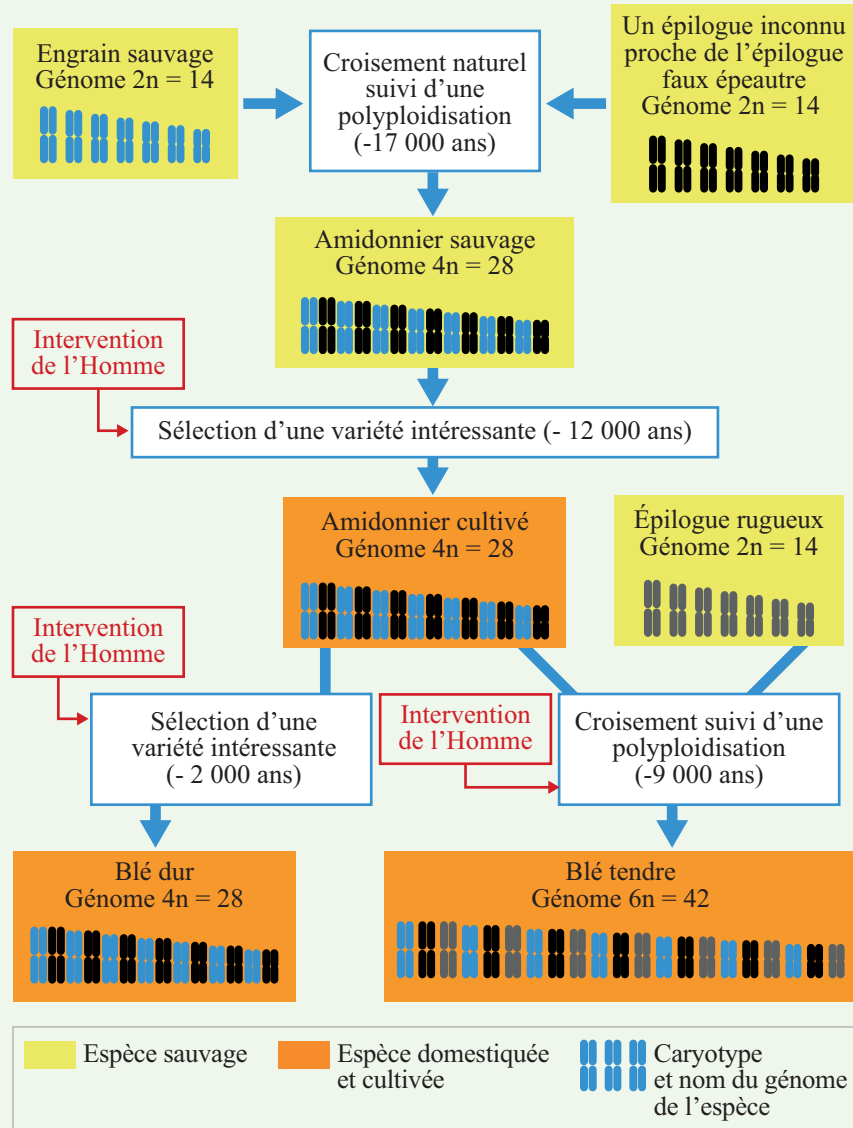


Figure 8.14 – Scénario de l'origine des blés cultivés en prenant en compte l'action de l'être humain

4 Transgénèse

Lycée Guynemer, Compiègne

Énoncé
p. 260

Agrobacterium tumefaciens est une bactérie du sol. Le document A montre que lors d'une blessure au niveau des racines, une plante libère des composés phénoliques. Une infection par *Agrobacterium tumefaciens* peut alors avoir

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

lieu. L'infection conduit à une multiplication de cellules végétales aboutissant à la formation d'une galle du collet. Ces cellules libèrent alors des opines, source d'azote de carbone et d'énergie pour d'autres *Agrobacterium tumefaciens*. Les fonctions des cellules végétales sont donc modifiées lors d'une infection par *Agrobacterium tumefaciens*.

Ces modifications sont causées par l'insertion d'un plasmide, l'ADN Ti, dans le génome de la plante. L'organisation du plasmide est présentée dans le document B. Des séquences permettant le transfert du plasmide ainsi que sa réplication y sont présentes. De plus, des séquences à l'origine des modifications fonctionnelles sont également visibles (synthèse et libération des opines, et développement de la tumeur).

Ainsi, l'infection par *Agrobacterium tumefaciens* conduit effectivement à une transgénèse naturelle.

Le document C nous présente un protocole au cours duquel des disques de feuilles de colza sont incubées avec *Agrobacterium tumefaciens* génétiquement modifiée. Après une étape de sélection, les massifs cellulaires (cals) sont mis en culture sur un milieu riche en hormones végétales, permettant la formation d'une plante. Cette plante possédant des graines dont la composition est modifiée, on peut donc supposer que les bactéries étaient modifiées pour posséder un gène permettant une meilleure synthèse d'acides gras.

En laboratoire, il est donc possible de détourner le mécanisme d'infection par *Agrobacterium tumefaciens*, afin de modifier le génome de plantes pour qu'elles présentent des avantages pour leur culture.

5 Domestication et immunité

→ Énoncé
p. 262

Nouveau programme

La culture de bananes Cavendish est aujourd'hui menacée par la fusariose. Cette maladie est causée par *Fusarium oxysporum*, un champignon. Une fois infecté, un pied de banane peut transmettre la maladie à l'ensemble de la plantation, qui est alors condamnée. La variété Cavendish représente 95% des exportations mondiales de bananes. Ceci suggère une très faible diversité génétique dans les cultures de bananes et explique la transmission rapide de la maladie.

Pour limiter la propagation de la fusariose, rétablir une certaine diversité génétique dans les cultures pourrait être une approche.

Une première possibilité pourrait être la création d'hybrides de plants de Cavendish avec des plants sauvages. Des limites existent toutefois : les Cavendish sont très peu fertiles, et la plupart des espèces sauvages sont sensibles à la fusariose, ou peu cultivables.

Une autre possibilité pourrait être le recours aux biotechnologies. Un gène de résistance à la maladie pourrait être transféré au génome de plants de Cavendish, ce qui, à terme, pourrait permettre d'assurer des cultures de bananes résistantes à la fusariose.

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

6 Conséquences de la domestication

Énoncé
p. 263

Nouveau programme

On souhaite déterminer en quoi le type d'alimentation peut exercer une pression de sélection sur les fréquences alléliques de la δ -5 désaturase.

Selon le document A, cette enzyme est responsable de la synthèse d'acide arachidonique, molécule nécessaire pour divers organes. La réaction nécessite de l'acide linoléique qui est présent chez les plantes comme le colza. Toutefois, l'acide arachidonique peut également être absorbé en se nourrissant de chair animale.

La δ -5 désaturase est présente sous deux allèles : l'allèle D, associée à une activité maximale de l'enzyme, et l'allèle A, avec une activité réduite. Le document B nous montre que les Européens possèdent à plus de 50 % l'allèle D, alors que la grande majorité des natifs d'Amérique ont l'allèle A.

Les natifs d'Amérique possédant une alimentation plus riche en oméga-6 et donc en acide arachidonique, on peut émettre l'hypothèse que la voie de synthèse de cette molécule à partir d'acide linoléique est moins primordiale que chez les Européens.

Ainsi, la domestication, en favorisant l'alimentation à base de végétaux, a réduit chez l'être humain l'absorption d'acide arachidonique en faveur de l'acide linoléique. Ce changement d'alimentation a probablement été à l'origine d'une nouvelle pression de sélection : les individus possédant l'allèle D ont davantage été sélectionnés, permettant une synthèse efficace d'acide arachidonique à partir d'acide linoléique.

7 Domestication et immunité

Énoncé
p. 264

Lycée Charlemagne, Paris

MÉTHODE

L'étude d'un corpus de documents ne doit pas nécessairement être réalisée dans l'ordre des documents. Vous pouvez structurer votre propos en utilisant les documents dans le désordre.

On souhaite comprendre l'influence qu'a eue la sélection exercée par l'être humain sur les capacités de survie de Brassicacées dans les écosystèmes naturels.

Le document A nous présente les teneurs en glucosinates d'un chou sauvage et d'un chou cultivé, en présence ou en absence d'insectes herbivores. Les glucosinates sont des molécules qui donnent aux Brassicacées leur goût amer et piquant. On remarque que chez le chou sauvage, la présence d'insectes herbivores est associée à une forte augmentation du taux de glucosinates (40 mmol/g de matière sèche contre 20 sans insectes). On peut donc émettre l'hypothèse que la synthèse de cette molécule est faite en réponse à

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

la présence d'insectes, permettant aux choux de se défendre et de limiter leur consommation. Le chou cultivé, quant à lui, présente environ la même teneur de glucosinates (12 mmol/g de matière sèche) en présence et en absence d'insectes herbivores. On peut donc suggérer que la domestication a induit une diminution de la synthèse de glucosinates, et une incapacité à répondre à la présence d'insectes.

De plus, d'après le document D, les variétés de colza sauvages possèdent des teneurs bien supérieures aux nouvelles variétés domestiquées (une centaine de $\mu\text{mol/g}$ de matière sèche pour les variétés sauvages, contre une trentaine chez les variétés domestiquées). On en déduit donc que la domestication est associée à une diminution de la synthèse de glucosinates, aussi bien chez le chou que chez le colza. Au cours de la domestication des Brassicacées, l'être humain a probablement sélectionné les plants ayant un goût plus agréable et moins amer. Ceci aurait ainsi conduit à cette plus faible synthèse de glucosinates chez les variétés domestiquées.

Selon le document B, des chenilles mises en présence de chou sauvage subissent une augmentation de masse corporelle moindre comparée à des chenilles en présence de chou cultivé (en moyenne 24 mg contre 28 mg). Le chou cultivé est donc davantage consommé par les chenilles, probablement en raison de la plus faible synthèse de glucosinates.

Enfin, d'après le document C, la consommation de graines ayant une forte teneur en glucosinates induit chez tous les animaux à l'exception du cheval, des effets indésirables importants (avortement, mort, diminution de la ponte pour la volaille, et dérèglements de la thyroïde pour l'être humain). Ceci confirme donc que les glucosinates sont des molécules de défense contre les herbivores.

Ainsi, les Brassicacées sauvages synthétisent des glucosinates, à l'origine de leur goût amer et piquant. Lors de leur domestication, l'être humain a probablement sélectionné les Brassicacées ayant un goût plus agréable, ce qui a conduit à une diminution de la synthèse de ces molécules par les Brassicacées domestiquées. Cependant, les glucosinates sont des molécules de défense, leur permettant de lutter contre les herbivores. Ceci laisse donc suggérer que les variétés domestiquées sont moins capables de se défendre contre des herbivores et donc moins aptes à survivre dans les écosystèmes naturels.

8

Nouvelles variétés - Croisement

Lycée Sophie Germain, Paris

Énoncé
p. 266

On souhaite dans un premier temps déterminer les génotypes des arbres producteurs de clémentines.

Selon le document A, deux caractères sont à étudier ici : la taille du fruit (orange ou mandarine), et le goût (amer, doux ou sucré). Nous pouvons émettre l'hypothèse que ces caractères sont déterminés génétiquement. Soient l'allèle G associé à la grosse taille, g, à la petite taille, A l'allèle responsable du goût

LA DOMESTICATION DES PLANTES • CHAP. 8

amer, et a, au goût doux.

Un premier croisement est réalisé entre des orangers à fruits amers (bigaradiers) et des mandariniers à fruits doux. On considère ces plantes comme étant homozygotes. On a donc le croisement :

$$\text{Orangers à fruits amers } \left(\frac{GA}{GA} \right) \times \text{Mandariniers à fruits doux } \left(\frac{ga}{ga} \right)$$

Qui donne 100% d'orangers à fruits sucrés, de génotype $\left(\frac{GA}{ga} \right)$.

On peut donc en déduire que l'allèle G est dominant, car il s'exprime à l'état homozygote. De plus, l'apparition d'un nouveau phénotype sucré laisse suggérer que les deux allèles A et a sont codominants.

Émettons l'hypothèse que ces deux gènes soient non liés (indépendants). Le deuxième croisement d'orangers à fruits sucrés $\left(\frac{GA}{ga} \right)$ avec des mandariniers à fruits doux $\left(\frac{g}{g} \frac{a}{a} \right)$ donne en théorie le tableau de croisement suivant (les phénotypes sont directement indiqués).

	(g, a)
(G, A)	Orangers à fruits sucrés
(G, a)	Orangers à fruits doux
(g, A)	Mandariniers à fruits sucrés = Clémentiniers
(g, a)	Mandariniers à fruits doux

Les proportions sont les mêmes que celles de l'énoncé, les deux gènes sont donc effectivement indépendants. De plus, les clémentiniers, produites par des mandariniers à fruits sucrés, sont donc de génotype $\left(\frac{g}{g} \frac{A}{a} \right)$.

Ces données expliquent donc les informations comprises dans les documents B et C : le bigaradier et le mandarinier sont capables de s'hybrider et selon les allèles (dominants, codominants ou récessifs), les fruits seront plus ou moins gros, et plus ou moins sucrés.

9 Conséquences de la domestication

Nouveau programme

Énoncé
p. 267

L'être humain possède un nombre variable de copies du gène AMY1. Ce gène code l'expression de l'amylase, enzyme responsable de la dégradation de l'amidon. Le but de cet ensemble documentaire est d'en donner une explication, en lien avec la domestication des plantes.

Le document A présente le nombre de copies du gène AMY1 en fonction de la masse d'amylase salivaire chez des individus. Tout d'abord, ce docu-

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

ment permet de vérifier que les personnes possèdent des nombres variables de copies du gène (entre 2 et 15 copies, avec une majorité autour de 8 copies). Une corrélation entre ce nombre de copies et la masse d'amylase est visible, ce qui suggère que présenter plus de copies du gène permettrait une synthèse augmentée d'amylase salivaire.

Lors de l'expérience du document B, des personnes à haut et à faible nombre de copies du gène AMY1 ont ingéré 50g d'amidon. La glycémie (taux de glucose sanguin) a été suivie pendant deux heures. Dans les deux cas, l'ingestion d'amidon a conduit à une augmentation de la glycémie jusqu'à 40 minutes, avant de diminuer. Toutefois, les individus à haut nombre de copies présentent une augmentation de la glycémie plus importante (jusqu'à 9 mmol/L) que les individus à faible nombre de copies du gène (7mmol/L). Cela laisse suggérer qu'un nombre important de copies du gène de l'amylase permet une quantité augmentée d'amylase salivaire, et donc une absorption de glucose augmentée.

Enfin, dans le document C, le nombre de copies du gène AMY1 a été calculé chez des populations se nourrissant traditionnellement d'amidon, ou non. Dans le premier cas, le nombre de copies est bien plus important que dans le deuxième (70% d'individus avec 6 copies ou plus, contre le même pourcentage avec moins de 6 copies).

En conclusion de ces trois documents, un grand nombre de copies du gène AMY1 est associé à une synthèse augmentée d'amylase salivaire, et à une absorption importante de glucose après ingestion d'amidon. Suite à la domestication des plantes, les individus possédant un plus grand nombre de copies d'AMY1 ont donc probablement été davantage sélectionnés, étant capables d'assimiler plus de glucose. Cela explique que des populations se nourrissant traditionnellement d'amidon possèdent plus de copies que les populations ayant une alimentation différente.

Chapitre

9

Reconstituer les variations climatiques passées

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Des climats locaux au climat global
3. Les traces biologiques des climats passés
4. Les traces géologiques des climats passés
5. Les traces géochimiques des climats passés

1 Introduction

Les données acquises par le réseau mondial de stations météorologiques montrent une augmentation rapide de la température moyenne sur Terre, dépassant 1°C de réchauffement depuis l'ère pré-industrielle. Au cours de la deuxième décennie du XXI^e siècle, ce réchauffement a dépassé un seuil à partir duquel les modèles prédisent des conséquences majeures et irréversibles sur le climat, la faune et la flore.

De nombreux indices permettent d'attribuer ce réchauffement aux activités humaines. Pour autant, ce n'est pas la première fois au cours des temps géologiques que le climat varie, même en l'absence d'action humaine.

Bien connaître les caractéristiques de ces variations passées permet d'être mieux préparés à celles que nous risquons de connaître dans un futur proche.

❓ PROBLÉMATIQUE

Comment reconstituer les climats passés ?

2 Des climats locaux au climat global

2.1 Le climat caractérise les paramètres atmosphériques en un lieu sur le long terme

La météorologie consiste à décrire à chaque instant l'état des paramètres atmosphériques en un lieu : température, humidité, vent, pluviométrie, etc.

Décrire le climat en ce lieu, c'est considérer les mêmes paramètres, mais en s'intéressant au temps long : leur moyenne sur plusieurs années.

Exemples

- Les données climatiques décrivent qu'il gèle en moyenne 10 jours chaque mois de décembre à Paris, mais ne permettent en aucun cas de faire des prévisions pour décembre prochain.
- La météorologie peut prévoir avec une certaine fiabilité si les conditions sont réunies pour qu'il gèle à Paris, mais uniquement dans les prochains jours.
- Les modèles climatiques prédisent avec une certitude assez grande que ce nombre de jours de gel va globalement devenir de plus en plus faible avec le temps.

Le climat terrestre a été découpé en plusieurs grands ensembles à la surface de la Terre selon la valeur des paramètres atmosphériques. Ces grandeurs sont liées les unes aux autres et dépendent principalement de l'énergie solaire reçue, qui diminue avec la latitude. On distingue ainsi les climats équatorial, tropical, tempéré, polaire, etc.

Les mouvements des masses d'eau et des masses d'air, l'altitude ou la proximité d'un océan permettent ensuite d'affiner ce découpage.

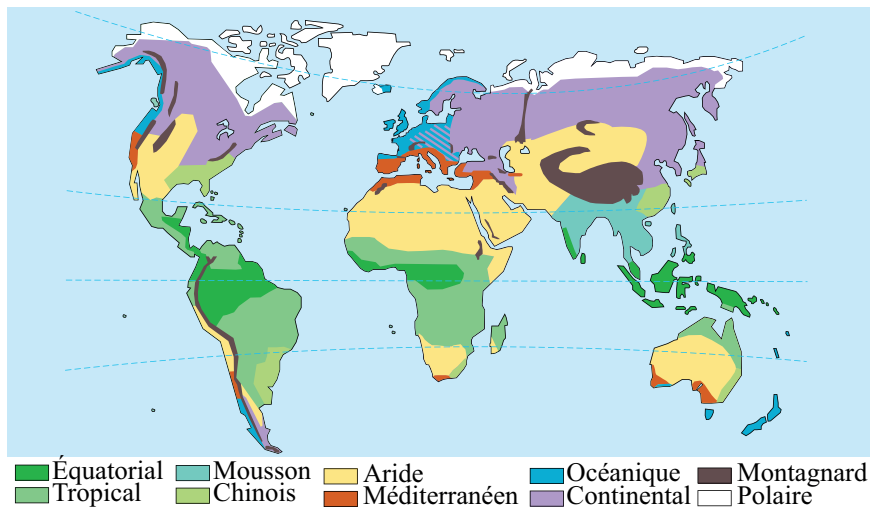


Figure 9.1 – Les grands ensembles climatiques sur Terre

Exemple : la situation géographique de la France métropolitaine lui vaut une remarquable diversité de sous-ensembles du climat tempéré : climat méditerranéen au sud avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides ; climat océanique à l'ouest avec des étés plus frais ; climat continental à l'est avec des hivers plus rudes ; climat montagnard dans les Alpes et les Pyrénées.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

⚠ ATTENTION

Dans l'expression *réchauffement climatique*, on utilise à tort le terme *climat* pour désigner la température moyenne sur Terre. Celle-ci est pourtant à bien distinguer de la notion de climat, décrit en un lieu selon les termes vus plus haut (par exemple : océanique tempéré). Nous allons cependant voir qu'un tel réchauffement a de multiples conséquences sur les climats, depuis leurs caractéristiques jusqu'à leur répartition à la surface de notre planète.

? PROBLÉMATIQUE

Le climat a-t-il toujours été le même en un lieu donné au cours des temps géologiques ?

2.2 La migration des climats au cours du temps renseigne sur les variations de température

Les différents climats terrestres se manifestent par des paysages caractéristiques : déserts, glaciers, forêts tropicales, barrières coralliennes, etc.

Pour connaître les climats passés, les paléoclimatologues recherchent des traces de ces paysages dans les archives sédimentaires, qu'elles soient géologiques ou paléontologiques. Ces informations leur permettent alors de reconstituer l'évolution de la répartition des climats à la surface de notre planète.

Définition 1 : principe d'actualisme

Hypothèse selon laquelle un processus à l'œuvre actuellement se produisait de la même manière par le passé et nécessitait exactement les mêmes conditions qu'aujourd'hui.

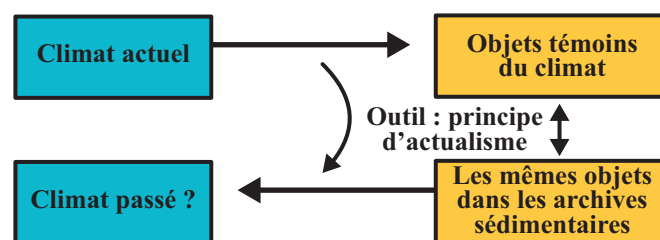


Figure 9.2 – Le principe d'actualisme, un puissant outil de reconstruction

Exemple : si l'on observe une couche de sel, on suppose qu'elle s'est formée sous un climat relativement chaud et sec, comme c'est le cas aujourd'hui.

Lorsqu'on étudie les marqueurs d'un climat passé, on calcule de combien il faudrait augmenter ou diminuer la température actuelle pour faire ces observations aujourd'hui à une même latitude. Selon le principe d'actualisme, les valeurs que l'on trouve sont une bonne estimation du climat global à l'époque considérée.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Remarque : on s'intéresse ici surtout aux températures passées car les autres paramètres (humidité, vent, précipitations, etc.) en dépendent directement et peuvent en être déduits par des calculs assez fiables.

Exemple : pour une répartition comparable des masses continentales, observer à une époque donnée des climats tempérés 100 à 150 km plus au nord qu'actuellement suggère que la température globale était de l'ordre de 1°C plus élevée.

⚠ ATTENTION

Au cours du Chapitre 5, nous avons vu combien les positions des continents sont susceptibles de varier avec le temps et envisagé des moyens de reconstituer ces positions. Il est ainsi primordial de s'assurer que les migrations latitudinales des climats ne sont pas simplement le reflet des migrations des plaques tectoniques qui les portent.

Remarque : au vu des incertitudes en jeu, il est souvent difficile de quantifier la proportion de variation dont est responsable chacun de ces paramètres.

Exemple : dans le centre et le sud de la France métropolitaine, les strates du Crétacé (il y a 145 à 66 Ma) montrent de fréquentes cuirasses latéritiques (sols rouges consolidés par les oxydes de fer), qui se forment aujourd'hui sous un climat équatorial. Bien que les reconstructions paléo-climatiques fassent état d'un climat d'une dizaine de degrés plus chaud à cette époque, une bonne partie de ces observations s'explique par le simple fait que ces terrains n'avaient pas encore migré vers leur position actuelle et se situaient alors en position équatoriale.

➡ À RETENIR

Les climats montrent des migrations apparentes à la surface des continents au cours des temps géologiques. Ces migrations sont dues à la fois à la tectonique des plaques et aux variations de la température moyenne sur Terre. Connaissant la paléogéographie des continents, retracer la migration des climats renseigne sur l'histoire des variations de température à la surface de notre planète.

❓ PROBLÉMATIQUE

Sachant qu'un climat est en partie caractérisé par la présence d'espèces vivantes spécifiques, peut-on reconstituer les températures passées à l'aide d'indices paléontologiques ?

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

3 Les traces biologiques des climats passés

3.1 Les faunes et flores migrent avec les variations du climat

Certaines espèces actuelles sont incapables de vivre dans des conditions autres que celles qui règnent aux lieux où l'on peut les rencontrer.

Définition 2 : exigence climatique

Tout être vivant peut vivre dans une gamme restreinte de conditions climatiques (température, pluviosité, etc.), qui constituent son *exigence climatique*. Associée à de nombreux autres paramètres (type de sol, existence de compétition interspécifique, etc.), les *exigences climatiques* d'une espèce permettent d'expliquer sa *répartition géographique*.

Exemple : les fougères arborescentes qu'on rencontre en forêt tropicale sont incapables de pousser sous un climat polaire ou même tempéré. De même pour de nombreux hétérothermes (qui ne sont pas capables de réguler leur température corporelle) des climats chauds (crocodiles, tortues, etc.).

Par principe d'actualisme, on fait alors l'hypothèse que les espèces fossiles qui présentent les mêmes caractéristiques vivaient sous les mêmes climats.

Il est ainsi possible de reconstituer le climat passé en un lieu sur la base de l'assemblage de fossiles qu'on y a retrouvé dans les strates géologiques.

3.2 Les grains de pollen fossiles donnent une idée précise des migrations de flores

Définition 3 : paléo-palynologie

Étude des pollens fossiles.

Toutes les espèces d'angiospermes produisent des grains de pollens particulièrement résistants à la décomposition et dont l'ornementation, spécifique de chaque espèce, permet de les identifier précisément. Connaissant les préférences climatiques des espèces actuelles et la forme des grains de pollen correspondants, le principe d'actualisme permet d'associer un climat passé à tout assemblage pollinique préservé dans l'enregistrement sédimentaire.

Définition 4 : diagramme pollinique

Ensemble de courbes, ou *spectres polliniques*, représentant l'évolution des proportions des pollens de différents groupes d'espèces végétales le long d'une carotte forée par exemple dans un lac, dans une tourbière ou dans un glacier. Si l'on a pu calculer une vitesse de dépôt ou dater certaines couches de cette carotte, un *diagramme pollinique* donne accès à l'évolution de la végétation en ce lieu au cours du temps et permet donc d'estimer les variations du climat pendant cette période.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Exemple : en climat tempéré, une prédominance de pollens d'arbres à feuilles caduques (chênes, noisetiers, etc.) est souvent interprétée comme la trace d'une période assez douce, tandis qu'une prédominance de pollens de graminées de steppe et de conifères est souvent associée à un refroidissement du climat.

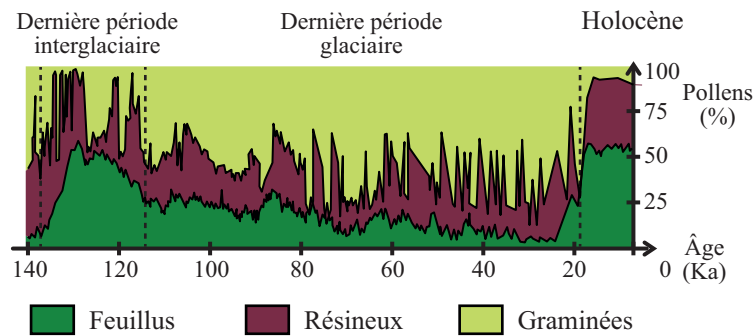


Figure 9.3 – Diagramme pollinique montrant les variations du climat au cours des 140 derniers milliers d'années

Voir exercices 6 et 9 pages 293 et 296.

➔ À RETENIR

La répartition des fossiles dans les strates géologiques autour du globe donne une bonne idée des migrations latitudinales des climats, donc de la température moyenne sur Terre dans le passé.

4 Les traces géologiques des climats passés

Les variations de températures sur Terre ont un fort impact sur les états de l'eau donc sur l'étendue des glaciers, océans, etc. Ces derniers laissent d'importantes cicatrices dans le paysage.

? PROBLÉMATIQUE

Dans quelle mesure les marqueurs d'extension des océans et des glaciers permettent-ils de reconstituer les variations du climat terrestre ?

4.1 Le réchauffement climatique fait déborder les océans

Lors des périodes chaudes, les calottes glaciaires fondent, transférant une quantité non négligeable d'eau vers les océans dont le niveau monte.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

Remarque : lors des périodes de climat plus chaud, l'eau des océans se réchauffe, donc se dilate, augmentant la hausse du niveau des océans de quelques dizaines de centimètres par degré.

La montée du niveau des océans est un phénomène de type *bombe à retardement*, répondant au réchauffement avec plusieurs dizaines, centaines à milliers d'années de retard.

Exemple : le niveau moyen des mers n'a augmenté que de 20 cm depuis l'ère pré-industrielle, malgré un réchauffement d'un peu plus de 1°C.

Les anciennes positions de la mer sont marquées dans le paysage par des incisions appelées *terrasses marines*, dont il est possible de mesurer l'âge. Si l'on connaît les variations d'altitude des côtes dues aux mouvements tectoniques, l'emplacement de ces terrasses, en renseignant sur l'altitude passée des océans, donne une idée assez précise de la température moyenne sur Terre à l'époque où elles se sont formées.

Exemple : la Grotte Cosquer, près de Marseille, comporte de nombreuses peintures rupestres datées de 27 à 19 000 ans. Aujourd'hui, son entrée est située 36 mètres sous le niveau de la mer, témoignant d'un climat nettement plus froid à cette époque. Les peintures contiennent par ailleurs la représentation d'un pingouin, caractéristique des climats froids.

► POUR ALLER PLUS LOIN

Nous avons vu au Chapitre 5 que les cycles orogéniques font alterner des périodes de collision et des périodes de fragmentation continentale caractérisées par la mise en place de nombreuses dorsales océaniques. La présence de ces chaînes volcaniques au fond des océans occupe un volume non négligeable qui les fait déborder sur les plateaux continentaux.

Le lien direct entre climat et étendue des océans, assez fiable sur le dernier million d'années, devient peu pertinent à plus grande échelle de temps du fait des variations à la fois de l'altitude des continents et de celle du fond des océans.

Exemple : au Crétacé, les océans envahissent les plateformes continentales sur plusieurs centaines à milliers de kilomètres, déposant les grandes épaisseurs de *craie* qu'on retrouve en France (en latin *creta*, d'où « Crétacé »). Cette montée remarquable du niveau des mers est le fruit conjugué de la fonte intégrale des calottes glaciaires, de la dilatation des océans et de la fragmentation de la Pangée.

↶ À RETENIR

Une partie des mécanismes à l'origine des variations du niveau de la mer dépend directement du climat. Réalisée avec prudence, l'étude des paléo-niveaux marins participe à la connaissance des climats passés.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Inversement, il s'agit aujourd'hui d'anticiper une montée du niveau des mers qui pourrait causer le déplacement de centaines de millions de personnes au XXI^{ème} siècle.

4.2 Reconstituer l'extension passée des glaciers

Les glaciers sont de grandes langues de glace qui se forment par accumulation de neige en altitude puis s'écoulent le long des pentes à des vitesses variables allant de quelques centimètres à quelques mètres par jour. En bas de pente, le glacier s'amincit en fondant jusqu'à complètement disparaître en un point appelé front du glacier. En avançant, la glace arrache et charrie des blocs de roche qu'elle dépose au front du glacier en un tas très caractéristique appelé *moraine*.

La position de ces moraines renseigne sur les variations de taille du glacier sur un temps assez court : des moraines en aval du front indiquent que celui-ci recule donc que la fonte s'accélère et/ou que les chutes de neige diminuent.

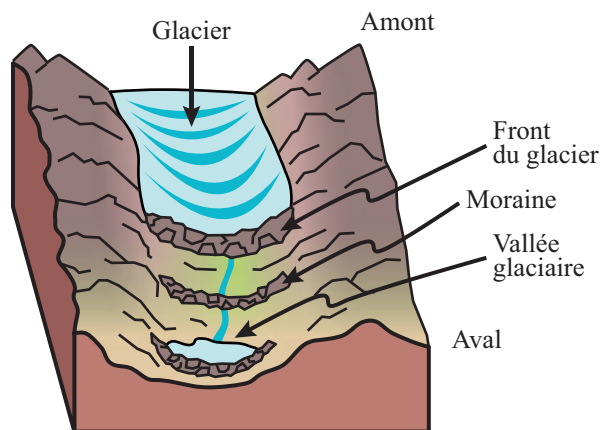


Figure 9.4 – Glacier de montagne et moraines en aval

Remarque : le front du glacier *recule* ; la glace, elle, continue d'avancer mais arrive simplement moins loin.

Exemple : dans les Alpes, les glaciers ont reculé de plus d'un kilomètre depuis le début du XX^e siècle, trahissant notamment une accélération de leur fonte due au réchauffement climatique.

Lorsqu'elles sont préservées de l'érosion, les moraines deviennent des roches très reconnaissables appelées tillites, pleines de fragments anguleux de tailles et de compositions hétéroclites. Trouver de telles roches indique que la Terre était en période de glaciation au moment où elles se sont déposées.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

Définition 5 : glaciation

Période caractérisée par la présence de calottes polaires. C'est le cas aujourd'hui : la glaciation actuelle a commencé au milieu du Cénozoïque (il y a environ 35 Ma) et semble être la cinquième que la Terre ait connue.

Définition 6 : calotte polaire

Grande étendue de glace continentale (d'eau douce) se formant généralement dans la région des pôles.

En recoupant plusieurs observations de marqueurs de la présence de glaciers à une époque donnée, on peut alors reconstituer la carte de la couverture glaciaire, qui donne une idée assez précise du climat.

Voir exercice 5 page 292.

Exemple : au Carbonifère (il y a 359 à 299 Ma), la France métropolitaine est dans une position équatoriale qui lui vaut les forêts luxuriantes dont on trouve de multiples traces sous la forme de gisements de *charbon* (« Carbonifère »). Mais les tillites datées de cette époque présentes en Antarctique, en Amérique du Sud, en Australie, en Inde et sur une partie de l'Afrique, témoignent d'une rude glaciation, de l'ordre de 3°C plus froide que le climat actuel.

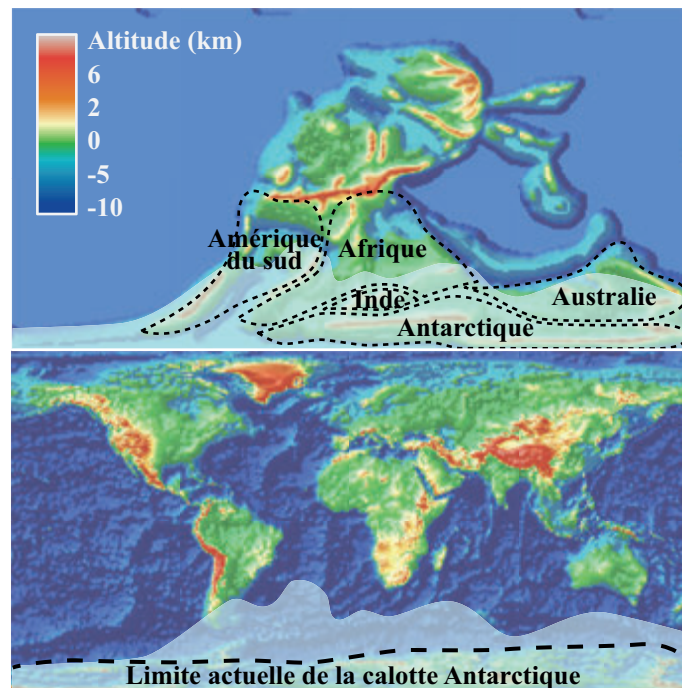


Figure 9.5 – Extension maximale des glaciers Carbonifère, reportée en haut sur la paléogéographie des continents à la limite Carbonifère-Permien (300 Ma) et en bas sur la géographie actuelle

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Pour les causes de cette glaciation, voir aussi exercice 9 page 330.

De même que les glaciers, les icebergs, en fondant, libèrent au milieu des océans des fragments de roches arrachés au continent dont ils proviennent. Plus le climat est froid, plus ces roches se retrouvent loin vers l'Équateur.

À RETENIR

Différents marqueurs géologiques (moraines, terrasses marines, lagunes...) et biologiques (pollens, charbons, coraux...) donnent accès aux climats passés en de nombreux points du globe. En recoupant ces informations avec les données tectoniques, notamment la paléogéographie des continents, les climatologues peuvent reconstituer de manière assez fiable l'histoire du climat sur Terre.

5 Les traces géochimiques des climats passés

? PROBLÉMATIQUE

Existe-t-il des enregistrements plus directs de la température sur Terre ?

5.1 Les glaces polaires archivent les températures passées

Les calottes polaires groenlandaise et antarctique sont constituées de l'accumulation de 2 à 4 kilomètres de glace qui se dépose sur le continent sous forme de neige et s'écoule vers l'océan à une vitesse de quelques centimètres à quelques mètres par jour. Or cette glace, qui peut être vieille de plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années, possède une composition isotopique caractéristique du climat au moment où elle s'est déposée.

En effet, l'oxygène présent sur Terre comporte deux principales formes isotopiques stables en proportions très inégales : ^{16}O (99.7%) et ^{18}O (0.2%). L'eau des océans est donc présente à la fois sous la forme H_2^{16}O (99.7%) et H_2^{18}O (0.2%).

Le ^{18}O étant plus lourd que le ^{16}O du fait de ses deux neutrons supplémentaires, les molécules d'eau qui le contiennent s'évaporent plus difficilement et précipitent plus facilement sous forme de pluie que les autres. Ainsi, plus il pleut, plus le nuage d'où l'eau tombe s'appauvrit en ^{18}O . Or l'eau s'évapore surtout en zone tropicale puis connaît des précipitations tout au long de son déplacement vers les zones polaires. On constate donc un appauvrissement de l'eau en ^{18}O depuis les tropiques jusqu'aux pôles.

Comme le *rapport isotopique* ($[\text{O}^{18}]/[\text{O}^{16}]$) varie peu, la comparaison des valeurs numériques est difficile. On a alors recours à la notion de *delta* : on mesure la différence entre le rapport isotopique de l'échantillon et un standard de composition connue (valeur de référence), puis on compare cette différence à la valeur du standard.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

Définition 7 : delta-O-18 ($\delta^{18}\text{O}$)

Variation de concentration en ^{18}O , exprimée en ‰ de variation de son rapport isotopique avec le ^{16}O comparée à un rapport isotopique de référence proche de la moyenne océanique :

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = \left(\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{échantillon}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{référence}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{référence}}} \right) \times 1\,000 \quad (9)$$

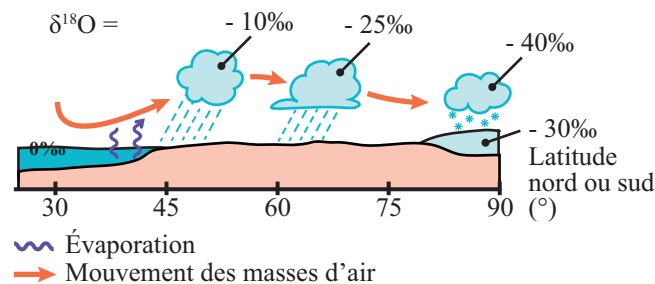


Figure 9.6 – Appauvrissement de l'eau en ^{18}O lors de sa migration vers les pôles

Plus la température est basse, moins l'atmosphère peut contenir de vapeur d'eau donc plus elle précipite facilement.

Remarque : c'est la raison pour laquelle on observe beaucoup plus facilement du brouillard l'hiver que l'été.

En période de climat froid, les nuages qui arrivent au pôle ont donc connu des précipitations plus importantes et ont ainsi subi une plus grande perte de ^{18}O , aboutissant à un $\delta^{18}\text{O}$ encore plus négatif. Sa valeur exacte dépend de la distance à la mer, de l'altitude, etc., mais en un point donné, au Groenland ou en Antarctique, on mesure bien aujourd'hui une corrélation entre le $\delta^{18}\text{O}$ de la neige et la température du lieu.

Définition 8 : thermomètre isotopique

Relation linéaire entre une diminution du $\delta^{18}\text{O}$ de la neige en un lieu et une baisse de la température en ce lieu le jour où elle tombe.

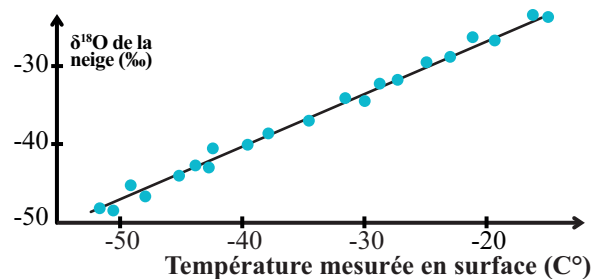


Figure 9.7 – Thermomètre isotopique à une station scientifique en Antarctique

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Les glaciologues réalisent des forages dans les calottes polaires, d'où ils extraient de longues carottes de glace. La datation d'impuretés emprisonnées à différentes profondeurs et la modélisation des vitesses de dépôt et de compaction de la glace permettent d'assigner un âge à chaque profondeur de ces carottes, atteignant plusieurs centaines de milliers d'années. On s'intéresse alors aux variations du $\delta^{18}\text{O}$ de la glace au fil du temps. Par principe d'actualisme, on utilise le thermomètre isotopique mesuré aujourd'hui pour calculer les variations de température en ce point durant la période considérée.

Remarque : les âges sont de plus en plus rapprochés en profondeur du fait de la compaction de la glace.

Sur le dernier million d'années, de telles études mettent en évidence une alternance de *périodes glaciaires* et *interglaciaires* selon un rythme d'environ 100 000 ans, la dernière période glaciaire s'étant terminée il y a 12 000 ans.

⚠ ATTENTION

Même en *période interglaciaire* depuis 12 000 ans, nous sommes actuellement en *glaciation* : il y a toujours de la glace aux pôles.

Remarque : lorsqu'elle se compacte pour former la glace polaire, la neige emprisonne de petites bulles d'air qui n'établissent plus d'échange avec l'environnement. Celles-ci peuvent ainsi être considérées comme autant de petits échantillons des atmosphères passées. Nous verrons au Chapitre 10 comment l'analyse de la composition de l'air contenu dans ces bulles peut aider à la compréhension des variations climatiques passées.

5.2 Les sédiments marins enregistrent les variations de taille des calottes polaires

La glace qui s'amoncelle au pôle est très appauvrie en ^{18}O . Celui-ci s'accumule donc dans les océans, dont l'eau en devient alors relativement enrichie. Toute période froide durant laquelle plus de glace s'accumule au pôle se manifeste ainsi par une augmentation de la concentration en ^{18}O dans l'océan.

Or les carbonates qui composent la carapace des organismes marins (CO_3^{2-}) incluent eux-même une petite fraction de ^{18}O qui dépend de sa concentration dans l'eau. À la mort de ces organismes, leur squelette peut alors sédimenter au fond des océans, formant d'importantes épaisseurs de sédiments océaniques qui enregistrent ainsi la valeur du $\delta^{18}\text{O}$ dans l'océan à ce moment là.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

POUR ALLER PLUS LOIN

On s'intéresse au $\delta^{18}\text{O}$ dans les tests (carapace des êtres vivants unicellulaires) formés par les *foraminifères* à tests carbonatés (voir figure 9.8 ci-dessous). Plus précisément, on s'intéresse uniquement aux *foraminifères benthiques*, c'est-à-dire vivant au fond des océans. En effet, la température y est toujours de l'ordre de 2°C (tant que le climat ne varie pas trop en surface), tandis que la plupart des autres tests carbonatés sont fabriqués en eau peu profonde où les températures sont très variables. Or les carbonates puisent dans l'eau une quantité de ^{18}O différente selon la température, induisant en surface une variabilité qui fausserait les mesures.

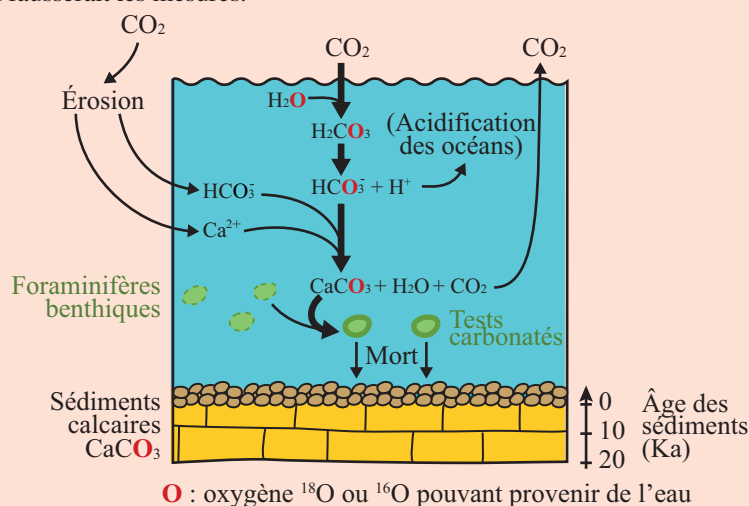


Figure 9.8 – Cycle du carbone océanique et incorporation du ^{18}O de mer dans les sédiments carbonatés

Comme dans la glace, l'emprisonnement de quelques radiochronomètres à différentes profondeurs et la modélisation des vitesses de dépôt et de compaction permettent d'assigner un âge à chaque profondeur de ces sédiments, accessibles par forages.

Pour les 800 derniers milliers d'années pour lesquels on dispose de carottes de glace, on constate ainsi qu'une basse température donnée par le thermomètre isotopique est bien corrélée avec un $\delta^{18}\text{O}$ positif dans les sédiments marins.

Remarque : le $\delta^{18}\text{O}$ des océans est généralement représenté sens positif vers le bas pour mieux figurer sa corrélation avec la température, mais ses variations sont opposées dans la glace et dans les océans.

Cette corrélation est très utile car on peut relier le $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques à la température moyenne sur Terre sur un temps beaucoup plus long que les plus vieilles glaces des calottes polaires.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

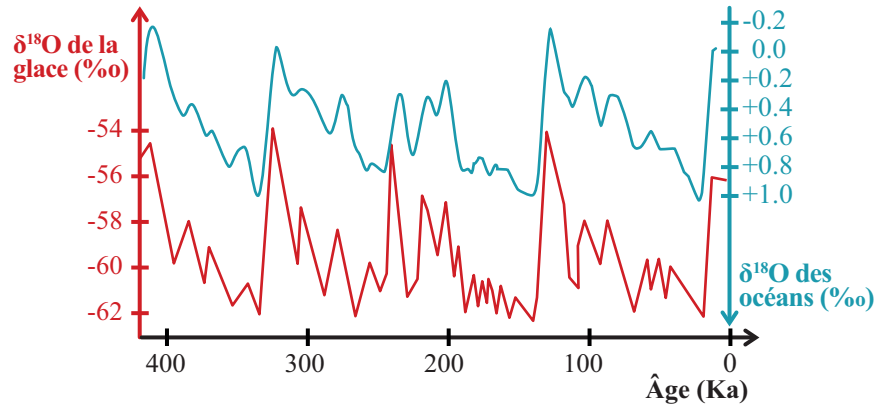


Figure 9.9 – Variations isotopiques de l'oxygène dans les océans et dans les glaces antarctiques

Voir exercices 8 et 7 pages 295 et 294.

Plus généralement, la reconstitution des climats passés nécessite de croiser les données issues de multiples sources aux couvertures temporelles variées.

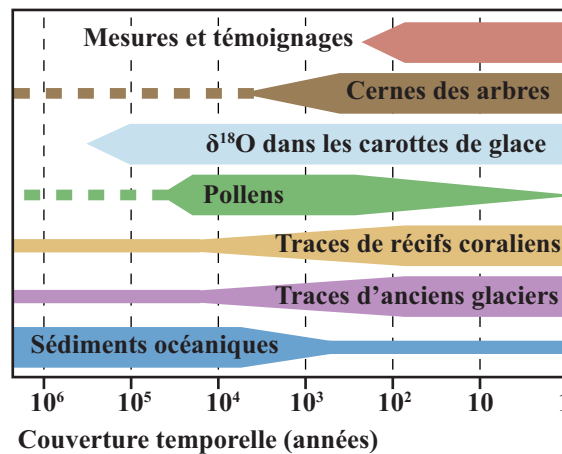


Figure 9.10 – Bilan : diversité des données permettant de reconstituer les climats passés

À RETENIR

Les données géochimiques apportent de nouvelles informations sur les variations de température aux pôles durant le dernier million d'années, et sur le volume des calottes polaires au Cénozoïque. Combinés aux données biologiques et géologiques, ces indices mettent en évidence des alternances de grandes périodes froides (carbonifère, ...) et chaudes (Crétacé,...) ainsi que des oscillations plus rapides au Quaternaire.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

1 **QCM** Vérification des connaissances

5 min

Corrigé
p. 299

Pour chacune des questions suivantes, plusieurs propositions de réponses sont faites dont une seule est correcte. Laquelle ?

- 1 Le delta ^{18}O mesuré dans les glaces forées aux pôles :
 - a est d'autant plus élevé que la température est basse ;
 - b est toujours négatif ;
 - c varie avec une périodicité d'environ 10 000 ans ;
 - d est particulièrement bas lors des périodes interglaciaires.
- 2 Le delta ^{18}O mesuré dans les tests carbonatés des foraminifères benthiques des sédiments océaniques :
 - a est d'autant moins élevé que les calottes glaciaires sont volumineuses ;
 - b est toujours positif ;
 - c varie de la même manière que le delta ^{18}O des océans ;
 - d varie de la même manière que le delta ^{18}O mesuré dans les glaces polaires.

2 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 299

Qui suis-je ?

- 1 Butte de débris rocheux charriés par la glace et abandonnés au front d'un glacier actuel ou passé.
- 2 Roche constituée par la consolidation des débris rocheux entraînés par les glaciers.
- 3 Relation linéaire empirique entre une diminution du $\delta^{18}\text{O}$ de la neige tombée en un lieu et une baisse de la température mesurée en ce lieu le jour où elle tombe.
- 4 Science de l'étude des pollens fossiles emprisonnés dans les glaces, les tourbières ou les sédiments afin notamment de reconstituer les climats passés.

3 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 299

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

- 1 Le climat froid du Carbonifère :
 - a est mis en évidence par des traces de glaciation en Afrique et en Australie ;
 - b est caractérisé par une absence de végétation tropicale ;
 - c était 10°C plus froid que le climat actuel ;
 - d peut être mis en évidence par une diminution du $\delta^{18}\text{O}$ des glaces polaires.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

2 Le climat chaud du Crétacé :

- ☐ **a** est mis en évidence par l'existence d'animaux hétéothermes à de hautes latitudes ;
- ☐ **b** a causé une forte diminution du nombre de récifs coralliens ;
- ☐ **c** a causé une importante montée du niveau de la mer ;
- ☐ **d** est caractérisé par l'absence complète de traces de calottes polaires.

3 Une hausse du niveau marin :

- ☐ **a** peut être causée par la dilatation de l'eau sous l'effet d'une diminution de température ;
- ☐ **b** se produit instantanément suite à un réchauffement du climat ;
- ☐ **c** peut être déclenchée par une augmentation de l'activité des dorsales océaniques ;
- ☐ **d** peut atteindre une amplitude de 200 m.

4 Vérification des connaissances



10 min

Corrigé
p. 300

Expliquez en quelques mots :

- ☐ **1** l'utilité du principe d'actualisme pour reconstituer les climats passés ;
- ☐ **2** la notion de $\delta^{18}\text{-O}$;
- ☐ **3** la différence entre période glaciaire et glaciation.

5 Climats passés — glaciers



10 min

Corrigé
p. 301

Lycée Thiers, Marseille

À la fin du XVIII^e siècle, des géologues qui explorent les Alpes en Suisse et en France remarquent la présence d'énormes blocs granitiques au fond des vallées, posés sur des sédiments calcaires. Ils sont appelés « blocs erratiques » car leur origine pose problème : ces blocs granitiques sont de même nature que les terrains alpins situés à une centaine de kilomètres.

- ☐ **1** Proposez des hypothèses pour expliquer le transport de ces blocs.
- ☐ **2** Les géologues remarquent que les glaciers alpins charrient lors de leurs déplacements des débris arrachés aux montagnes qui constituent des petites buttes appelées moraines. Il existe des moraines à proximité des blocs erratiques. Quels enseignements pouvez-vous tirer de cette observation ?
- ☐ **3** Par des méthodes de datation relative, les géologues arrivent à dater plusieurs dépôts de moraines séparés par des couches contenant des fossiles de plantes typiques de climats tempérés et une complète absence de moraines. Que vous apprend cette observation sur la stabilité du climat ?

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

- 4 Un des blocs erratiques les plus célèbres est « Le Gros Caillou », devenu l'un des symboles du quartier de la Croix-Rousse à Lyon. Il s'agit d'un bloc gris-blanc de roche métamorphique très dure, retrouvé à près de 200 km des vallées des Alpes dont il a probablement été extrait. Il se situe actuellement au niveau d'une moraine datée d'environ 140 000 ans. Que vous apprend cette information sur les glaciers des Alpes au Pléistocène ?
- 5 Quelles sont, selon vous, les limites de l'étude des glaciations en milieu continental ? Quelles autres techniques d'étude vous paraissent plus appropriées pour une étude des climats passés ?

6 Pollens – Climat



10 min

Corrigé
p. 301

Lycée Guy Mollet, Arras

Montrez en quoi les documents proposés illustrent l'intérêt de l'étude des pollens dans la reconstitution des climats du passé.

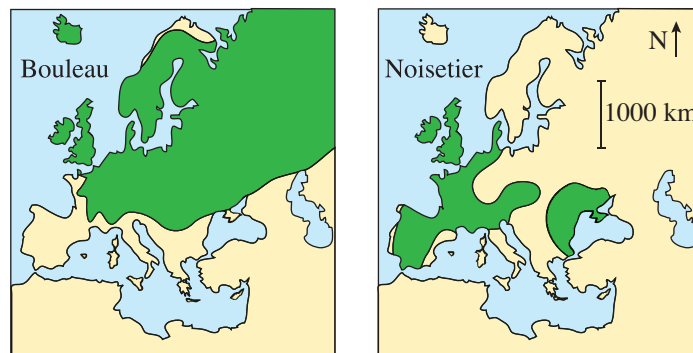


Figure 9.11 – Document 1 : Aires de répartition actuelles du bouleau et du noisetier

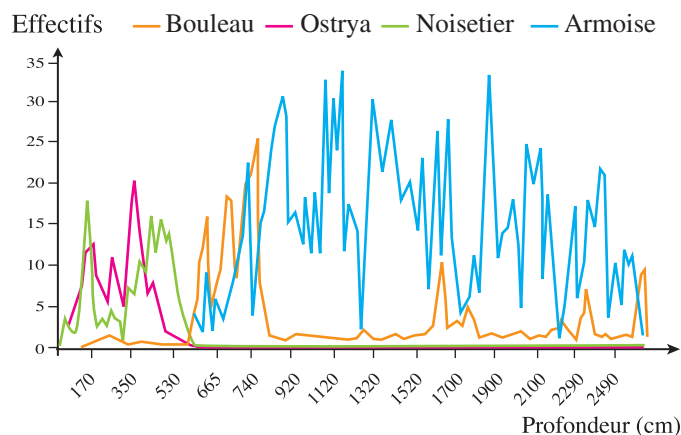


Figure 9.12 – Document 2 : Diagramme pollinique réalisé à partir de l'abondance des pollens récoltés dans une carotte sédimentaire du Lago Grande (Italie)

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

7 Delta ^{18}O – Température



15 min

Corrigé
p. 303

Lycée Corot, Savigny/Orge

À partir des informations tirées des documents et de leur mise en relation, montrez que l'étude du delta isotopique des glaces et des sédiments océaniques conforte l'existence de périodes glaciaires et interglaciaires durant les 800 000 dernières années.

Document 1 : composition isotopique des glaces

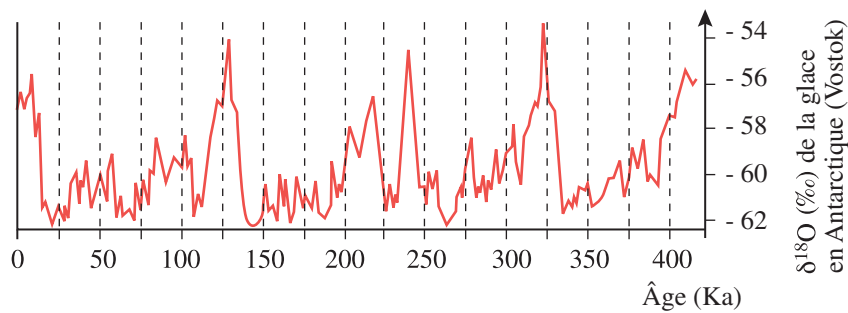


Figure 9.13 – $\delta^{18}\text{O}$ des glaces

Document 2 : thermomètre isotopique

En Antarctique ou au Groenland, quand il neige, les météorologistes réalisent au même moment des mesures de $\delta^{18}\text{O}$ dans les précipitations et des mesures de la température ambiante. Les courbes obtenues traduisent les relations entre le $\delta^{18}\text{O}$ et la température moyenne atmosphérique.

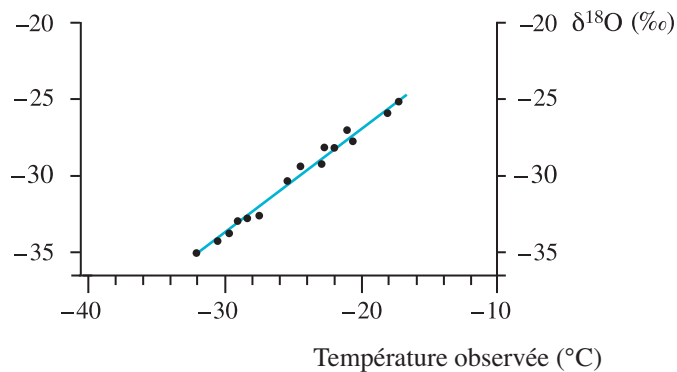


Figure 9.14 – Thermomètre isotopique au Groenland

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

Document 3 : composition isotopique des sédiments marins

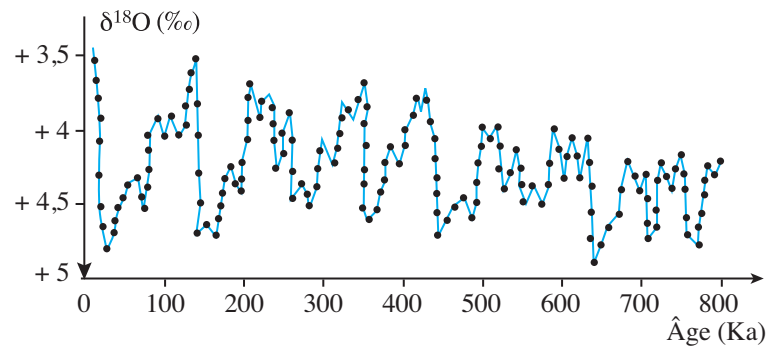


Figure 9.15 – $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments océaniques (tests de foraminifères benthiques)

8 Climats passés – $\delta^{18}\text{O}$



20 min

Corrigé
p. 304

Lycée Turgot, Paris

À partir de votre étude des documents ci-après, expliquez comment des informations extraites de carottes de sédiments marins peuvent fournir des informations sur l'évolution de la température sur Terre.

Document 1

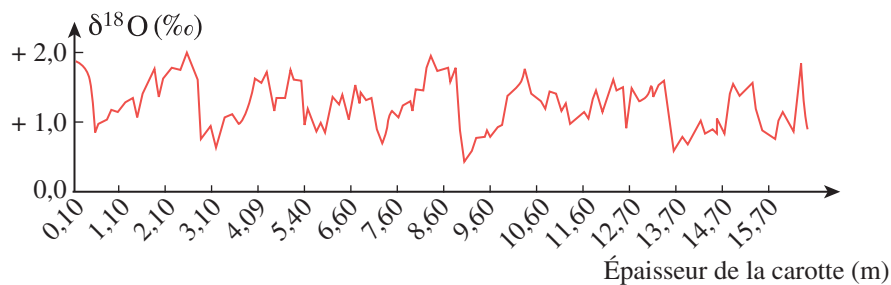


Figure 9.16 – Variation du $\delta^{18}\text{O}$ dans les tests calcaires de foraminifères planctoniques prélevés le long d'une carotte marine du Pacifique équatorial

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Document 2

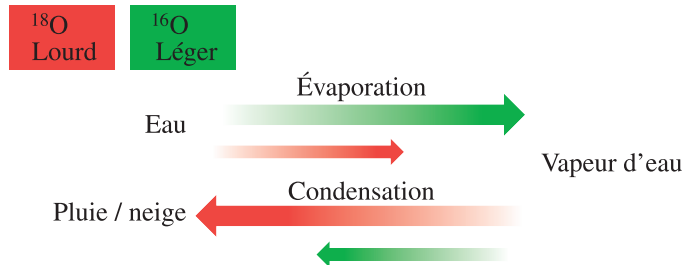


Figure 9.17 – Mécanismes physiques à l'origine de la ségrégation des isotopes de l'oxygène

Document 3

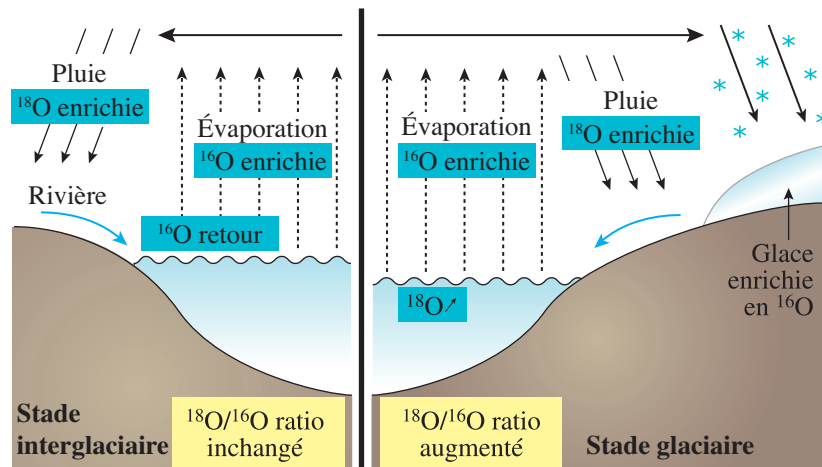


Figure 9.18 – Variations du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ entre les stades glaciaires et interglaciaires

9 Pollens – Delta ^{18}O



40 min

Corrigé
p. 306

Lycée Victor Hugo, Besançon

À partir de la mise en relation des informations tirées de l'exploitation des documents 1, 2 et 3, proposez quelques traits de l'évolution climatique de l'Amérique du Nord.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

Document 1

Végétaux actuels		Poacées	Armoise	Chénopodes	Bruyère	Pin	Bouleau	Saule	Aulne	Chêne
Température	Très froide ($< -10^{\circ}\text{C}$)									
	Froide (-10 à $+5^{\circ}\text{C}$)	+	+	+	+	+	+			
	Tempérée ($+3$ à $+18^{\circ}\text{C}$)	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Figure 9.19 – a) Préférences de quelques végétaux actuels

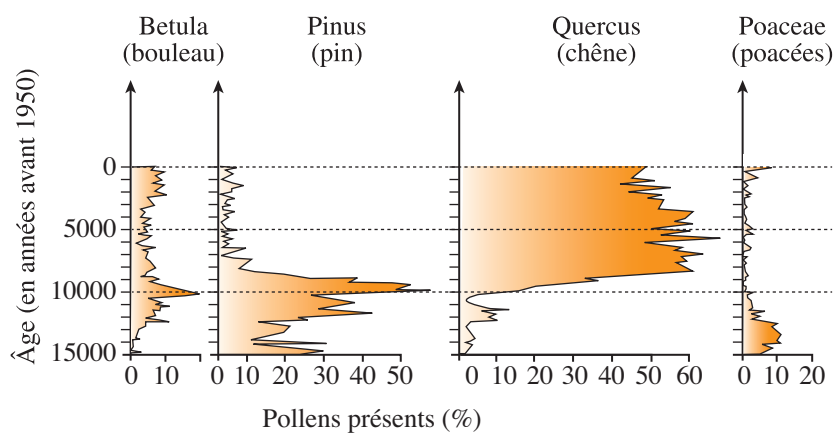


Figure 9.20 – b) Analyse du contenu en pollen des couches déposées à Rogers Lake, Connecticut, États-Unis

Document 2

Des données géologiques telles que la répartition des tillites ont permis de reconstituer l'extension des glaciers en Amérique du Nord de $-15\,000$ ans à nos jours. Certains résultats sont présentés page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

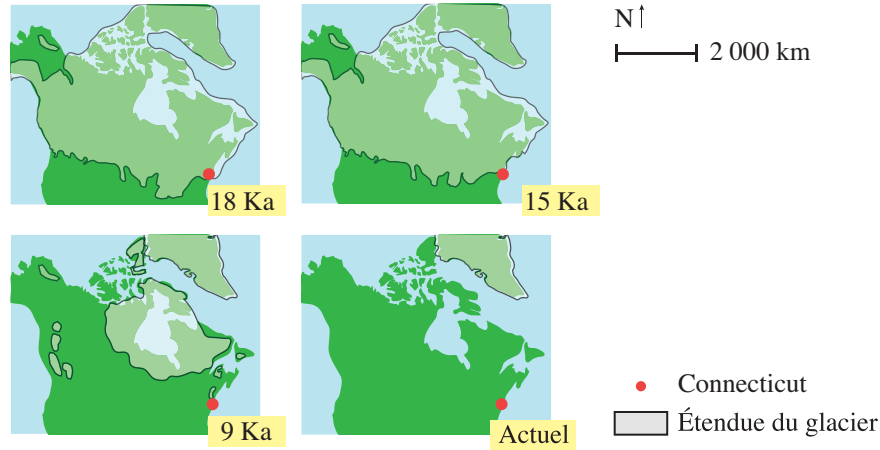


Figure 9.21 – Extension des glaciers continentaux en Amérique du Nord entre –15 000 ans et l’actuel

Document 3

Les variations du $\delta^{18}\text{O}$ permettent d’avoir une indication sur les valeurs de la température grâce à une corrélation empirique entre le $\delta^{18}\text{O}$ dans les précipitations et la température ambiante, appelée « thermomètre isotopique ».

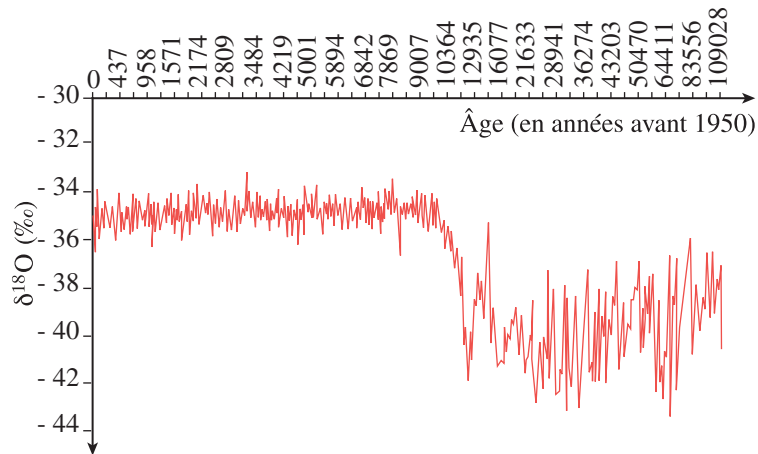


Figure 9.22 – Variations du delta ^{18}O des glaces d’un forage au Groenland. La carotte a été datée à des profondeurs régulières et les âges trouvés sont donnés en abscisse.

Autre donnée : voir figure 9.14 page 294.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

1 QCM Vérification des connaissances

Énoncé
p. 291

- 1
 - a Faux. Plus la température est basse, plus l'air se dessèche donc plus les isotopes lourds ont de chances de précipiter : la neige aux pôles s'appauvrit en ^{18}O .
 - b Vrai. Les masses d'air ont forcément subi des précipitations qui leur ont fait perdre du ^{18}O donc diminuer le $\delta^{18}\text{O}$.
 - c Faux. La principale périodicité du $\delta^{18}\text{O}$ est de 100 000 ans, associée à l'alternance période glaciaire – période interglaciaire au Pléistocène.
 - d Faux. En période interglaciaire il fait globalement plus chaud donc le $\delta^{18}\text{O}$ des glaces polaires augmente.
- 2
 - a Faux. D'importantes calottes glaciaires stockent une eau très appauvrie en ^{18}O donc l'eau des océans et celle des sédiments en est relativement enrichie.
 - b Faux. Il devient négatif en cas de fonte importante des calottes polaires.
 - c Vrai. Il permet ainsi d'évaluer le $\delta^{18}\text{O}$ des océans.
 - d Faux. Ces deux réservoirs s'échangent du ^{18}O donc leurs variations sont opposées.

2 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 291

- 1 Moraine.
- 2 Tillite (on fait la même distinction entre moraine et tillite qu'entre un sable et un grès).
- 3 Thermomètre isotopique.
- 4 Paléo-palynologie.

3 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 291

- 1
 - a Vrai. On trouve des traces de glaciation datées de cette période sur la plupart des continents (voir figure 9.4 page 284).
 - b Faux. Une dense forêt de type équatoriale couvrait l'actuelle France métropolitaine, dont une partie s'est fossilisée sous la forme de charbon, d'où le nom de « Carbonifère ».
 - c Faux. On estime que le refroidissement du Carbonifère n'a pas excédé quelques degrés par rapport à l'actuel.
 - d Faux. L'âge des glaces polaires ne dépasse pas 0.8 Ma, contre environ 300 Ma pour la glaciation du Carbonifère.
- 2
 - a Vrai. On trouve ainsi des fossiles de crocodiliens aux latitudes de l'actuel Groenland ou de la Sibérie.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

b *Faux*. Les coraux sont des espèces indicatrices des climats chauds : les récifs prolifèrent et gagnent les hautes latitudes.

c *Vrai*. Près de 100 m d'augmentation du niveau marin seraient imputables au réchauffement du climat.

d *Vrai*. Seules les périodes de glaciation sont caractérisées par l'existence de calottes polaires.

3 **a** *Faux*. Une hausse du niveau marin peut être causée par la dilatation de l'eau sous l'effet d'une augmentation de sa température.

b *Faux*. La dilatation des océans et la fonte des calottes polaires sont des phénomènes lents qui répondent avec un certain retard aux variations du climat.

c *Vrai*. Les dorsales océaniques prennent un volume non négligeable au fond des océans, qui déplace les masses d'eau.

d *Vrai*. On estime que ce fut le cas au Crétacé.

4 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 292

1 Le principe d'actualisme se base sur l'hypothèse selon laquelle un processus à l'œuvre actuellement se produisait de la même manière par le passé et nécessitait exactement les mêmes conditions qu'aujourd'hui. Pour reconstituer les climats passés, les paléoclimatologues recherchent donc dans les archives sédimentaires des marqueurs caractéristiques des différents climats terrestres, qu'ils soient géologiques ou paléontologiques, et en déduisent le climat qui régnait à cet endroit au moment du dépôt de ces sédiments.

2 L'équation du $\delta^{18}\text{O}$ est la suivante :

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = \left(\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{échantillon}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{référence}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{référence}}} \right) \times 1\,000.$$

Cette grandeur exprime donc une variation du rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (exprimée par la différence), comparée à un rapport isotopique de référence (une valeur proche de la moyenne océanique, en dénominateur). Le tout donne une variation de concentration en ^{18}O , exprimée en ‰ (d'où le $\times 1\,000$).

3 Période glaciaire s'oppose à période interglaciaire, intervalles de temps réguliers, rapide à l'échelle des temps géologiques, connaissant un réchauffement du climat modéré, ne conduisant pas à la fonte des calottes polaires. Périodes glaciaires et interglaciaires alternent donc au sein même des glaciations : périodes froides de l'histoire de la Terre caractérisées par la présence de calottes de glace aux pôles.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

5 Climats passés — glaciers

Énoncé
p. 292

Lycée Thiers, Marseille

- 1 Les blocs étant retrouvés au fond des vallées, ils ont probablement été transportés par l'eau :
 - lors de crues provenant des Alpes ?
 - grâce à la poussée générée par les glaciers ?
- 2 La co-localisation de moraines et de blocs erratiques suggère que ceux-ci ont subi le même mode de transport, au sein des glaciers. Ceci nous indique que des glaciers ont un jour existé dans ces vallées.
- 3 L'alternance entre moraines et sédiments typiques de climats plus cléments suggère que le climat a varié par le passé. Des périodes glaciaires, marquées par la présence de moraines, ont alterné avec des périodes interglaciaires.
- 4 La présence d'un bloc erratique à 200 km des Alpes nous indique qu'à l'époque où s'est formée cette moraine (il y a 140 000 ans), les glaciers alpins s'étendaient jusqu'à Lyon.
- 5 L'utilisation de ces indices est limitée car les moraines sont soumises à l'érosion par les rivières qui coulent dans ces vallées et par les nouveaux glaciers qui peuvent se mettre en place. Par exemple, la dernière période glaciaire, qui s'est terminée il y a 12 000 ans, a presque atteint l'étendue de la précédente. Les glaciers formés ont ainsi effacé la plupart des traces antérieures, sauf les plus avancées, telles que le Gros Caillou à Lyon.

L'observation de l'étendue d'anciens glaciers, bien que très parlante, ne donne pas non plus une indication très précise des variations de température.

Les techniques plus fiables utilisent des mesures sur des dépôts continus, glaces polaires, sédiments marins, tourbières, etc. On peut ainsi par le calcul (grâce notamment au *thermomètre isotopique*), proposer un enregistrement continu des variations de températures sur Terre.

6 Pollens – Climat

Énoncé
p. 293

Lycée Guy Mollet, Arras

MÉTHODE

L'énoncé demande une réponse théorique : il ne s'agit pas ici de reconstituer des variations climatiques passées mais d'expliquer la technique utilisée.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Document 1

⚠ ATTENTION

N'essayez pas de détailler les préférences précises du bouleau et du noisetier. Aidez-vous-en simplement pour illustrer la notion d'exigence climatique.

On trouve des bouleaux jusqu'à de très hautes latitudes (en Scandinavie) tandis que le noisetier n'est pas présent plus au nord que le Royaume Uni. Inversement, on ne trouve pas de bouleaux autour de la Méditerranée tandis que les noisetiers sont présents jusqu'au sud de l'Espagne.

On peut faire l'hypothèse que cette différence de répartition est due à des exigences climatiques différentes (température, pluviosité, etc.). Ainsi, le bouleau semble préférer les climats tempérés à froids tandis que le noisetier est plutôt inféodé aux climats tempérés à chauds.

Par ailleurs, l'aire de répartition actuelle du bouleau est beaucoup plus étendue que celle du noisetier. On peut donc émettre l'hypothèse que ce dernier a des exigences plus strictes.

Document 2

🔍 MÉTHODE

Lors de l'analyse du diagramme pollinique, il est préférable de se limiter aux pourcentages des pollens des espèces dont on connaît l'extension géographique.

La répartition des pollens rencontrés dans une carotte sédimentaire réalisée dans le Laco Grande (Italie) montre d'importantes variations en fonction de la profondeur. Par exemple, les pollens fossilisés dans les sédiments situés à 700 cm de profondeur sont constitués à 25% de pollen de bouleau et ne comportent pas de pollen de noisetier, tandis que ceux fossilisés dans les sédiments situés à 170 cm de profondeur sont constitués de plus de 15% de pollen de noisetier et ne comportent pas de pollen de bouleau.

En ayant pu dater certaines couches de ces sédiments, ou simplement en connaissant leurs vitesses de dépôt et de compaction, il serait possible d'associer un âge à chaque profondeur de cette carotte. Plus généralement, on sait que l'âge des dépôts augmente de manière assez continue avec la profondeur donc que l'axe des abscisses correspond à un écoulement du temps vers la gauche.

En faisant l'hypothèse que la répartition des pollens piégés par les sédiments est représentative de la répartition des espèces *anémogames* autour du lac (voir Chapitre 7), on a donc une idée de la végétation dans la région pendant toute la période correspondant au dépôt des sédiments de cette carotte.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

Par exemple, en mettant ces informations en relation avec le Document 1, on peut proposer que les sédiments situés à 700 cm de profondeur se sont déposés sous un climat globalement plus frais que les sédiments présents à 170 cm de profondeur.

Synthèse : l'exploitation d'un diagramme pollinique, en relation avec la connaissance précise des exigences climatiques des espèces considérées, montre l'intérêt de la *paléo-palynologie* (étude des pollens fossiles) pour la reconstitution des climats passés.

On voit cependant qu'il est difficile de quantifier les variations du climat, d'autant plus que les aires de répartition des espèces varient également selon la présence d'espèces compétitrices et/ou de prédateurs, etc.

7 Delta ^{18}O – Température

Énoncé
p. 294

Lycée Corot, Savigny/Orge

Le Document 1 révèle les variations du $\delta^{18}\text{O}$ de la glace dans une carotte du forage de Vostok en Antarctique, correspondant à l'enregistrement des dépôts de glace pendant ≈ 400 Ka. En général, le $\delta^{18}\text{O}$ est très négatif (autour de -61‰). On peut toutefois mettre en évidence quelques périodes relativement brèves durant lesquelles le $\delta^{18}\text{O}$ augmente jusqu'à $\approx -54\text{‰}$: il y a 425, 325, 240, 220, 125 et 12 Ka.

Le Document 2 atteste de l'existence d'une corrélation linéaire entre la valeur du $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations neigeuses en un point et la température mesurée en ce point : le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations neigeuses est d'autant plus négatif que la température est basse.

⚠ ATTENTION

La courbe du thermomètre isotopique fournie a été établie au Groenland et la courbe de la composition isotopique des glaces a été mesurée en Antarctique. Or les valeurs du thermomètre isotopique dépendent de l'altitude, de la distance à l'océan, etc. Par principe d'actualisme, on peut donc exploiter la tendance montrée par la courbe pour des périodes passées, mais pas associer les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ du Document 1 à une température sur le Document 2.

On peut mettre en relation ces deux documents pour proposer que le climat à Vostok, donc probablement sur la Terre entière, a été froid durant les périodes où le $\delta^{18}\text{O}$ est très faible (ce sont des périodes glaciaires), et qu'il s'est réchauffé à plusieurs reprises lors des périodes où le $\delta^{18}\text{O}$ augmente (il y a 425, 325, 240, 220, 125 et 12 Ka : ce sont des périodes interglaciaires). En simplifiant, on peut dire que ces réchauffements ont eu lieu tous les 100 Ka : il y a environ 425, 325, 225, 125 et 25 Ka.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

On observe par ailleurs des fluctuations du $\delta^{18}\text{O}$ à plus petites longueurs d'onde, dont il est difficile de dire si elles correspondent à de réelles fluctuations climatiques plus rapides mais moins importantes, ou simplement à du « bruit » dans les données (éléments indésirables qui s'ajoutent à un signal).

Le Document 3 nous renseigne sur les variations du $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments marins depuis 800 Ka. On observe que le $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères marins est globalement beaucoup plus haut que celui des glaces polaires (autour de +4‰ ici), mais montre une oscillation avec une période d'environ 100 Ka et une amplitude de l'ordre de 1‰. Il a notamment été particulièrement bas autour de 725, 625, 525, 425, 325, 225 et 125 Ka, ainsi que vers 675 et 250 Ka.

L'échelle des ordonnées inversée permet d'insister sur la corrélation avec le $\delta^{18}\text{O}$ de la glace à Vostok. En effet, on sait qu'à une période froide correspond un fort taux de ^{18}O marin (voir si besoin l'Exercice 8). Les variations isotopiques des sédiments marins permettent ainsi de confirmer les hypothèses faites grâce au thermomètre isotopique à Vostok, ainsi que de les prolonger pour les 400 Ka précédents.

Synthèse : à quelques fluctuations près, les mesures du Delta isotopique de l'oxygène dans les carottes de glace aux pôles, doublées et prolongées par celles des carottes de sédiments marins, ont permis de mettre en évidence une relative régularité dans la survenue des périodes interglaciaires depuis 800 Ka.

Les causes de cette régularité seront détaillées au Chapitre 10.

8 Climats passés – $\delta^{18}\text{O}$

Énoncé
p. 295

Lycée Turgot, Paris

MÉTHODE

L'énoncé précise qu'il faut répondre à partir de l'étude des documents. Il s'agit donc de construire proprement votre raisonnement en allant chercher pour chaque document toutes les informations qu'il apporte, sans réciter votre cours.

ATTENTION

Ne pas confondre le $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments marins (présenté dans le Document 1) avec celui de la glace (Document 3) : leurs variations sont opposées.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Le Document 1 présente les variations du $\delta^{18}\text{O}$ le long d'une carotte sédimentaire, graduée (en m) vers la droite. D'après le *principe de superposition* (voir Chapitre 4), l'âge des dépôts augmente donc en allant vers la gauche. On pourrait ainsi convertir chaque profondeur en âge en connaissant la vitesse de dépôt des sédiments et leur taux de compaction.

Les valeurs sont toutes positives mais relativement proches de 0 : la quantité de ^{18}O est légèrement supérieure à celle de l'eau de mer actuelle. Plus précisément, on constate une alternance entre des périodes de plus fort $\delta^{18}\text{O}$ (autour de 2‰) et des périodes où il est relativement plus faible (inférieur ou égal à 1‰). On peut donc en déduire que des facteurs ont fait varier le $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments marins au cours des temps géologiques.

Le Document 2 rappelle le comportement des isotopes de l'oxygène lors des changements d'état :

- en cas d'évaporation, la vapeur d'eau produite est enrichie en isotopes légers (^{16}O) car ceux-ci passent plus facilement dans la phase gazeuse ;
- en cas de condensation (potentiellement suivie de précipitations sous forme de pluie ou de neige), la vapeur d'eau restante s'appauvrit encore en isotopes lourds (^{18}O) car ceux-ci passent plus facilement dans la phase liquide.

Le Document 3 schématise le comportement des isotopes de l'oxygène au cours du cycle de l'eau en période glaciaire et interglaciaire :

- en période interglaciaire, la quantité plus importante de ^{16}O extraite de l'océan par l'évaporation finit toujours par se retrouver dans les pluies et revient à l'océan via les fleuves : au bilan, le ratio $[\text{}^{18}\text{O}]/[\text{}^{16}\text{O}]$ dans l'océan reste inchangé ;
- en période glaciaire, l'eau des nuages, issue l'évaporation et encore appauvrie en ^{18}O par les précipitations, finit par précipiter dans la neige et s'accumuler sous la forme d'une calotte glaciaire enrichie en ^{16}O . Ce ^{16}O ne retourne donc pas à l'océan, dont le ratio $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ augmente.

On en déduit que la composition isotopique des carbonates marins, qui dépend directement de celle de l'océan, reflète le climat global sur Terre au moment de la formation de ces carbonates : en période glaciaire, une grande quantité de ^{16}O est piégée dans la glace donc le $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments augmente.

Synthèse : les périodes plus froides (stades glaciaires) sont repérables dans les carottes de sédiments par des valeurs élevées du $\delta^{18}\text{O}$, et inversement pour les périodes chaudes (stades interglaciaires). Les informations extraites des carottes de sédiments marins peuvent donc fournir des informations sur l'évolution de la température.

9 Pollens – Delta ^{18}O

Lycée Victor Hugo, Besançon

Énoncé
p. 296

MÉTHODE

Dans un premier temps, détailler méthodiquement chaque document :

- décrire ce que l'on observe ;
- donner si possible des chiffres précis ;
- interpréter, à l'aide de vos connaissances.

Dans un second temps seulement, mettre le document en relation avec les autres documents fournis.

Le Document 1b (contenu en pollen des couches déposées à Rogers Lake) montre une variation de la répartition des pollens dans les couches sédimentaires au cours du temps. Par exemple, entre 15 et 12 Ka, on observe environ 10% de pollens de poacées contre environ 3% de pollen de chêne, alors qu'à partir de 9 Ka le chêne représente environ 55% des espèces présentes, contre $\approx 1\%$ pour les poacées. Cette répartition se stabilise ensuite pour les 8 000 dernières années.

Ces observations sont à mettre en relation avec le Document 1a, présentant les exigences climatiques de ces taxons. On y apprend notamment que le chêne ne tolère pas les températures froides, alors que c'est le cas pour les poacées, le pin et le bouleau. On peut donc faire l'hypothèse que la régression de ces trois derniers au profit du chêne il y a 9 Ka traduit la transition d'un climat froid à un climat tempéré.

Le Document 2 montre qu'une calotte de glace de près de 2 000 km de diamètre existait il y a 18 et 15 Ka, couvrant de l'ordre de :

$$\pi \times r^2 \approx 3 \times 2\,000^2 = 12 \times 10^6 \text{ km}^2,$$

soit environ 20 fois la superficie de la France métropolitaine. Cette surface avait diminué de moitié il y a 9 Ka et la calotte a continué de se résorber pour n'être plus présente qu'au Groenland aujourd'hui. On met donc en évidence une importante déglaciation à partir de 15 Ka.

Pour une même géographie des continents, la superficie des glaces continentales étant directement corrélée à la température globale, cette observation suggère que la Terre a connu une période froide qui s'est terminée il y a entre 15 Ka et 9 Ka.

Le Document 3a présente les variations du $\delta^{18}\text{O}$ des glaces du Groenland depuis 110 Ka. Cette courbe montre deux parties bien distinctes :

- l'une entre 110 et 12 Ka, caractérisée par un $\delta^{18}\text{O}$ très bruité^(*) mais faible et en moyenne constant à $-40 \pm 3\text{‰}$;
- l'autre entre 10 Ka et l'actuel, caractérisée par un $\delta^{18}\text{O}$ toujours négatif mais plus fort, moins bruité^(*) et en moyenne constant à $-35 \pm 1\text{‰}$.

^(*) des variations indésirables s'ajoutent à la tendance observée.

RECONSTITUER LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 9

On met ainsi en évidence une augmentation du $\delta^{18}\text{O}$ de 5‰ à cet emplacement entre 12 et 10 Ka.

Le Document 3b nous donne le lien empirique entre température ambiante et $\delta^{18}\text{O}$. Bien que mise en évidence pour des valeurs de $\delta^{18}\text{O} \geq -32\text{‰}$, la droite ne semble pas s'infléchir et on peut faire l'hypothèse que l'équation reste valable jusqu'à -40‰ . On a donc un lien direct entre faible $\delta^{18}\text{O}$ dans la glace et faible température à l'endroit où elle se forme. Par principe d'actualisme, on fait l'hypothèse que cette relation était également vraie par le passé.

► POUR ALLER PLUS LOIN

On peut quantifier cette différence de température. Le thermomètre isotopique montre qu'en ce point, la relation entre y (la composition isotopique) et x (la température) est la suivante :

$$y = \frac{2}{3} \times x - 13.5,$$

de la forme $y = ax + b$.

Ici, on connaît la variation de la composition isotopique : $y_2 - y_1$.

On soustrait deux fois l'équation du thermomètre isotopique pour obtenir :

$$y_2 - y_1 = \frac{2}{3} \times x_2 - x_1.$$

On inverse alors cette équation pour connaître $x_2 - x_1$, la variation de température :

$$x_2 - x_1 = 1.5 \times y_2 - y_1.$$

Une augmentation $y_2 - y_1 = +5\text{‰}$ correspond donc à un réchauffement :

$$x_2 - x_1 = +7.5^\circ\text{C}.$$

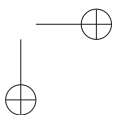
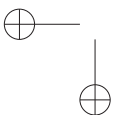
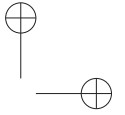
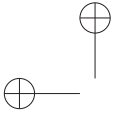
On met ainsi en évidence un fort épisode de réchauffement entre 12 et 10 Ka. Ce réchauffement est bien en accord avec la déglaciation observée entre 15 et 9 Ka, et avec la colonisation de la région du Connecticut par le chêne amorcée il y a 10 Ka.

De plus, on sait que la fonte des glaciers connaît une forte inertie par rapport aux variations de température. Ceci peut expliquer qu'une partie de la calotte présente sur le continent américain a continué de subsister quelques milliers d'années après le pic de réchauffement.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Comprendre les variations climatiques passées

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Paramètres astronomiques de la Terre et variation cyclique des températures
3. Les grands cycles tectoniques génèrent des variations à plus grande échelle
4. Une modification des interactions entre réservoirs de carbone

1 Introduction

Le climat est un système complexe mettant en jeu de nombreux paramètres qui interagissent d'une manière difficilement quantifiable. Au cours des temps géologiques, de multiples événements ont pu perturber l'un ou plusieurs de ces paramètres, aboutissant à des modifications du climat. La température n'est alors pas le seul paramètre à varier, et son évolution n'est pas linéaire.

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, comprendre comment ces différents paramètres ont interagi par le passé permet de mieux appréhender le bouleversement que nous vivons aujourd'hui et de bien faire la part des choses entre son origine anthropique et ses possibilités d'emballement propres au système climatique.

? PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les causes des variations passées du climat ?

2 Paramètres astronomiques de la Terre et variation cyclique des températures

Au Chapitre 9, l'étude de carottes forées dans la glace des pôles a révélé des oscillations du climat entre périodes glaciaires et interglaciaires présentant une périodicité de 100 000 ans sur le dernier million d'années. Ces oscillations existent toutefois depuis beaucoup plus longtemps : elles apparaissent sous la forme d'alternances de dépôts dans les sédiments tout au long du Cénozoïque.

Exemple : dans les sédiments Oligocène de la Plaine de Limagne (34-23 Ma), on observe partout des alternances centimétriques de dépôts de calcaires et d'argiles : les premiers se déposent dans un environnement chaud tandis que les seconds sont plutôt caractéristiques des climats froids.

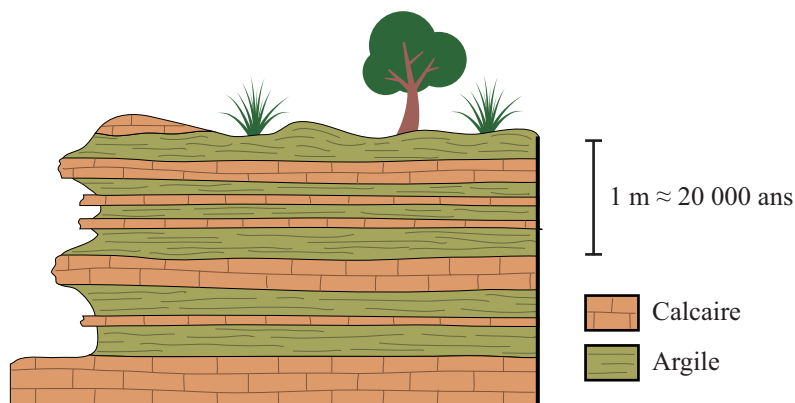


Figure 10.1 – Les alternances argilo-calcaires dans les sédiments de la Plaine de Limagne (Puy-de-Dôme)

L'analyse de ces oscillations met en évidence non seulement des cycles de 100 000 ans, mais également des réchauffements secondaires tous les 20 000 ans, ainsi qu'un cycle plus marqué tous les 400 000 ans.

PROBLÉMATIQUE

Quelle est l'origine de ces oscillations régulières du climat au Quaternaire ?

2.1 Les paramètres orbitaux de la Terre

Les alternances rythmiques de composition des sédiments sont connues de longue date et depuis longtemps associées à d'énigmatiques variations du climat. L'explication la plus probable de ces oscillations climatiques est proposée par Milanković dans les années 1910.

Celui-ci soutient l'idée que le climat terrestre dépend de la position de la Terre par rapport au Soleil. Il calcule alors les conséquences des variations possibles de cette position sur le climat au cours du Pléistocène (il y a 2.6 Ma à 11.7 Ka).

Remarque : on parle ici du Pléistocène plutôt que du Quaternaire (2.6 Ma à l'actuel) de manière à s'affranchir de toute perturbation d'origine anthropique à partir du Néolithique (il y a environ 10 Ka).

Définition 1 : paramètres orbitaux ou paramètres de Milanković

Principales grandeurs décrivant la situation de la Terre sur son orbite autour du Soleil (excentricité, obliquité, précession).

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

2.1.1 - L'excentricité (« différence au cercle »)

Ce paramètre décrit la forme de l'orbite terrestre : une ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers. Plus cette ellipse est allongée, plus l'excentricité est forte.

L'excentricité oscille selon un cycle possédant deux périodes d'environ 100 et 400 Ka.

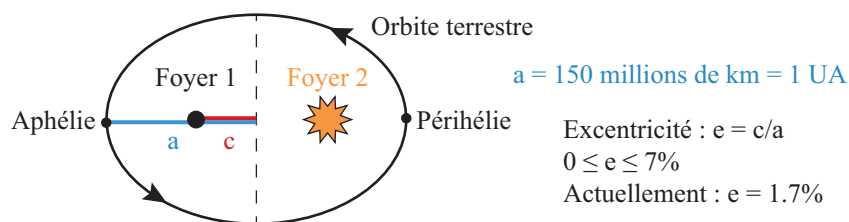


Figure 10.2 – Excentricité de l'orbite terrestre (très exagérée – le Soleil est grossi 50 fois)

2.1.2 - L'obliquité

Ce paramètre décrit l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre. Plus cet axe est proche du plan orbital terrestre, plus l'obliquité est importante.

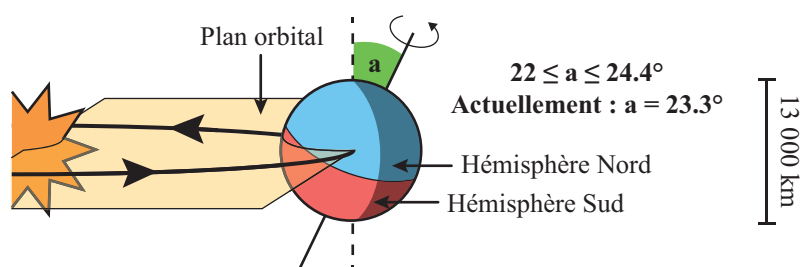


Figure 10.3 – Obliquité de l'axe de rotation de la Terre (zoom sur la Terre)

Cette inclinaison est à l'origine des saisons : les rayons solaires qui arrivent en un même point sont plus inclinés donc moins énergétiques l'hiver que l'été. Une obliquité plus faible donne lieu à des étés plus frais et des hivers plus doux en zone tempérée. Or ces deux situations ne se compensent pas : il neige autant voire plus si les hivers sont moins froids, mais la glace fond beaucoup moins si les étés sont moins chauds, provoquant une extension des calottes polaires qui peut précipiter l'entrée en période glaciaire.

L'excentricité oscille selon une période d'environ 40 000 ans (40 Ka).

2.1.3 - La précession

Ce paramètre décrit le décalage entre la position de la Terre sur son orbite et la direction de son axe de rotation.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Actuellement, ce dernier pointe au Nord, dans la direction de l'étoile polaire : le solstice d'hiver se produit donc quand le soleil est à l'opposé de cette étoile. Or la Terre passe au périhélie (au plus proche du Soleil) autour du 2 janvier, une dizaine de jours après le solstice d'hiver dans l'hémisphère nord. Du fait de cette proximité, l'hiver est plus doux dans l'hémisphère nord et l'été est plus chaud dans l'hémisphère sud.

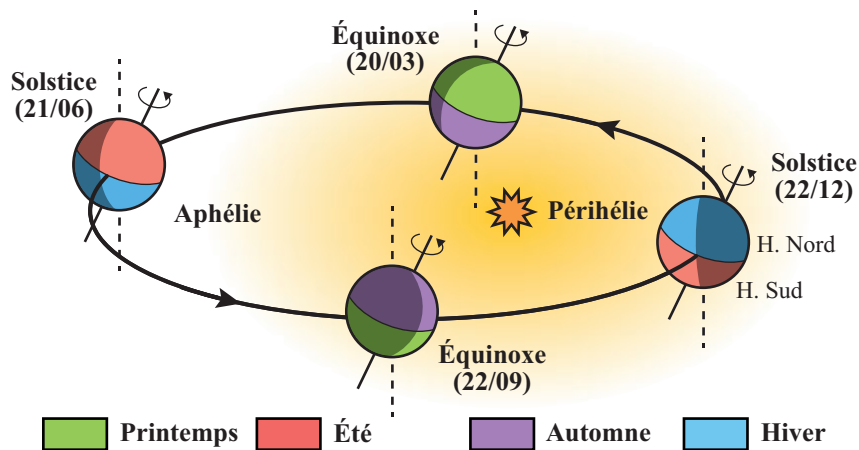


Figure 10.4 – Précession de l'orbite terrestre : dans 11 000 ans, l'axe de rotation de la Terre pointera dans la direction opposée (ici vers la gauche)

La précession oscille selon un cycle possédant deux périodes d'environ 20 Ka.

2.2 Les paramètres orbitaux influent sur le climat

Milanković calcule comment les oscillations que connaissent les différents paramètres orbitaux de la Terre se combinent entre elles en un *forçage* complexe sur le climat.

Définition 2 : forçage orbital

Effet théorique d'une modification des paramètres orbitaux de la Terre sur le climat.

Remarque : le forçage orbital est souvent illustré par l'énergie solaire moyenne journalière reçue en un point (situé par exemple à 65° de latitude nord) un jour donné (généralement au solstice d'été).

Milanković met en évidence que la courbe du forçage orbital au cours du Pléistocène est étroitement corrélée aux oscillations fines du climat fournies par les indices géochimiques (voir Chapitre 9). Cette observation suggère que le forçage orbital est à l'origine de la plupart des oscillations du climat sur des échelles de temps inférieures au million d'années.

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

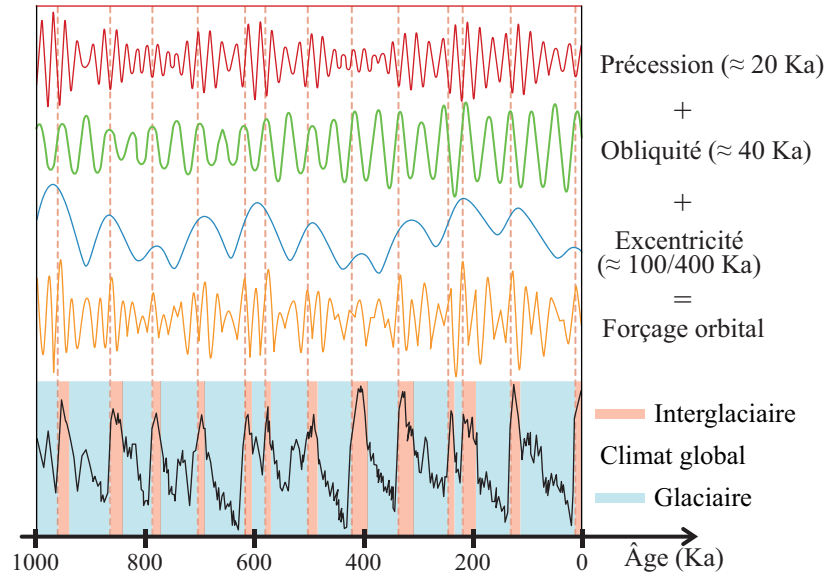


Figure 10.5 – Paramètres de Milanković, forçage orbital et comparaison avec les oscillations climatiques au Pléistocène

⚠ ATTENTION

Les variations des paramètres orbitaux ne modifient pas la distance moyenne de la Terre au Soleil sur une année : la quantité annuelle d'énergie qui arrive sur le globe reste constante. C'est la répartition de cette énergie dans l'espace et dans le temps qui varie : saisons plus ou moins marquées, etc.

Remarque : il existe d'autres forçages, moins importants : variations de l'activité du Soleil, etc.

🔄 À RETENIR

La régularité des alternances entre périodes glaciaires et interglaciaires au Pléistocène peut s'expliquer par la combinaison des variations cycliques des paramètres de Milanković, décrivant la situation de la Terre vis-à-vis du Soleil.

Voir exercice 10 page 332.

Certaines grandes variations du climat se déroulent toutefois sur des périodes beaucoup plus longues.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

3 Les grands cycles tectoniques génèrent des variations à plus grande échelle

❓ PROBLÉMATIQUE

Comment expliquer les variations du climat sur des périodes de plusieurs dizaines de millions d'années ?

3.1 Albédo et gaz à effet de serre modifient le bilan énergétique de notre planète

Parallèlement aux variations de l'énergie reçue par la Terre, étudiées en Partie 2, il est également indispensable de s'intéresser à l'énergie que celle-ci émet en retour.

Définition 3 : bilan radiatif

Différence entre l'énergie reçue et l'énergie émise par un système, ici la Terre. Le *bilan radiatif* s'exprime par unité de temps et de surface.

Exemple : en moyenne, la Terre reçoit en permanence 340 W.m^{-2} d'énergie en provenance du Soleil.

Pour rester à la même température, la Terre doit donc émettre la même quantité d'énergie. Si elle en émet moins, elle se réchauffe ; plus, elle se refroidit : on parle d'*équilibre radiatif*. Cette énergie peut être émise sous forme d'infrarouges thermiques (rayonnement émis par tout corps chaud) ou de lumière réfléchie directement.

En effet, l'énergie du rayonnement solaire n'est pas totalement absorbée par la Terre : une partie de ce rayonnement est réfléchi vers l'espace.

Définition 4 : albédo

Proportion de lumière solaire réfléchi par la Terre. L'*albédo* prend une valeur entre 0 (absorption complète) et 1 (réflexion totale), souvent exprimée en pourcentage. Il est d'autant plus important que l'objet éclairé est blanc et brillant.

Exemple : l'albédo moyen sur Terre est de 30% ; il varie de 10% pour l'océan à 90% pour la neige fraîche.

Remarque : une grande partie de l'albédo terrestre provient de sa couverture nuageuse.

En tenant compte de l'albédo, la Terre reçoit $70\% \times 340 = 238 \text{ W.m}^{-2}$ d'énergie de la part du soleil. Pour être à l'équilibre radiatif, elle doit donc en émettre la même quantité.

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

Or le rayonnement émis par la Terre dépend de sa température. Ainsi, à l'équilibre, pour émettre 238 W.m^{-2} , la surface terrestre devrait être à une température de -19°C .

► POUR ALLER PLUS LOIN

On suppose ici que la Terre émet son énergie en respectant la loi de Wien. Elle émet donc un rayonnement dont la longueur d'onde maximale augmente avec la température de surface : autour de $10 \mu\text{m}$ pour la Terre (rayonnement infrarouge), contre 500 nm pour le Soleil à $5\,500^\circ\text{C}$ (lumière visible). Quant à l'énergie dissipée par la Terre, elle est proportionnelle à T_{surf}^4 , sa température de surface à la puissance 4 (loi de Stefan-Boltzmann).

En réalité, la température moyenne sur Terre est plutôt de $+16^\circ\text{C}$. Ceci suggère l'existence d'un phénomène capable de réchauffer l'atmosphère terrestre, dont une explication est proposée ci-dessous.

Définition 5 : effet de serre

Absorption de 90% du rayonnement infrarouge thermique terrestre par certaines molécules de l'atmosphère comme la vapeur d'eau H_2O , le dioxyde de carbone CO_2 ou le méthane CH_4 . Ces molécules, dites *gaz à effet de serre*, réémettent cette énergie en partie vers le bas, la surface terrestre, participant à la réchauffer jusqu'à une température moyenne vivable de 16°C .

Simultanément, l'autre partie de l'énergie absorbée est réémise vers l'espace, l'espace. Or plus la quantité de gaz à effet de serre augmente, plus leurs molécules occupent les niveaux supérieurs de l'atmosphère. L'énergie rayonnée vers l'espace par le *système Terre* se décale ainsi progressivement vers la haute atmosphère. Sachant que la quantité d'énergie émise par un matériau diminue avec sa température et donc son altitude, la quantité d'énergie diffusée vers l'espace par ces molécules diminue et ne suffit plus à compenser l'énergie solaire entrante : l'atmosphère se réchauffe.

Définition 6 : forçage radiatif

Effet d'un déséquilibre du bilan radiatif sur le climat.

Au cours des temps géologiques, la quantité de CO_2 atmosphérique et la température moyenne sur Terre évoluent (*voir figure 3.3 et exercice 6 page 327*). Les principaux pics de CO_2 apparaissent ainsi corrélés avec les grandes périodes chaudes vues au Chapitre 9, et inversement.

Voir schéma page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

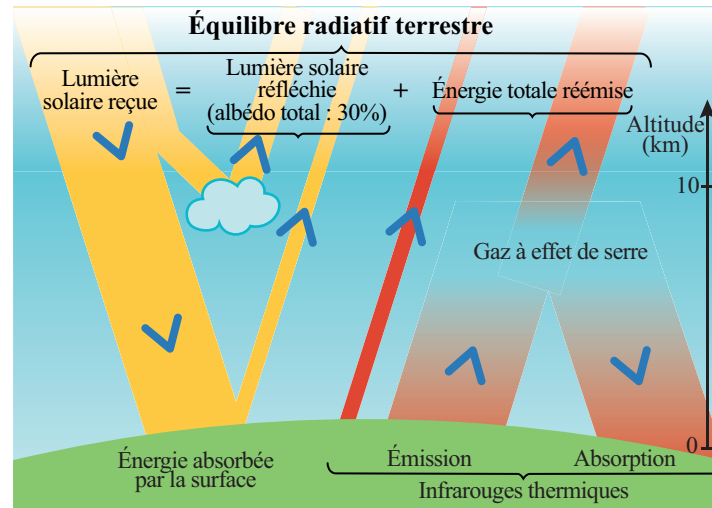


Figure 10.6 – Impact de l'albédo et de l'effet de serre sur le bilan radiatif terrestre (représenté ici à l'équilibre)

La concentration en CO_2 peut également être corrélée avec les cycles de Wilson (voir Chapitre 5) : les périodes de fragmentation continentale sont associées à des pics de CO_2 tandis que les périodes de collision montrent une diminution claire de sa concentration.

PROBLÉMATIQUE

Dans quelle mesure les événements géologiques sont-ils à l'origine de variations de la concentration en CO_2 sur le long terme ?

3.2 La fragmentation des continents émet du CO_2

Le manteau terrestre est le plus gros réservoir de carbone sur Terre (10 millions de fois plus que l'ensemble «océans et atmosphère»). Différents flux témoignent d'échanges de carbone avec ce réservoir. L'enfouissement des sédiments lors de la subduction y apporte du carbone tandis que le volcanisme libère du CO_2 dans l'atmosphère, ce qui augmente l'effet de serre.

Or nous avons vu au Chapitre 5 que les cycles orogéniques débutent par de grandes périodes de fragmentation continentale. Celles-ci se soldent par l'ouverture de nouveaux océans, associés à la mise en place de nombreuses dorsales océaniques. Or ces dorsales sont avant tout d'immenses chaînes volcaniques. La fragmentation des continents entraîne donc un important réchauffement du climat.

Exemple : ce phénomène est en partie responsable de la grande période de réchauffement suite à la fragmentation de la Pangée au Crétacé (il y a 145-66 Ma)

Voir exercice 8 page 329.

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

3.3 L'érosion des continents consomme du CO₂

Le CO₂ atmosphérique contribue à l'acidification de l'eau de pluie. Il participe ainsi à l'altération des roches, formant des ions bicarbonates HCO₃⁻. Une partie de ces ions précipite alors sous forme de calcaire CaCO₃ dans les lacs et océans. Ainsi, plus il y a de roches disponibles à l'érosion, plus du CO₂ est soustrait à l'atmosphère pour terminer sous forme de calcaire dans les sédiments.

L'érosion est d'autant plus forte que les reliefs sont élevés : ceux-ci forment en effet des barrières aux masses d'air océanique qui s'élèvent, refroidissent et produisent alors des précipitations accrues. Associées à de fortes pentes, celles-ci favorisent une dénudation rapide des chaînes de montagnes par glissements de terrain. En altitude, l'alternance gel-dégel (*cryofracture*) affaiblit également les roches, et les glaciers, le vent et les torrents participent à débiter la matière érodée.

Or, du fait des cycles orogéniques (voir Chapitre 5), la Terre connaît régulièrement des périodes de collision continentale caractérisées par la mise en place de nombreuses ceintures orogéniques autour du monde. Celles-ci subissent alors une importante érosion, puisant une grande quantité de CO₂ dans l'atmosphère, ce qui génère un refroidissement durable du climat.

Exemple : les indices géochimiques des sédiments marins montrent une tendance générale à la baisse de température moyenne du globe au Cénozoïque (depuis 66 Ma), assez bien corrélée à l'altération de la chaîne alpine. Ainsi, l'orogénèse hercynienne au Carbonifère et l'orogène alpine au Cénozoïque sont toutes les deux associées à une période de glaciation.

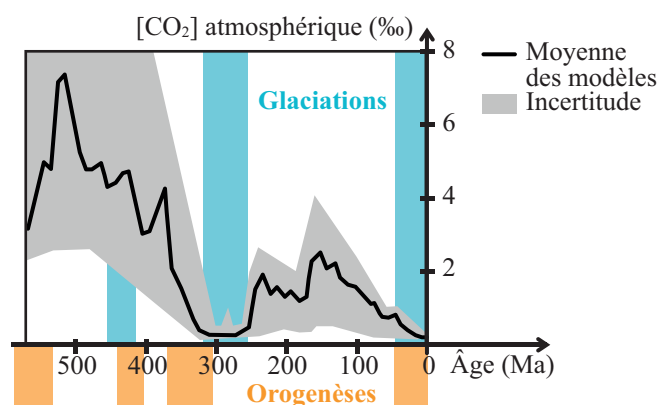


Figure 10.7 – Concentrations probables en CO₂ atmosphérique (gris), glaciations (bleu) et principales orogénèses (orange) au cours du Phanérozoïque



Retrouvez une vidéo présentant un exemple de liens entre érosion et glaciation avec IVE

Remarque : les grandes crises de la biodiversité du Phanérozoïque (voir Chapitre 4) sont souvent attribuées à des refroidissements brutaux du climat. Or la plupart d'entre elles ont pu être associées à des épisodes de fort volcanisme de points chauds.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Ceux-ci peuvent en effet se produire sur les continents, créant de grandes étendues de basalte dont l'altération rapide parvient à contrer en quelques dizaines de milliers d'années le réchauffement dû à leur émission de CO₂.

Exemple : pendant un million d'années peu avant la crise Permien-Trias (il y a 250 Ma), des éruptions volcaniques massives en Sibérie ont formé un plateau basaltique d'une superficie estimée à dix fois celle de la France métropolitaine et d'une épaisseur moyenne de 500 m.

3.4 La géographie des continents influe sur le climat

La position des masses continentales évolue dans le temps sous l'effet de la tectonique des plaques. Or si la géographie influe sur le climat local, elle influe aussi sur le climat global. Ainsi, la répartition latitudinale des continents, leur altitude (présence ou non d'orogènes majeurs), leur dimension (supercontinent ou masses continentales dispersées) et leur surface (proportion de continents émergés et immergés) évoluent à l'échelle des temps géologiques.

Un large continent en position polaire est notamment propice à la formation d'une calotte glaciaire dont l'albédo élevé peut entretenir et amplifier une glaciation.

Définition 7 : rétro-action positive

Phénomène qui agit sur ses causes de manière à les amplifier.

Exemple : lors des deux derniers épisodes de pangée (durant lesquelles les masses continentales se sont rassemblées), une grande partie des supercontinents formés était située à de hautes latitudes et donc recouverte par une immense calotte polaire (voir figure 4.2 page 285).

Remarque : la fonte de la banquise Arctique et des calottes polaires Groenlandaise et Antarctique, en diminuant l'albédo de la Terre, accélère le réchauffement climatique : c'est une rétro-action positive.

La répartition des masses continentales influe également sur le climat en modifiant la circulation océanique, qui transfère l'énergie de l'équateur vers les pôles : une circulation océanique latitudinale (N-S) empêche la formation de calottes importantes au pôle tandis qu'une circulation longitudinale (E-W) la favorise.

▶ POUR ALLER PLUS LOIN

Aujourd'hui, la circulation océanique est latitudinale dans l'hémisphère Nord, avec des courants chauds comme le Gulf Stream qui montent des régions équatoriales et permettent un climat doux en Europe ; elle est longitudinale dans l'hémisphère Sud, avec un courant circulaire froid qui isole thermiquement l'Antarctique.

Cela n'a pas toujours été le cas : l'Antarctique s'est détachée de l'Amérique il y a 40-25 Ma et de l'Australie il y a 35-30 Ma, permettant la mise en place de ce courant longitudinal. C'est justement à cette époque que se met en place la calotte Antarctique.

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

À RETENIR

Le climat n'est pas indépendant de la dynamique interne de la Terre. En modifiant la teneur en CO₂ de l'atmosphère et la position des continents avec un rythme de quelques centaines de millions d'années, les cycles orogéniques génèrent des bouleversements durables et globaux de la température sur Terre. Ainsi, les périodes de fragmentation continentale sont caractérisées par un climat chaud tandis que les périodes d'orogénèse sont plutôt associées à de grandes glaciations.

Voir exercice 9 page 330.

4 Une modification des interactions entre réservoirs de carbone

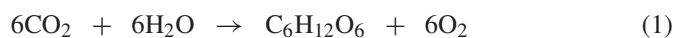
D'autres réservoirs de carbone existent : l'océan contient 140 000 milliards de tonnes de CO₂, soit 50 fois plus que l'atmosphère. Par ailleurs, les êtres vivants interviennent à de multiples reprises dans le cycle du carbone : photosynthèse, respiration, etc.

PROBLÉMATIQUE

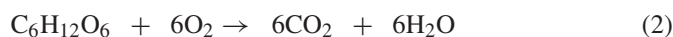
Quelle est l'importance des interactions entre réservoirs biologiques et géologiques de carbone sur les variations du climat ?

4.1 Les plantes piègent le dioxyde de carbone en réalisant la photosynthèse

Lors de la photosynthèse, les plantes, les algues et certaines bactéries convertissent le CO₂ atmosphérique en molécules organiques telles que le glucose selon l'équation simplifiée suivante :



Cette matière organique est consommée par la plante elle-même, par les herbivores ou par des décomposeurs afin de produire leur énergie grâce à la respiration cellulaire :



Au bilan, les équations (1) et (2) se compensent : la teneur en CO₂ atmosphérique reste constante.

Il peut cependant arriver que des plantes ou des algues se trouvent brutalement enfouies dans des sédiments.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

En l'absence de dioxygène, la respiration ne peut pas se faire et la matière organique est donc à l'abri de la plupart des décomposeurs. Si les conditions sont réunies, cette matière organique peut alors se transformer en *roches carbonées* (pétrole ou charbon).

Ces roches sont alors stockées durablement dans la croûte continentale ou absorbées dans le manteau lors de la subduction. Inversement, tout le CO₂ qu'elles représentent est soustrait à l'atmosphère.

Or ce phénomène ne s'est pas produit de manière constante au cours de l'histoire de la Terre : au Carbonifère par exemple (il y a 360-300 Ma), une végétation composée de forêts luxuriantes très denses se met en place dans les régions équatoriales de la Pangée. Des variations rapides du niveau des eaux, des apports importants de sédiments issus de l'érosion de la chaîne hercynienne et l'absence de décomposeurs participent alors à sauvegarder une partie de cette végétation dans les sédiments.

Voir exercice 9 page 330.

Exemple : les nombreuses mines de charbon qui ont permis la révolution industrielle en France, en Angleterre et en Allemagne ont été creusées dans des grands gisements datant de cette époque.

On estime que cette fossilisation importante de matière carbonée est un des principaux facteurs expliquant la glaciation qui a suivi.

Inversement, en brûlant du pétrole ou du charbon, l'être humain réintroduit brutalement dans l'atmosphère du CO₂ qui y avait été soustrait par des phénomènes se déroulant sur des échelles de temps très longues.

➡ À RETENIR

Les êtres vivants, en absorbant ou en rejetant du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, peuvent participer à d'importants bouleversements du climat.

Remarque : ce sont également des êtres vivants photosynthétiques, les cyanobactéries, qui ont produit la majorité de l'O₂ de notre atmosphère et indirectement l'O₃ de notre couche d'ozone.

4.2 De multiples rétroactions positives amplifient les variations du climat

Nous avons vu que le rythme des oscillations du climat au Quaternaire pouvait être expliqué par les variations cycliques des paramètres orbitaux de la Terre. Pour autant, les variations du climat associées ne sont pas des oscillations entre périodes plutôt chaudes et plutôt froides, mais des alternances brutales entre périodes glaciaires et périodes interglaciaires.

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

? PROBLÉMATIQUE

Quels mécanismes expliquent la soudaineté des transitions entre périodes glaciaires et interglaciaires au Quaternaire ?

Les carottes forées dans les glaces des calottes polaires fournissent des bulles d'air supposées représentatives de l'atmosphère à l'époque où s'est déposée la glace. L'analyse du gaz contenu dans ces bulles permet de mettre en évidence une corrélation très fine entre la température donnée par le thermomètre isotopique (voir Chapitre 9) et la concentration en CO_2 et CH_4 dans l'atmosphère à cette époque.

Remarque : les concentrations en CO_2 et CH_4 sont exprimées en *ppmv* (Parties Par Million en Volume, soit $10^{-4} \%$) : en 2019, 0.0415 % du volume de l'atmosphère était occupé par du dioxyde de carbone, soit 415 ppmv.

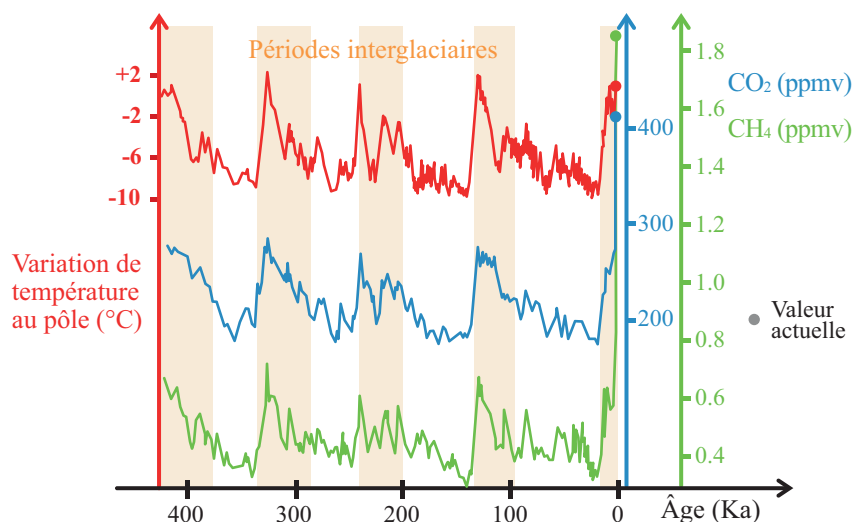


Figure 10.8 – Concentration en gaz à effet de serre dans les bulles de gaz et température déduite des carottes de glaces à Vostok (Antarctique)

Les oscillations de température au Pléistocène s'expliquent pourtant en l'absence d'intervention du CO_2 , par l'existence d'oscillations des paramètres orbitaux de la Terre. À cette échelle de temps, les variations de la concentration en CO_2 semblent donc être déclenchées par les oscillations du climat.

La Terre connaît actuellement un réchauffement rapide dû au relargage de CO_2 par les activités humaines. De nombreux mécanismes ont tendance à amplifier ce phénomène : ce sont des *rétro-actions positives*. Par exemple :

- la fonte des permafrost (en français « pergélisols » : sols gelés en permanence) rend accessible la matière organique piégée, favorisant ainsi la respiration de nombreux organismes qui libèrent alors du CO_2 ;

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- la solubilité des gaz étant plus importante lorsque la température est basse, le CO_2 est moins bien absorbé par les océans et reste alors dans l'atmosphère.

► POUR ALLER PLUS LOIN

Une grande quantité de méthane CH_4 est stockée sous la forme de glace dans les pergélisols et les océans (on parle de *clathrates* ou d'*hydrates de méthane*). Le réchauffement de ces derniers vaporise le méthane qui se retrouve dans l'atmosphère où il participe fortement à l'effet de serre et/ou s'oxyde en CO_2 .

La fonte des glaces a tendance à diminuer l'albédo dans certaines régions polaires, ce qui accélère encore le réchauffement du climat.

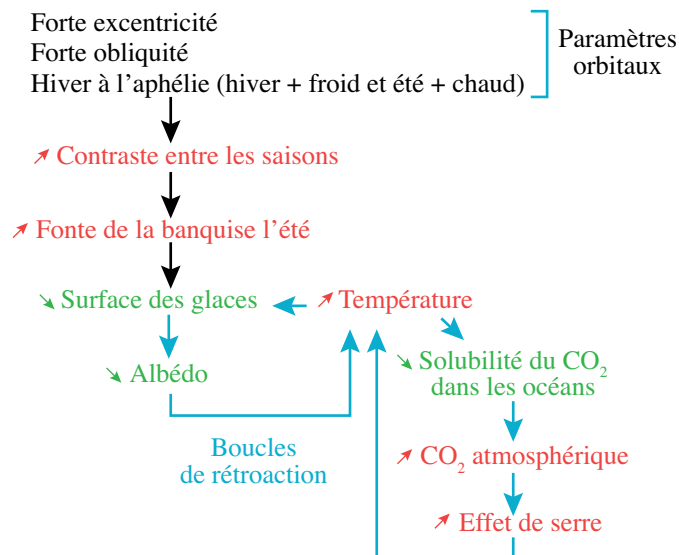


Figure 10.9 – Installation d'une période glaciaire et amplification du phénomène

Au Pléistocène, ces différents phénomènes participaient à amplifier le réchauffement dû aux cycles de Milanković. En empêchant toute situation intermédiaire « tiède », ils expliquent la transformation des oscillations complexes du forçage orbital en une simple alternance entre périodes glaciaires et interglaciaires.

Voir exercices 7 et 10 pages 328 et 332.

➡ À RETENIR

À part dans le cas du réchauffement climatique actuel, le CO_2 ne semble pas être la cause initiale des oscillations du climat au Quaternaire, mais plutôt être à l'origine d'une amplification de leur rapidité et de leur ampleur.

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

4.3 Des rétroactions négatives maintiennent le climat à long terme

PROBLÉMATIQUE

Quels phénomènes mettent fin aux boucles d'auto-amplification des variations du climat ?

Une des inquiétudes liées au réchauffement climatique concerne la multiplication des événements climatiques extrêmes. S'ils sont catastrophiques pour l'être humain, ceux-ci ont toutefois une grande importance à l'échelle des temps géologiques : en générant une érosion accrue des continents, ils accélèrent l'absorption du CO_2 , qui retrouve sa concentration initiale en quelques dizaines de milliers d'années.

Inversement, lors des grandes glaciations, l'érosion, limitée sous les calottes, ne compense plus l'émission de dioxyde de carbone par le volcanisme. Du CO_2 s'accumule donc dans l'atmosphère jusqu'à provoquer un réchauffement qui déclenche la sortie de glaciation.

Exemple : les grandes variations du climat que nous avons évoquées au long de ces deux chapitres sont finalement d'ampleur assez limitée : $\approx +8^\circ\text{C}$ au Crétacé ; $\approx -3^\circ\text{C}$ au Carbonifère. On s'attend à connaître un réchauffement du même ordre d'ici la fin du XXI^e siècle.

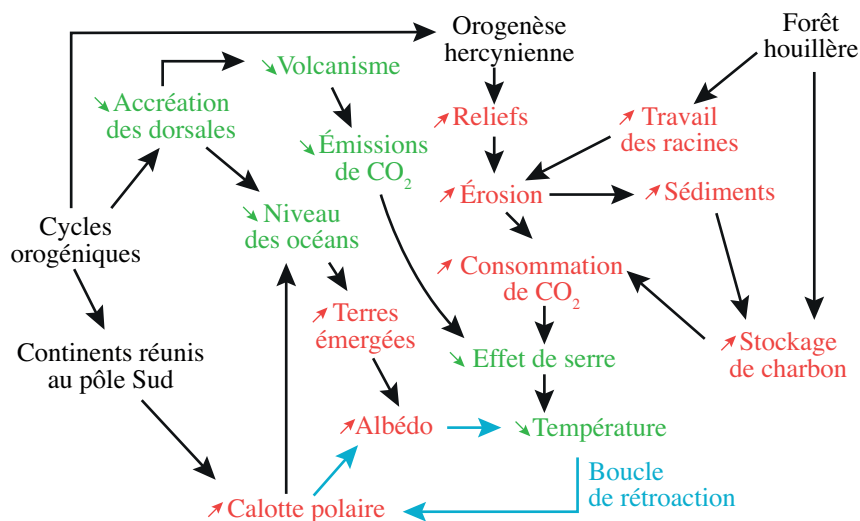


Figure 10.10 – Exemple : diversité des paramètres ayant pu participer à la glaciation Carbonifère

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Remarque : ces rétro-actions négatives agissent aux échelles de temps géologiques. C'est en règle générale suffisant pour maintenir un climat relativement constant sur Terre, mais leur impact est anodin à court terme dans le cadre du bouleversement brutal que nous connaissons actuellement.

➡ **À RETENIR**

Les variations du climat font intervenir des interactions complexes entre lithosphère, biosphère, atmosphère, hydrosphère et cryosphère (ensemble des glaces terrestres). À court terme, ces interactions sont fréquemment des rétro-actions positives : les oscillations du climat suivent une dynamique d'auto-amplification. À long terme, ce sont les rétro-actions négatives qui dominent, permettant de maintenir le climat dans une étroite fourchette favorable au maintien de la vie sur Terre.

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

1 QCM Vérification de connaissances

5 min

Corrigé
p. 335

Pour chacune des questions suivantes, plusieurs propositions de réponses sont faites dont une seule est correcte. Laquelle ?

- 1 Les variations climatiques au Pléistocène ont été déclenchées par des modifications :
 - a de la quantité de lumière réfléchie par la Terre (l'albédo terrestre) ;
 - b de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre ;
 - c des paramètres orbitaux de la Terre (paramètres de Milankovitch) ;
 - d de la flore terrestre.
- 2 La teneur en CO₂ des bulles d'air hébergées par les glaces polaires révèle que la concentration en CO₂ atmosphérique :
 - a est restée quasiment constante jusqu'à la révolution industrielle ;
 - b était nulle jusqu'à la révolution industrielle ;
 - c varie cycliquement et naturellement selon une périodicité de 100 000 ans ;
 - d est particulièrement basse actuellement.

2 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 335

Qui suis-je ?

- 1 Piégeage par l'atmosphère d'une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre.
- 2 Effet sur le climat d'une modification de l'équilibre radiatif de la Terre.
- 3 Phénomène géologique à l'origine d'une diminution de la quantité de CO₂ atmosphérique.
- 4 Phénomène biologique consommant du CO₂ atmosphérique.
- 5 Proportion de lumière solaire réfléchie par la Terre.
- 6 Époque récente des temps géologiques caractérisée par une alternance entre périodes glaciaires et interglaciaires.

3 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 335

Cherchez l'intrus :

- 1
 - a Excentricité de l'orbite terrestre.
 - b Obliquité de l'axe de rotation de la Terre.
 - c Éruptions solaires.
 - d Précession des équinoxes.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 2 ☐ a Photosynthèse.
☐ b Formation de calottes polaires.
☐ c Érosion des continents.
☐ d Dissolution dans les océans.
- 3 ☐ a Fonte des clathrates.
☐ b Fonte des permafrost.
☐ c Fracturation continentale.
☐ d Réchauffement des océans.
- 4 ☐ a Désintégration radioactive des éléments du manteau.
☐ b Modification de l'albédo.
☐ c Volcanisme.
☐ d Forçage orbital.

4 V/F Vérification des connaissances

5 min

Corrigé
p. 336

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

- 1 Le climat froid du Carbonifère :
☐ a s'explique par le rejet important de CO₂ par la forêt houillère ;
☐ b est corrélé avec un regroupement des continents sous la forme d'une pangée ;
☐ c peut en partie s'expliquer par une diminution du forçage orbital terrestre ;
☐ d s'explique en partie par une diminution de l'albédo terrestre.
- 2 Le climat chaud du Crétacé :
☐ a a eu pour conséquence une importante activité volcanique ;
☐ b est contemporain d'une époque où la teneur en CO₂ atmosphérique était basse ;
☐ c s'explique notamment par l'ouverture de nombreux océans.
- 3 Les variations climatiques aux grandes échelles de temps :
☐ a sont en relation avec des modifications de la teneur en CO₂ atmosphérique ;
☐ b sont caractérisées par l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires ;
☐ c sont en relation avec les cycles orogéniques.

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

5 Vérification des connaissances



10 min

Corrigé
p. 336

Expliquez brièvement les affirmations suivantes :

- 1 Albédo et effet de serre sont les principales rétroactions positives agissant sur le climat.
- 2 Le regroupement des masses continentales sous la forme d'une pangée est susceptible de provoquer l'entrée en glaciation.
- 3 Les paramètres orbitaux de la Terre peuvent modifier le climat terrestre sans modifier l'énergie solaire moyenne reçue par la Terre.

6 Climats passés — CO₂



10 min

Corrigé
p. 337

Lycée Blaise Pascal, Orsay

Pour connaître l'évolution de la concentration en CO₂ atmosphérique au cours des derniers millions d'années, on fait appel à une relation entre l'indice stomatique IS (rapport entre le nombre de stomates et le nombre de cellules épidermiques d'une feuille) et la concentration en CO₂.

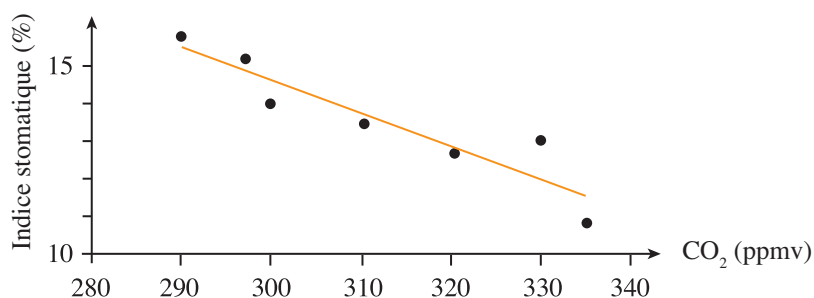


Figure 10.11 – Document 1 : Évolution de l'indice stomatique en fonction de la concentration en CO₂

Cette courbe a été obtenue par des mesures sur des feuilles de végétaux des 120 dernières années (pour lesquelles on dispose de mesures de la concentration en CO₂ atmosphérique).

- 1 La pente de la courbe vous paraît-elle logique ? Expliquez pourquoi le nombre de stomates diminue quand la concentration en CO₂ augmente.
- 2 La courbe précédente a pour équation :

$$IS (\%) = -0,09 [CO_2] (\text{ppmv}) + 41,6.$$

Autour de 5 à 8 millions d'années avant notre ère, les végétaux fossiles présentent des indices stomatiques compris entre 16% et 12%. En supposant la relation entre indice stomatique et [CO₂] vérifiée à cette époque, estimez quelle était alors la concentration en CO₂. Quel devait être le climat ?

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 3 On trouve sur certains végétaux fossiles des indices stomatiques de 9%. Quelle était la concentration en CO_2 à l'époque de leur formation ? Quel devait être le climat ?

7 Climat — CO_2



15 min

Corrigé
p. 338

Lycée Thiers, Marseille

La figure suivante montre l'enregistrement dans la calotte Antarctique des variations de température et de la teneur en CO_2 atmosphérique.

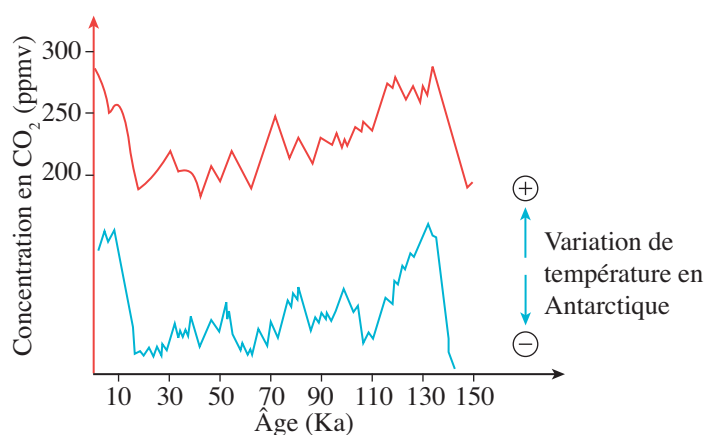


Figure 10.12 – Évolution de la température en Antarctique et de la concentration en CO_2 atmosphérique au cours des 150 000 dernières années

- 1 Expliquez comment on peut avoir accès aux concentrations passées en CO_2 atmosphérique.
- 2 Explicitez le relation entre l'évolution des températures et la concentration en CO_2 atmosphérique.

Le document précédent concernait un point précis dans l'Antarctique. La figure suivante présente l'évolution du $\delta^{18}\text{O}$ des Foraminifères d'une carotte marine prélevée dans le Pacifique.

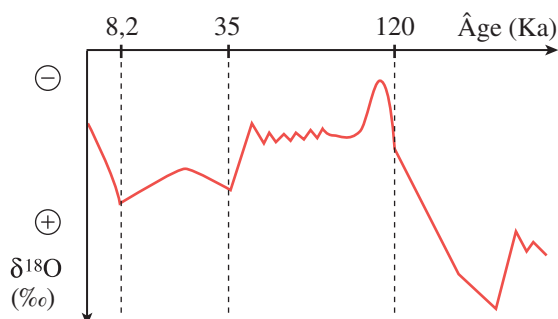


Figure 10.13 – Évolution du $\delta^{18}\text{O}$ de Foraminifères provenant du Pacifique

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

- 3** Expliquez en quoi l'étude du $\delta^{18}\text{O}$ des Foraminifères peut renseigner sur l'évolution des températures. Les résultats obtenus sur cette carotte concordent-ils avec ceux obtenus en Antarctique ? Que pouvez-vous dire de l'évolution du climat des 150 000 dernières années ?
- 4** La figure suivante montre l'évolution de la concentration atmosphérique en CO_2 au cours du dernier millénaire.

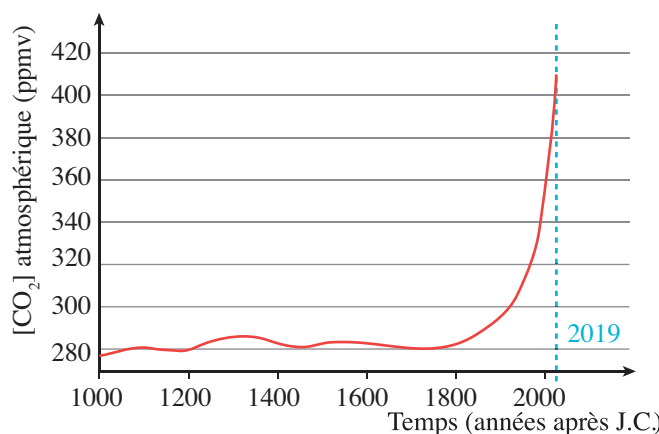


Figure 10.14 – Évolution de la concentration en CO_2 au cours du dernier millénaire

Quelle est la cause de l'augmentation de cette concentration ? Quelle peut être la conséquence de cette augmentation sur le climat du siècle prochain ?

8 Climat – Crétacé



15 min

Corrigé
p. 339

Lycée Masséna, Nice

Tirez des documents proposés les informations permettant de caractériser le climat du Crétacé et celles permettant de proposer une explication à ce climat.

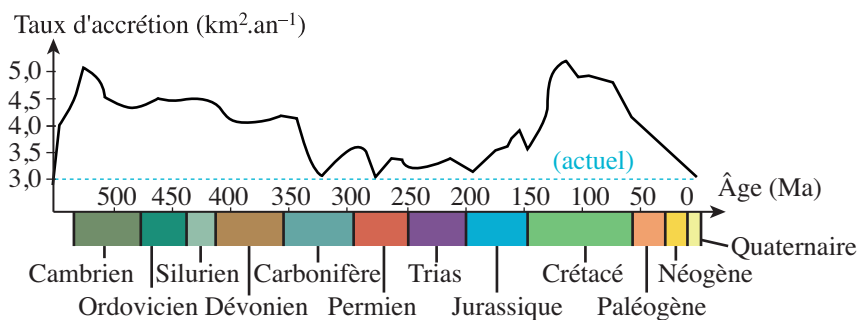


Figure 10.15 – Document 2 : taux d'accrétion au niveau des dorsales océaniques depuis 600 Ma

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

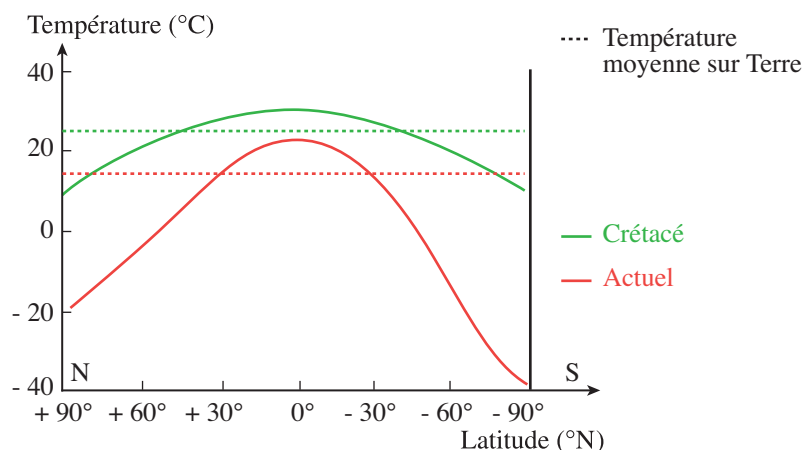


Figure 10.16 – Document 1 : reconstitution de la température moyenne et de la distribution latitudinale des températures au Crétacé, comparées aux températures actuelles

9 Climat – Carbonifère



30 min

Corrigé
p. 339

Lycée Balzac, Caen

Le Carbonifère est une période du Paléozoïque (ère Primaire) qui s'étale d'environ 360 à 300 millions d'années avant l'époque actuelle. Il est caractérisé, notamment en France, par la formation d'importants gisements de charbon et l'édification d'une grande chaîne de montagnes comparable à l'Himalaya actuel : la chaîne hercynienne.

On cherche à identifier et à comprendre les grands bouleversements climatiques qui ont marqué cette époque.

En utilisant les documents et vos connaissances, retracez les grandes lignes de l'évolution climatique mondiale durant cette époque.

Vous proposerez une explication à cette évolution par la mise en relation de ces mêmes documents.



Figure 10.17 – Document 1 : vue d'artiste d'une forêt houillère au Carbonifère

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

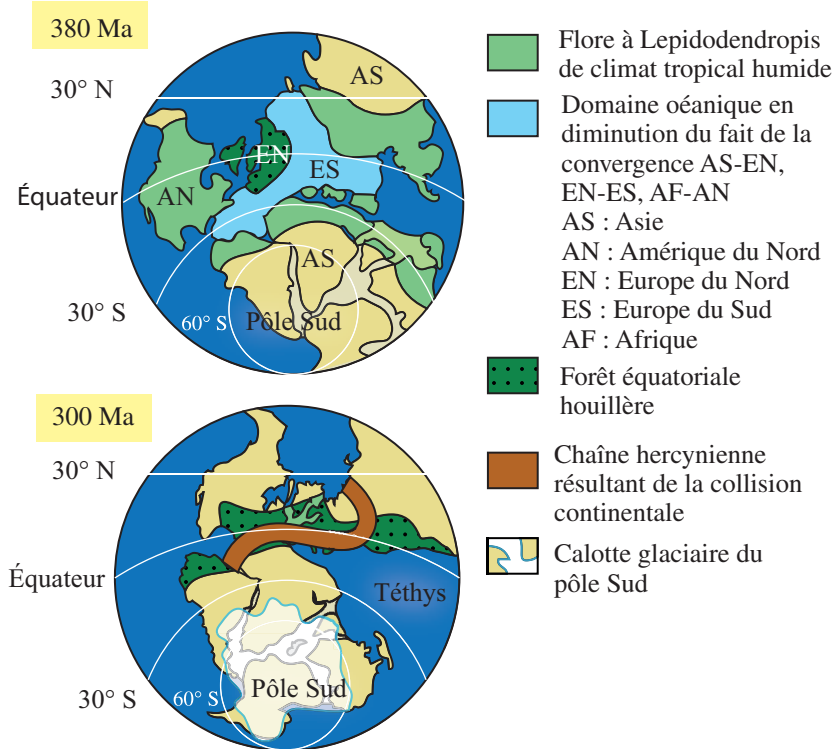


Figure 10.18 – Document 2 : reconstitutions de la géographie mondiale au début et vers la fin du Carbonifère

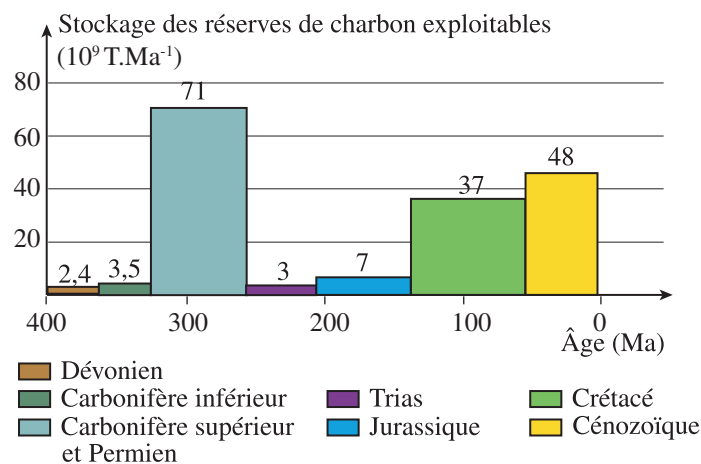


Figure 10.19 – Document 3 : réserves de charbon exploitables en milliards de tonnes déposées par tranches d'un million d'années (plus la période est ancienne, plus on sous-estime cette accumulation car une partie de la matière organique a pu être recyclée depuis)

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

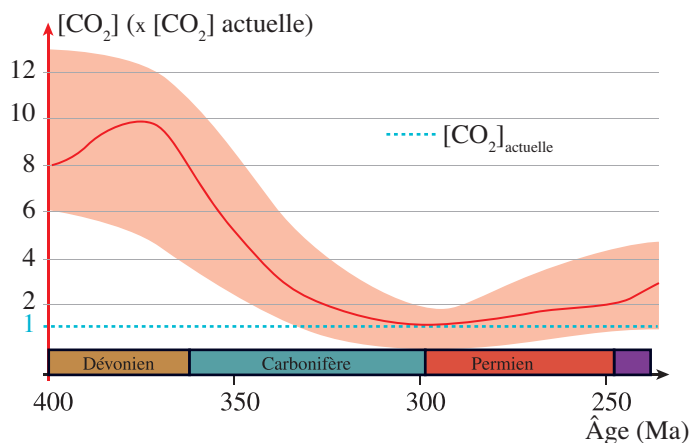


Figure 10.20 – Document 4 : estimation de la quantité de CO_2 atmosphérique entre -400 et -250 millions d'années, exprimée en fonction de sa valeur actuelle

10 Climat – Pléistocène



30 min

Corrigé
p. 341

Lycée Bourdelle, Montauban

On se propose d'étudier les changements climatiques de la Terre depuis les 600 000 dernières années (hors période contemporaine).

À partir des informations tirées des documents et de leur mise en relation, caractérisez les variations climatiques et proposez une hypothèse quant au rôle des différents acteurs ayant contribué aux changements climatiques au Pléistocène.

Document 1

Variations relatives de la température du pôle calculées à partir des mesures isotopiques du $\delta^{18}\text{O}$ réalisées dans les glaces des carottes de Vostok (pôle Nord).

$$\Delta T = T_{\text{passé}} - T_{\text{présent}}$$

L'âge est mesuré en milliers d'années.

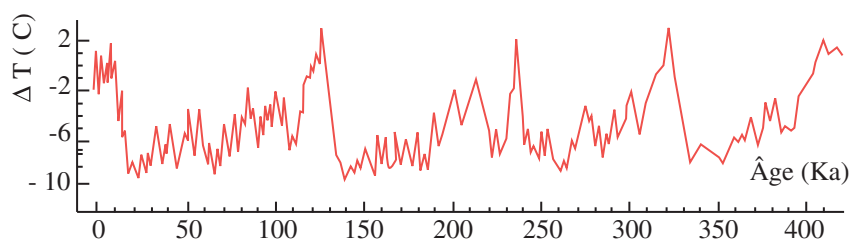


Figure 10.21 – Variations de température au pôle calculées à partir des mesures isotopiques sur les carottes de glace de Vostok

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

Document 2

Variations moyennes du $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates de sédiments marins profonds. Ces mesures ont été réalisées sur différents forages profonds.

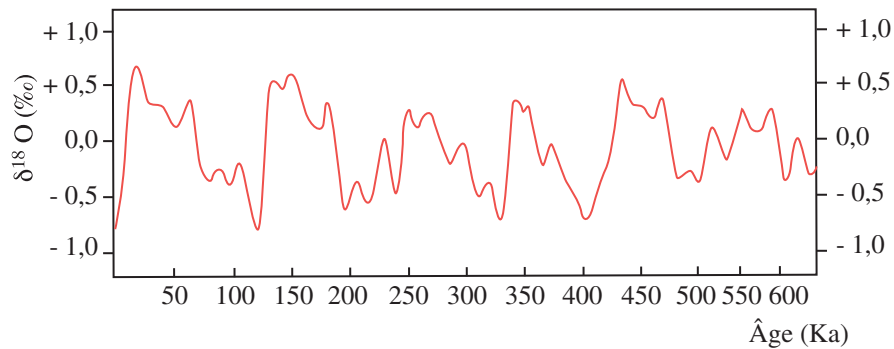


Figure 10.22 – $\delta^{18}\text{O}$ moyen des sédiments carbonatés marins profonds

Document 3

Variation au cours du temps de l'énergie reçue par unité de surface terrestre en un lieu et sur une période choisie arbitrairement. Il s'agit ici d'une moyenne sur 24h au solstice d'été (le 21 juin) en un point situé à 45° de latitude nord.

On a mis cette courbe en parallèle avec la variation du $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates de carottes de sédiments marins profonds. Pour faciliter la lecture de cette figure, l'axe du $\delta^{18}\text{O}$ est orienté du haut vers le bas (axe vertical à droite de la figure).

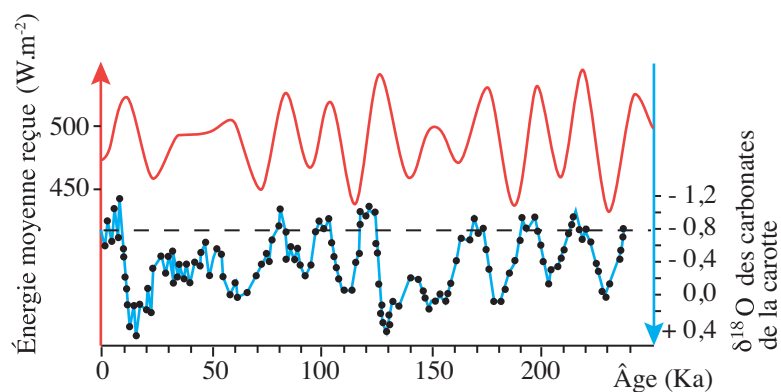


Figure 10.23 – Variation au cours du temps de l'énergie reçue par la Terre et du $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates d'une carotte de sédiments marins profonds

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Document 4

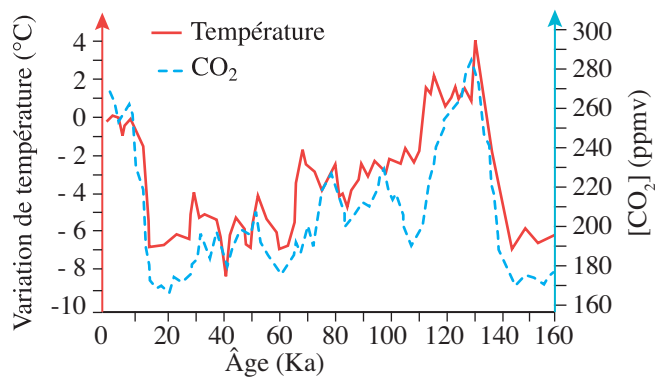


Figure 10.24 – Évolution de la température de l'air et de la teneur en CO₂ au cours des 160 000 dernières années

Document 5

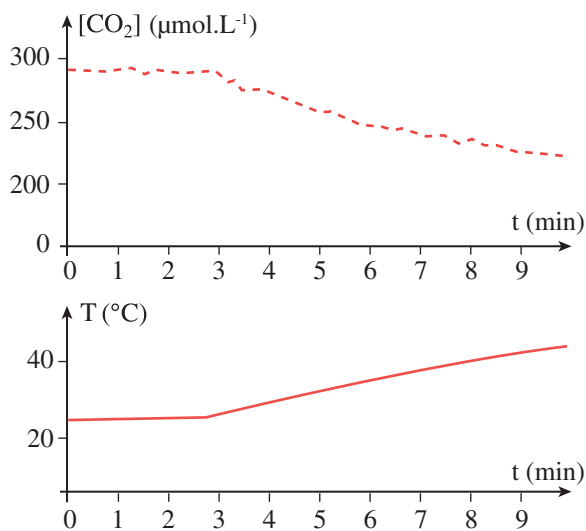


Figure 10.25 – Quantité de CO₂ dissout dans l'eau en fonction de la température

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

1 QCM Vérification de connaissances

➔ Énoncé
p. 325

- 1 **a** et **b** *Faux*. Ces modifications ne font en général qu'amplifier des variations du climat.
c *Vrai*. Elles sont causées par une modification du forçage orbital due à une oscillation des paramètres orbitaux de la Terre.
d *Faux*. Les modifications de flore observées dans les diagrammes polliniques ne sont qu'une conséquence des variations du climat.
- 2 **a** *Faux*. La teneur en CO₂ atmosphérique a connu des variations cycliques au Pléistocène, associées aux alternances entre périodes glaciaires et interglaciaires.
b *Faux*. La teneur en CO₂ atmosphérique n'a jamais été inférieure à 180 ppmv, soit environ la moitié de son taux actuel.
c *Vrai*. Une augmentation du taux de CO₂ a participé à précipiter l'entrée en période interglaciaire suite à la variation cyclique des paramètres orbitaux de la Terre tous les 100 000 ans.
d *Faux*. Du fait des activités anthropiques qui émettent du CO₂ en grande quantité, elle a atteint 415 ppmv en 2019, soit 130 ppmv de plus qu'en période interglaciaire normale et 220 de plus qu'en période glaciaire moyenne.

2 Vérification des connaissances

➔ Énoncé
p. 325

- 1 Effet de serre.
- 2 Forçage radiatif.
- 3 Érosion.
- 4 Photosynthèse.
- 5 Albédo.
- 6 Pléistocène (première époque du Quaternaire).

3 Vérification des connaissances

➔ Énoncé
p. 325

- 1 **c** Éruptions solaires. Il s'agit d'un paramètre décrivant l'activité solaire (à l'origine d'un forçage solaire sur le climat), tandis que les trois autres sont des paramètres orbitaux de la Terre (à l'origine d'un forçage orbital sur le climat).
- 2 **b** Formation de calottes polaires. Les trois autres sont des mécanismes permettant de diminuer la quantité de CO₂ atmosphérique.
- 3 **c** Fracturation continentale. Il s'agit d'un phénomène libérant du CO₂ dans l'atmosphère indépendamment des variations du climat. Les trois autres sont des rétroactions positives libérant du CO₂ suite à un réchauffement du climat.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- 4 **a** Désintégration radioactive des éléments du manteau. Il s'agit de la principale source d'énergie de la Terre interne, sans effet sur l'atmosphère. Les trois autres sont des mécanismes à l'origine de modifications du climat.

4 V/F Vérification des connaissances

Énoncé
p. 326

- 1 **a** *Faux*. Le climat froid du Carbonifère s'explique en partie par le pré-lèvement important de CO₂ par la forêt houillère et sa fossilisation sous la forme de charbon.
b *Vrai*. Ceci s'explique par la consommation de CO₂ lors de l'érosion des chaînes de montagnes associées.
c *Faux*. Les modifications du forçage orbital terrestre concernent des périodes de temps de l'ordre de 0.1 Ma, or cette glaciation a duré plusieurs dizaines de millions d'années.
d *Faux*. Il s'explique en partie par une augmentation de l'albédo terrestre : pour refroidir le climat il faut augmenter la quantité d'énergie solaire réfléchie, c'est-à-dire l'albédo.
- 2 **a** *Faux*. Le climat chaud du Crétacé a pour cause une importante activité volcanique : il s'explique notamment par la grande quantité de CO₂ que celle-ci a libéré.
b *Faux*. La concentration en CO₂ atmosphérique était beaucoup plus forte que l'actuelle.
c *Vrai*. Le volcanisme évoqué est un volcanisme de dorsale associé à une forte accréation océanique.
- 3 **a** *Vrai*. On observe une bonne corrélation entre ces deux données.
b *Faux*. L'alternance entre période glaciaire et interglaciaire ne se produit que pendant les périodes de glaciation. On observe par contre une alternance entre périodes de glaciation et périodes où la Terre est dépourvue de calottes polaires.
c *Vrai*. Les périodes de fracturation continentale sont associées à un climat plutôt froid ; les périodes de collision continentale à un climat plutôt chaud.

5 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 327

- 1 Lors d'une modification du climat, plusieurs rétroactions positives se mettent en place. Par exemple lors d'un réchauffement :
- différents réservoirs de gaz à effet de serre se mettent à en libérer : diminution de leur solubilité dans les océans, fonte des hydrates de méthane (« clathrates »), décomposition de la matière organique contenue dans les pergélisols (« permafrost »), etc. ;

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

- les surfaces à fort albédo, glaciers continentaux et glace de mer (appelée banquise), se mettent à fondre.

Or la présence de gaz à effet de serre dans l'atmosphère augmente le forçage radiatif terrestre, tandis que l'albédo est un important paramètre de l'équilibre radiatif de la Terre, participant à renvoyer une partie non négligeable d'énergie solaire incidente ($\approx 30\%$). Dans les deux cas, augmentation de l'effet de serre comme diminution de l'albédo, la Terre émet alors moins d'énergie qu'elle n'en reçoit : elle se réchauffe encore plus.

- 2 Le regroupement des masses continentales sous la forme d'une pangée se produit à la faveur d'épisodes d'orogénèse, à l'origine de la mise en place d'importantes chaînes de montagnes. Or l'érosion de ces reliefs consomme du CO₂ lors de l'altération des minéraux.
Par ailleurs, cette pangée peut également favoriser la persistance d'immenses glaciers continentaux dont l'albédo important réfléchit une grande quantité de lumière solaire.
- 3 Quelle que soit la forme de l'orbite de la Terre ou sa position sur cette orbite, sa distance moyenne au Soleil sur une année reste la même, donc l'énergie moyenne annuelle reçue par le globe terrestre reste constante. Les paramètres orbitaux sont toutefois susceptibles de modifier l'amplitude des variations saisonnières (donnant des étés plus frais et des hivers plus doux, ou inversement), ce qui peut déclencher différentes rétroactions positives (fonte des permafrost, fonte de la banquise arctique, etc.) susceptibles de modifier le climat terrestre.

6 Climats passés — CO₂

➔ Énoncé
p. 327

Lycée Blaise Pascal, Orsay

- 1 Le graphique montre une relation linéaire entre concentration en CO₂ atmosphérique et indice stomatique : plus la concentration en CO₂ est importante, plus l'indice stomatique est faible. Cette relation paraît logique : plus il y a de CO₂ atmosphérique moins la plante a besoin de stomates pour en capter la même quantité. Elle peut donc diminuer le nombre de stomate présents par feuilles, ce qui permet de limiter les pertes d'eau par évapotranspiration.
- 2 On doit inverser l'équation fournie : $[\text{CO}_2] = (41,6 - \text{IS})/0,09$. L'application numérique pour des indices stomatiques de 16% et 12% donne des concentrations en CO₂ de 284 et 329 ppmv, respectivement.

⚠ ATTENTION

On demande un « climat global », c'est-à-dire non pas un *climat* local (tempéré, etc.) mais une variation de température par rapport à l'actuelle.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

 MÉTHODE

La courbe a vraisemblablement été tracée à partir de mesures effectuées aux XIX^e et XX^e siècles, pour lesquels on connaît le climat. Les valeurs de [CO₂] trouvées peuvent donc nous donner une idée du climat passé comparé au climat à l'époque où ont été réalisées ces mesures.

Des valeurs de 284 et 329 ppmv sont dans la fourchette des données du graphique. Le climat correspondant était donc a priori proche de l'actuel.

- 3** Un indice stomatique de 9% traduit une teneur en CO₂ égale à 362 ppmv. Cette valeur étant plus haute que celles mesurées dans le document 1, on peut faire l'hypothèse d'un climat plus chaud à cette époque.

Remarque : la courbe s'arrête à 335 ppmv donc elle a été tracée à partir de mesures s'étalant jusque dans les années 1990 (voir figure 10.14 page 329). Une teneur en CO₂ égale à 362 ppmv indique donc un climat plus chaud que cette période mais moins que celui que l'on s'attend à connaître au XXI^e, le seuil des 400 ppmv ayant été dépassé en 2014.

7 Climat — CO₂

 **Énoncé**
p. 328

Lycée Thiers, Marseille

- 1** La composition de l'atmosphère au cours du temps est déduite de l'analyse des bulles d'air piégées dans la glace extraite de forages dans les calottes polaires. Ceci est valable aux époques pour lesquelles on dispose encore de dépôts de glace, c'est-à-dire au maximum les derniers 800 Ka.
- 2** Le document proposé montre une nette corrélation entre les variations de la température calculée grâce au thermomètre isotopique (voir Chapitre 9, notamment exercice 7 page 294) et celles de la concentration en CO₂ atmosphérique. Cette corrélation peut être expliquée par des relations de cause à effet dans les deux sens :
- le CO₂ est un gaz à effet de serre : une élévation de sa concentration augmente donc le forçage radiatif, ce qui a un effet réchauffant sur le climat ;
 - la solubilité du CO₂ dans l'océan diminue lorsque la température augmente et la fonte des permafrost et des hydrates de méthane libère du CO₂ : un réchauffement du climat provoque donc un relargage de CO₂ dans l'atmosphère.
- 3** La figure proposée montre une élévation importante et exponentielle de la teneur en CO₂ atmosphérique depuis le début du XIX^e siècle : la teneur en CO₂ était stable à 280±5 ppmv entre 1 000 et 1 800, et augmente exponentiellement depuis pour atteindre 415 ppmv en 2019.

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

Cette augmentation, amorcée à l'époque de la révolution industrielle, est due à l'utilisation par l'homme de combustibles fossiles (charbon, pétrole,...) pour produire de l'énergie.

La principale conséquence de cette augmentation peut être une hausse de l'effet de serre donc une perturbation de l'équilibre radiatif de la Terre avec à terme un réchauffement du climat. Ce réchauffement a déjà dépassé 1°C dans la deuxième décennie du XXI^e siècle.

8 Climat – Crétacé

Énoncé
p. 329

Lycée Masséna, Nice

MÉTHODE

Hiérarchiser votre réponse :

- (1) des observations chiffrées (document 1) ;
- (2) une explication possible (document 2).

D'après le document 1, la température moyenne était d'environ 25°C au Crétacé, contre 16°C actuellement. La courbe suggère également que les variations de la température avec la latitude étaient deux fois plus faibles : de l'ordre de 20°C contre plus de 40°C actuellement. Ainsi, le climat du Crétacé était un climat chaud caractérisé par de faibles amplitudes thermiques entre l'équateur et les pôles.

Le document 2 montre en parallèle qu'au Crétacé, les dorsales océaniques connaissent un pic d'activité : leur taux d'accrétion est presque doublé par rapport aux périodes précédentes et à la période actuelle. Il est ainsi d'environ 5 km².an⁻¹ entre 135 Ma et 75 Ma, c'est-à-dire pendant la quasi-totalité de la période du Crétacé, contre environ 3 km².an⁻¹ actuellement.

Ces dorsales étant à l'origine d'un important magmatisme, on en déduit que ce dernier était particulièrement important au Crétacé. Or le magmatisme s'accompagne d'une libération importante de gaz à effet de serre (CO₂ notamment) provenant du dégazage du manteau, de loin le plus gros réservoir de carbone sur Terre. Ces gaz ont ainsi pu participer à augmenter l'effet de serre, contribuant à réchauffer l'atmosphère de près de 10°C par rapport à aujourd'hui.

9 Climat – Carbonifère

Énoncé
p. 330

Lycée Balzac, Caen

« *Retracez les grandes lignes de l'évolution climatique mondiale durant cette époque* »

L'étude du document 2 fournit quelques marqueurs du climat permettant de constater une évolution de la température globale au cours du Carbonifère.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

On observe notamment que peu avant le début de cette période (vers 380 Ma), une grande surface continentale était occupée par les forêts tropicales humides, et il n'y avait pas de calotte glaciaire. Ces deux caractéristiques témoignent d'un climat plutôt chaud, par rapport à l'actuel.

À la fin du Carbonifère (300 Ma), la forêt est restreinte à la zone équatoriale et on note le développement d'une calotte polaire étendue autour du Pôle Sud. Ces deux caractéristiques témoignent d'un refroidissement du climat avec entrée en glaciation. Celui-ci était même probablement plus froid qu'à l'actuel vu l'existence d'une calotte polaire de plus de deux fois la superficie de l'Antarctique (visible sur le document).

Le document 1 présente une vue d'artiste de la forêt houillère au Carbonifère à partir des fossiles datant de cette époque. On y observe une végétation luxuriante constituée d'arbres, de lianes et de fougères arborescentes. Le dessinateur a de plus représenté une grande quantité de biomasse morte au sol en train de sombrer dans ce qu'on imagine être un marécage, pour symboliser l'important piégeage de matière organique dans les sédiments à cette époque (voir document 3).

Le document 3, montre une augmentation globale du taux de stockage de charbon au cours du temps, d'environ $3 \times 10^9 \text{ t.Ma}^{-1}$ entre 400 et 200 Ma, il atteint $\approx 48 \times 10^9 \text{ t.Ma}^{-1}$ au Cénozoïque. Ce phénomène est expliqué dans le document : plus la période est ancienne, plus la matière organique a pu être recyclée depuis.

Malgré cette tendance, on observe un pic de stockage de charbon au Carbonifère Supérieur et au Permien, sans équivalent au cours des temps géologiques : la formation apparente de réserves de charbons bondit temporairement de 3.5 à $71 \times 10^9 \text{ t.Ma}^{-1}$ soit un taux de stockage 20 fois plus important.

Sachant que ce charbon résulte de la fossilisation de matière organique, on en déduit qu'à la fin du Carbonifère, une quantité importante de débris végétaux a échappé à la consommation par les phytophages et au recyclage par les décomposeurs grâce à un enfouissement rapide dans les sédiments.

Enfin, le document 4 montre une importante chute de la concentration en CO_2 atmosphérique estimée au Carbonifère. Alors qu'elle était de l'ordre de 10 fois l'actuelle au Dévonien, elle chute pour atteindre des taux comparables à la teneur actuelle, soit une diminution de l'ordre de 90% en $\approx 60 \text{ Ma}$.

MÉTHODE

Mettre en relation les informations apportées par les différents documents et les analyser à la lumière de vos connaissances pour expliquer le refroidissement connu à cette époque.

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

« Proposez une explication à cette évolution »

La période du Carbonifère connaît un important refroidissement du climat, mis en évidence notamment par la réduction des forêts tropicales et la mise en place d'une immense calotte polaire (document 1). Ce refroidissement est probablement dû à une diminution de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone, qui est divisée par 10 durant cette période (document 4). En effet, le CO_2 est un gaz à effet de serre dont la présence dans l'atmosphère participe à la réchauffer. Une diminution de la concentration en ce gaz entraîne donc un refroidissement du climat.

Plusieurs paramètres semblent avoir participé à cette chute de la quantité de CO_2 :

- l'orogénèse hercynienne, qui se produit à cette époque (document 1), met en place une vaste chaîne de montagnes dont l'érosion soutire du CO_2 à l'atmosphère par le biais des réactions chimiques de l'altération ;
- la forêt houillère, végétation luxuriante caractéristique de cette époque (document 1), subit une importante fossilisation qui se traduit par une importante formation de charbon (document 3). Or tout le carbone organique que cela représente avait été formé par photosynthèse à partir de CO_2 atmosphérique, diminuant d'autant sa concentration.

Ce refroidissement du climat est d'autant plus marqué que la présence d'un supercontinent autour du Pôle Sud (document 1) permet l'installation d'une immense superficie de glaciers continentaux qui augmentent l'albédo terrestre : le refroidissement s'intensifie.

Synthèse

Plusieurs événements géologiques et biologiques soustraient une grande quantité de CO_2 à l'atmosphère au Carbonifère, provoquant un important refroidissement du climat qui s'auto-amplifie à travers notamment une augmentation de l'albédo terrestre du fait de l'entrée en période de glaciation.

10 Climat – Pléistocène

Lycée Bourdelle, Montauban

➔ Énoncé
p. 332

MÉTHODE

Hiérarchiser sa réponse en fonction de l'énoncé : dans un premier temps on demande de décrire ; dans un second temps d'expliquer, en recherchant plusieurs causes et leurs rôles respectifs (déclenchement, amplification, etc.).

Le document 1 présente les variations de température à la station de Vostok en Antarctique, déduites de mesures isotopiques sur les carottes de glace. En faisant l'hypothèse que les variations observées révèlent des

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

tendances valables à l'échelle de la Terre, cette courbe met en évidence une température en général plus froide que l'actuelle durant les 400 derniers milliers d'années (de l'ordre de $6\pm 2^\circ\text{C}$ plus basse que l'actuelle). Ce climat froid est toutefois entrecoupé de courtes périodes de 10 à 20 milliers d'années pour lesquelles les températures se rapprochent de l'actuelle voire la dépassent de 1 à 2°C . C'est le cas il y a environ 325, 240, 125 et 10 Ka.

Cette observation correspond à l'alternance entre périodes glaciaires et interglaciaires tous les 100 Ka environ au Quaternaire.

Le document 2 fournit des résultats de mesures du $\delta^{18}\text{O}$ de tests de foraminifères benthiques, effectuées le long d'une carotte forée dans des sédiments carbonatés marins profonds. Les valeurs de ce $\delta^{18}\text{O}$ alternent tous les 100 Ka environ entre des périodes où il est particulièrement élevé (autour de $4\pm 3\text{‰}$), et des périodes où il est relativement bas (voisin de $-5\pm 3\text{‰}$).

Ces périodes de bas $\delta^{18}\text{O}$ dans les sédiments marins se produisent notamment il y a 330, 220, 120 et 10 Ka, à des âges pour lesquels on a mis en évidence un réchauffement d'environ 8°C des températures à Vostok (document 1). On fait ainsi apparaître une corrélation négative entre $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments marins profonds et la température globale sur Terre.

MÉTHODE

La simple corrélation avec les variations observées dans le document 1 suffit pour résoudre l'exercice. On peut sinon rappeler brièvement l'origine des variations du $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments marins. Par exemple :

« on sait que lors des périodes glaciaires, une grande quantité de l'isotope léger ^{16}O de l'oxygène est piégée dans les glaces polaires, faisant diminuer le $\delta^{18}\text{O}$ des océans, donc celui des carbonates qui s'y forment. »

Cette corrélation nous permet de déduire les variations de température globale sur Terre sur un temps plus long que ce que permettent les carottes de glace.

On met notamment en évidence deux pics de température il y a 500 et environ 600-630 Ka, compatibles avec une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires selon une périodicité de 100 000 ans.

ATTENTION

Ici, contrairement au document 3, l'axe des ordonnées n'est pas inversé : un pic de températures correspond à un creux du $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments marins.

On cherche alors une explication aux variations de température qui viennent d'être révélées par les archives glaciaires et sédimentaires.

COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES • CHAP. 10

Le document 3 suggère une corrélation entre l'insolation (énergie solaire reçue) en un point et le $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments marins profonds, donc la température moyenne sur Terre. Comme la latitude et la période de l'année ne changent pas, on peut en déduire que les variations d'énergie solaire reçue sont valables pour la Terre entière. Ainsi, une faible énergie reçue l'été dans l'hémisphère nord (de l'ordre de 450 W.m^{-2} contre environ 500 en moyenne) est reliée à un relativement fort $\delta^{18}\text{O}$, donc une faible température.

⚠ ATTENTION

Les variations de l'orbite terrestre ne modifient pas l'énergie moyenne annuelle reçue par la Terre dans sa totalité. Un été plus chaud dans l'hémisphère sud, comme mis en évidence par le document 3, n'explique donc pas à lui seul une hausse de la température globale sur Terre.

On sait que la banquise arctique se maintient grâce à des étés relativement frais. Si ces derniers sont plus chauds, la glace fond davantage et sa superficie sera moindre l'hiver suivant. Des étés plus chauds dans l'hémisphère nord peuvent donc à terme diminuer la superficie de glace au pôle. Celle-ci réfléchit alors de moins en moins la lumière du soleil : l'albédo terrestre diminue. Ceci perturbe l'équilibre radiatif de la Terre, qui émet moins d'énergie qu'elle n'en reçoit : le climat se réchauffe.

▶ POUR ALLER PLUS LOIN

Ceci n'est vrai que parce qu'il existe une asymétrie entre les deux hémisphères : le Pôle Nord est occupé par un océan, le Pôle Sud par un continent. Des étés plus frais au nord permettent le maintien des glaces marines arctiques tandis que des étés plus chauds au sud ne suffisent pas à faire fondre les épais glaciers continentaux Antartiques. Sans action humaine, toutes les conditions auraient ainsi été réunies actuellement pour entrer de nouveau en période glaciaire.

Or les variations d'insolation mises en évidence par le document 3 montrent une périodicité de 20 Ka avec un cycle plus fort tous les 100 Ka – cette rythmicité trouve son origine dans des oscillations périodiques des paramètres orbitaux de la Terre ou paramètres de Milankovitch (excentricité, obliquité, précession). On peut donc émettre l'hypothèse que l'alternance entre périodes glaciaires et interglaciaires observée aux documents 1 et 2 a pour origine un forçage orbital provoquant des oscillations rythmiques de l'insolation.

Le document 4 souligne une corrélation étroite entre les variations de température observées au document 1 et la concentration en CO_2 atmosphérique. Par exemple il y a 130 Ka, la concentration en CO_2 atmo-

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

sphérique connaît une hausse de plus de 100 ppmv, soit plus de 50%, en parallèle d'une hausse estimée à 10°C de la température au pôle, dépassant alors de 4°C sa valeur actuelle.

Le document 5 donne une première explication à cette corrélation. En effet, il présente les résultats d'une expérience de dégazage du CO₂ en fonction de la température. On y constate que comme pour tout gaz, la solubilité du CO₂ est d'autant plus forte que la température est basse : ainsi, si un litre d'eau à 25°C peut contenir 290 μmol de CO₂, il n'en contient plus que 225 μmol si la température monte à 40°C.

Or on sait que les océans contiennent 50 fois plus de CO₂ que l'atmosphère. Une augmentation, même minime, de leur température peut donc entraîner un relargage massif de CO₂ dans l'atmosphère, expliquant en partie la corrélation observée au document 4.

Remarque : d'autres explications viennent s'ajouter à ce phénomène, telles que la libération de CO₂ lors de la fonte des permafrost.

Or le CO₂ joue lui-même un rôle dans les variations de température observées, puisqu'il s'agit d'un gaz à effet de serre : une élévation de sa concentration provoque un forçage radiatif qui aboutit à un réchauffement du climat. En libérant du CO₂, le réchauffement du climat causé par des variations de l'insolation déclenche donc une brutale auto-amplification de ce phénomène, précipitant l'entrée en période interglaciaire. C'est pourquoi ces transitions se produisent de manière si saccadée sur la courbe du document 1, comparées aux oscillations du forçage orbital vues au document 3.

Synthèse

Différents mécanismes de rétroaction positive, tels qu'une diminution de albédo suite à la fonte de la banquise arctique, ou une augmentation de l'effet de serre suite au destockage du CO₂ piégé dans les océans, sont venus amplifier les épisodes de réchauffement climatique induits par l'augmentation rythmique du forçage orbital au Pléistocène, aboutissant à une entrée en période interglaciaire tous les 100 000 ans environ.

Remarque : les mêmes rétroactions positives sont à l'œuvre aujourd'hui, suite au réchauffement climatique d'origine anthropique. L'océan a toutefois joué un rôle différent jusqu'ici : il a piégé près de la moitié du CO₂ émis par les activités humaines, mais risque à terme de le relarguer sous l'effet de son réchauffement.

Agir face au réchauffement climatique

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Rôle des émissions anthropiques de gaz à effet de serre
3. Conséquences du changement climatique et risques associés
4. Les stratégies d'atténuation
5. Prévention des risques : s'adapter au changement

1 Introduction

Comprendre les variations passées du climat nous permet d'anticiper celles que nous risquons de connaître au XXI^e siècle en raison de la rapide augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Il s'agit également d'en prévoir les conséquences, notamment en terme de risques pour nos sociétés et les écosystèmes, et de réfléchir aux moyens de s'y préparer. Mieux encore, cela rend possible l'analyse des différentes stratégies existantes pour restreindre ce réchauffement.

Enfin, la compréhension de ces mécanismes donne des arguments pour réfuter les pseudo-théories selon lesquelles le réchauffement actuel n'est que le fruit des variations naturelles du système climatique.

? PROBLÉMATIQUE

Quelles stratégies adopter face au changement climatique ?

2 Rôle des émissions anthropiques de gaz à effet de serre

2.1 Les rapports du GIEC, une référence incontournable

Face à la multiplication des plateformes d'expression qui laissent le champ libre aux théories du complot et aux pseudo-sciences, notamment sur internet, il est important de savoir démêler les faits scientifiques des croyances personnelles.

Le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat) publie régulièrement de longs *rapports* dans lesquels plusieurs milliers de scientifiques procèdent à une synthèse méthodique de l'ensemble des études scientifiques, techniques et socio-économiques concernant le changement climatique.

Il ne s'agit pas d'un travail partisan et orienté, mais bien d'une analyse scientifique objective : le GIEC prend en compte à la fois les études qui font l'unanimité, mais aussi celles qui ne vont pas dans le sens de ses conclusions.



 **Retrouvez le détail des missions du GIEC et l'ensemble de ses publications sur le site du Ministère de la Transition Écologique avec **

2.2 Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre

Au Chapitre 10, nous avons mis en évidence la constante augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique depuis le XIX^e siècle.

La composition isotopique du carbone permet de montrer que ce CO_2 provient en grande partie de la combustion d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), responsable à elle seule de 78% des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (c'est-à-dire les émissions causées par les activités humaines). Or ces émissions augmentent chaque année, du fait de la croissance économique (qui augmente la consommation énergétique) et de la croissance démographique.

On peut également montrer que seule la moitié du CO_2 émis par les activités humaines se retrouve dans l'atmosphère : le reste est stocké par les océans et la végétation.

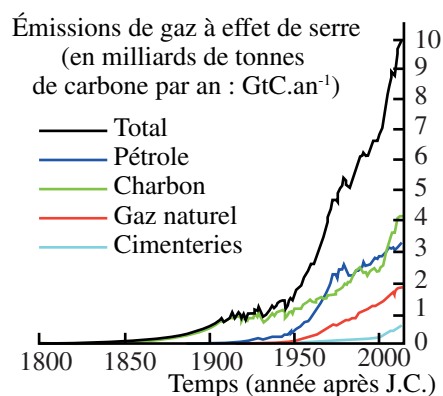


Figure 11.1 – Contribution des principales sources anthropiques de gaz à effet de serre depuis le XIX^e siècle

⚠ ATTENTION

Lorsqu'on étudie le cycle du carbone, on parle en giga-tonnes de carbone (GtC), soit 10^{12} kg.

Ici on parle souvent de giga-tonnes de CO_2 , incluant la masse des deux atomes d'oxygène par molécule.

Les rapports du GIEC parlent même de giga-tonnes d'*équivalent CO_2* , dans lesquelles ils incluent les autres gaz à effet de serre (méthane,...).

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

⚠ ATTENTION

On peut également mesurer la concentration atmosphérique en CO₂ en ppmv (partie par million en volume), ce qui correspond à 10⁻⁴ % du volume atmosphérique : 1 ppmv ≈ 2GtC.

Exemple : en 2010, les émissions liées aux combustibles fossiles représentaient 49 milliards de tonnes équivalent CO₂, incluant 76% de dioxyde de carbone et 16% de méthane.

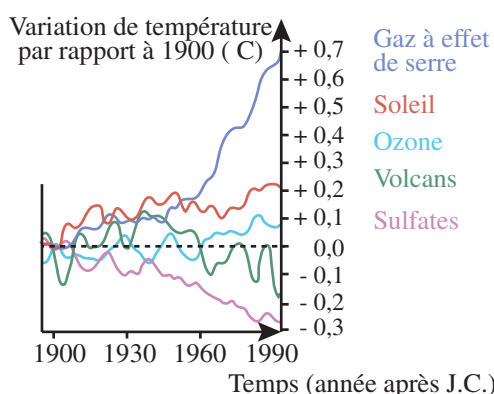


Figure 11.2 –
Modélisation de la
contribution des
principaux forçages
climatiques au XX^e
siècle

Les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines sont responsables de la plus grande part du réchauffement connu par la Terre depuis l'ère pré-industrielle (c'est-à-dire depuis le début du XIX^e siècle).

2.3 Différents scénarios d'émissions futures

Dans son dernier rapport, le GIEC a procédé à la compilation de 900 modélisations de stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les résultats ont été regroupés sous la forme de *scénarios* d'évolution des émissions.

Pour chaque scénario, les climatologues calculent le *forçage radiatif* correspondant (voir Chapitre 10). Ils modélisent alors les conséquences de ce changement sur différentes grandeurs atmosphériques : température de surface, humidité, etc.

Ils comparent ces résultats à des *scénarios de référence*, pour lesquels les politiques de réduction des émissions restent les mêmes qu'aujourd'hui. Ceux-ci modélisent un réchauffement moyen de +4.5 à +7°C à la fin du XXI^e siècle (par rapport à l'ère pré-industrielle).

Remarque : il s'agit d'un réchauffement global moyen. Ce réchauffement étant faible sur les océans et en zone intertropicale, il est d'autant plus fort sur les continents en zones tempérées et polaires.

Pour chacun de ces scénarios d'émissions, on s'intéresse notamment à la probabilité que le réchauffement climatique ne dépasse pas 2°C. En effet, il s'agit du seuil à respecter pour que les changements climatiques n'aient pas d'impacts trop irréversibles sur les écosystèmes.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Exemple : pour avoir de bonnes chances de rester sous le seuil de 2°C de réchauffement, il serait ainsi conseillé de maintenir le taux de CO₂ autour de 450 ppmv. Sur les 900 scénarios testés, ceux pour lesquels la concentration en CO₂ atteignait 530 à 650 ppmv en 2100 ont affiché une probabilité supérieure à 50% de dépasser ce seuil. Cette probabilité dépasse 90% pour des concentrations supérieures.

▶ POUR ALLER PLUS LOIN

En 2015, les accords de Paris (« COP21 ») exprimaient le souhait de limiter le réchauffement climatique à moins de 1.5°C d'ici la fin du siècle. C'est en effet le seuil de réchauffement à partir duquel les petits états insulaires risquent de se retrouver régulièrement submergés par la montée des eaux. Cependant, l'inertie du système climatique rend difficile la réalisation de ce but : en 2020 et en l'absence de politiques concrètes de réduction des émissions, rester sous ce seuil est devenu très peu probable et il existe même un risque d'environ 10% de le dépasser dès 2024.

➡ À RETENIR

Les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines s'intensifient chaque décennie depuis le XIX^e siècle. Cela a abouti à une hausse de plus de 1°C de la température moyenne sur Terre.

Il existe en libre accès sur internet des *rapports du GIEC* (et leurs résumés), compilations méthodiques et non partisans de l'ensemble des connaissances actuelles sur le changement climatique associé.

Ces rapports proposent notamment différents scénarios pour l'évolution future du taux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, en fonction des mesures prises pour modérer les émissions humaines. Ils calculent alors le réchauffement climatique qui en résulte ainsi que ses conséquences sur le climat et les systèmes humains et naturels.

3 Conséquences du changement climatique et risques associés

Le réchauffement climatique actuel montre déjà de multiples conséquences.

❓ PROBLÉMATIQUE

Quels sont aujourd'hui les impacts du changement climatique sur les sociétés et les écosystèmes ? Quels sont les risques associés et de quelle manière ces risques peuvent-ils nous affecter ?

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

Les *risques* associés sont d'autant plus grands que les systèmes humains et naturels y sont *vulnérables*.

Définition 1 : vulnérabilité

Tendance naturelle ou prédisposition des populations, cultures, infrastructures, biens culturels ou écosystèmes à être affectés par les changements climatiques. Leur *vulnérabilité* dépend de leur *sensibilité* (fragilité d'un système face à une perturbation donnée), de leur capacité à s'adapter et de leur *exposition* (présence dans une zone susceptible d'être affectée par les perturbations associées).

Définition 2 : risque

Conséquences potentielles d'un *aléa* (événement dont l'issue est incertaine) sur des *enjeux*. Ceux-ci, qu'ils soient économiques, culturels ou humains, sont caractérisés par leur *valeur* et leur *vulnérabilité*. Ainsi, on exprime souvent le *risque* comme le produit de ces trois facteurs :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times \text{Valeur}$$

Remarque : ici, la valeur des enjeux (intérêts qu'ils représentent) est difficile à calculer précisément.

L'*aléa* s'exprime en fonction de sa probabilité, de son intensité, de sa fréquence et de son étendue, lesquelles peuvent faire l'objet de *prévisions*.

La probabilité du changement climatique est très grande et son étendue est globale, mais on peut encore agir sur son intensité : ce sont les stratégies d'*atténuation*. Il est également possible d'agir sur la vulnérabilité des sociétés et des écosystèmes : on parle d'*adaptation*.

Quelle que soit leur ampleur, les changements climatiques qui s'amorcent vont entraîner de nombreux risques au cours des prochaines décennies. Dans certains cas, les modèles prédisent l'apparition de risques nouveaux, mais dans la plupart des cas ils montrent une simple amplification des risques existants.

Par ailleurs, la plupart de ces risques ont des effets en cascades, déclenchant avec eux une série d'autres conséquences néfastes.

3.1 Multiplication des événements climatiques extrêmes

Le réchauffement du climat amplifie les phénomènes météorologiques et la redistribution des masses d'air à la surface de la planète. Cela a provoqué ces dernières années une multiplication des événements climatiques extrêmes : vagues de chaleur, pluies torrentielles, cyclones, etc.

Ce phénomène, à l'origine de la plupart des autres risques associés au changement climatique, devrait connaître une forte amplification au XXI^e siècle

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

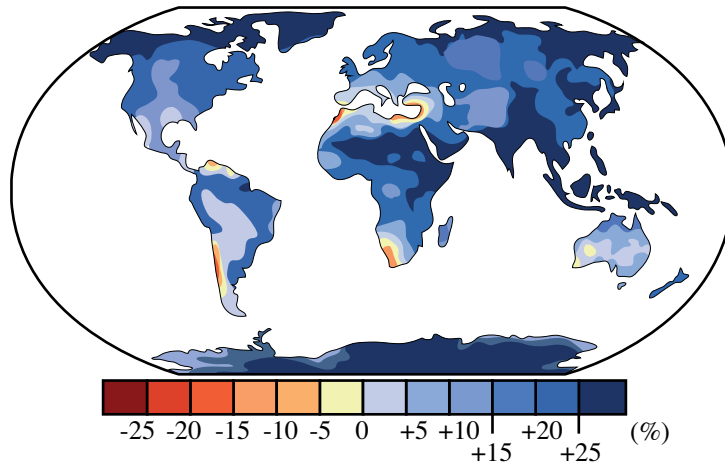


Figure 11.3 – Variation de la quantité d'eau maximale tombée en 5 jours (en haut) à la fin du XXI^e siècle, selon les scénarios de référence

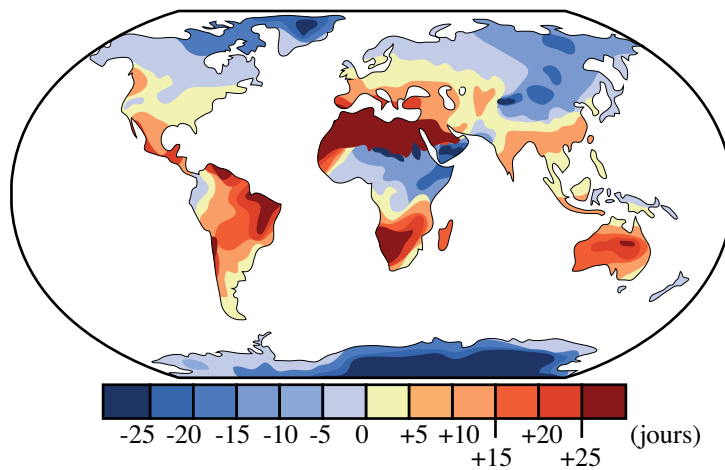


Figure 11.4 – Augmentation (ou diminution) du nombre de jours sans pluie lors de la principale sécheresse de l'année à la fin du XXI^e siècle, selon les scénarios de référence

Par ailleurs, la hausse du niveau des mers (voir Chapitre 9) pourrait atteindre 1 m d'ici la fin du siècle.

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

3.2 Conséquences sur les systèmes humains

3.2.1 - Problèmes sanitaires

La multiplication des vagues de chaleur provoque une hausse des problèmes de santé et de la mortalité liés aux canicules et aux incendies.

Le changement climatique fait également remonter vers les hautes latitudes des animaux *vecteurs* de maladies tropicales.

Exemple : des moustiques porteurs de la dengue ou du chikungunya ont fait leur apparition en Europe, et le paludisme, responsable de 1.2 million de morts par an dans le monde, a récemment été signalé dans des zones jusqu'alors épargnées.

Les inondations, importants vecteurs de maladies, et les problèmes d'approvisionnement en eau potable risquent d'augmenter la morbidité et la mortalité liées à l'insalubrité de l'eau.

3.2.2 - Baisse des rendements agricoles

Théoriquement, l'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique améliore la productivité des plantes (voir Chapitre 7). Toutefois, la multiplication des événements climatiques extrêmes (tempêtes, sécheresses, etc.) ainsi que leurs conséquences (inondations, incendies, prolifération des ravageurs tels que les criquets,...) a eu un impact négatif sur les rendements de la plupart des cultures ces dernières décennies.

Ainsi, la productivité des principales cultures autour du monde (blé, riz, maïs, etc.) pourrait continuer de baisser d'environ 2% par décennie alors même que la population mondiale croît : on estime que les besoins vont augmenter de 14% par décennie d'ici 2050. Il est d'ores et déjà difficile d'y pourvoir, et les maladies liées à la sous-alimentation et aux carences sont déjà fréquentes autour du globe.

3.3 Problèmes socio-économiques et géopolitiques

Les événements climatiques extrêmes provoquent la dégradation des infrastructures existantes (routes, centrales électriques, systèmes d'approvisionnement en eau, etc.), notamment les plus vétustes.

Les populations les plus *vulnérables* aux changements climatiques sont ainsi souvent les plus pauvres.

La multiplication des événements climatiques extrêmes risque d'accentuer la hausse du prix de certaines denrées alimentaires, augmentant les *risques* d'insécurité alimentaire, de perte de revenus et d'émeutes chez les populations pauvres, principalement agricoles.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Insécurité alimentaire, pauvreté et catastrophes naturelles peuvent forcer l'émigration des populations touchées.

Au cours de l'Histoire, ces différents problèmes ont été des sources récurrentes de conflits violents tels que les guerres civiles ou les violences entre ethnies.

Exemple : la montée des eaux prévue au XXI^e siècle devrait réduire nettement le territoire des états côtiers (Bangladesh...), voire provoquer la submersion des petits états insulaires, où vivent des centaines de millions de personnes. On s'attend ainsi à un afflux de *réfugiés climatiques* vers les pays moins touchés. Ceci risque de générer des tensions entre ces états et leurs voisins.

3.4 Perturbation des écosystèmes

3.4.1 - Conséquences sur la biodiversité

Le réchauffement climatique provoque la restriction des *aires de répartition* de nombreuses espèces terrestres, marines et d'eau douce, leur décalage vers les pôles ainsi que la modification de leurs routes migratoires.

Associés à la modification des habitats (fonte de la banquise,...) et l'irruption de nouvelles espèces invasives, ces changements pourraient rapidement accentuer la crise d'extinction que nous connaissons actuellement.

⚠ ATTENTION

Les risques associés dépendent moins de l'ampleur du changement que de sa vitesse : un bouleversement brutal ne laisse pas le temps aux espèces de s'adapter (migrer vers de plus hautes latitudes, trouver sa place dans un nouvel écosystème, etc.). Ces processus nécessitent en effet plusieurs milliers voire dizaines de milliers d'années.

Exemple : sur 10 000 populations de mammifères, d'oiseaux, de reptiles, d'amphibiens et de poissons surveillées, on a enregistré un déclin de peuplement de 50% entre 1970 et 2014.

Remarque : cette crise semble pour l'instant avoir surtout été causée directement par les activités humaines (anthropisation, surpêche, pollution, surexploitation des sols, etc.) plutôt que par le changement climatique qui en découle.

La dissolution de CO₂ dans l'eau entraîne par ailleurs une *acidification des océans* qui perturbe la formation des exosquelettes calcaires des organismes marins. Ceci a des conséquences désastreuses sur la biodiversité car les coraux et les micro-organismes marins touchés abritent ou se situent à la base des principales chaînes alimentaires océaniques (crustacés, poissons, etc.).

Exemple : plus de 98% des coraux de la Grande Barrière en Australie ont été endommagés lors des canicules de 2016, 2017, 2020 et 2022 (on parle de blanchissement).

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

3.4.2 - Conséquences sur les écosystèmes et risques associés

La hausse du niveau des mers, associée à une multiplication des tempêtes, pourrait provoquer la submersion fréquente voire définitive d'importantes zones littorales, l'érosion des côtes et la disparition de nombreux écosystèmes littoraux fragiles.

Le fort peuplement et l'importance économique de ces régions accroissent nettement le risque qui en découle pour les populations humaines.

La perturbation des écosystèmes a ainsi des impacts non négligeables sur un vaste éventail d'activités humaines via la dégradation des *services écosystémiques* qu'ils offrent.

Définition 3 : services écosystémiques

Ensemble des bénéfices que les êtres humains peuvent tirer de l'exploitation des écosystèmes, qu'elle soit culturelle ou économique, auxquels s'ajoutent les services rendus par le fonctionnement naturel des écosystèmes : puits de carbone, protection contre les risques naturels, etc.

Définition 4 : puits de carbone

Système naturel capable d'absorber du CO₂ atmosphérique et de le stocker durablement (océans, sols, biomasse terrestre, etc.).

Exemple : l'appauvrissement de la biodiversité met en danger les activités humaines qui en dépendent (pêche...), la disparition des récifs coralliens a des conséquences désastreuses dans le rôle protecteur qu'ils jouent pour les côtes, etc.

Voir exercice 3.

➡ À RETENIR

La Terre fait déjà les frais du bouleversement climatique. La multiplication des événements climatiques extrêmes menace notamment les écosystèmes, la production agricole et la santé humaine.

Ces processus génèrent de nombreux *risques* pour les sociétés et les écosystèmes, qui pourraient se multiplier et s'amplifier durant les prochaines décennies.

Les populations pauvres sont les plus vulnérables à ces risques, qui accentuent leur marginalisation sociale, économique, culturelle et politique.

Les changements climatiques mettent également en danger de nombreux écosystèmes ainsi que les services écosystémiques qu'ils proposent.

Ces risques génèrent des effets « en cascade » qui vont bien au-delà des problèmes climatiques : insécurité alimentaire, instabilité économique, hausse des conflits, creusement des inégalités, etc.

L'ensemble de ces risques peut être réduit en prenant aujourd'hui des mesures pour limiter la vitesse et l'ampleur du changement climatique : on parle d'*atténuation*.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

4 Les stratégies d'atténuation

PROBLÉMATIQUE

Comment limiter la vitesse et l'ampleur du changement climatique ?

Les scénarios du GIEC qui restent sous le seuil de 2°C de réchauffement supposent une réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre de 40% à 70% en 2050 (par rapport à 2010).

Définition 5 : atténuation

Intervention humaine visant à réduire le réchauffement climatique, principalement par la réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais aussi par l'augmentation des *émissions négatives* ou de l'albédo terrestre.

L'existence d'*émissions négatives* est ainsi permise par la captation du CO₂ atmosphérique par des puits de carbone naturels (océans, sols, végétation,...) et grâce à des technologies de capture et de stockage de carbone. Leur développement massif est nécessaire pour atteindre l'objectif de « 0 émission carbone » en 2100. Ces stratégies devront inclure au fur et à mesure les innovations sociales et techniques attendues au XXI^e siècle.

4.1 Des stratégies pour réduire les émissions anthropiques de gaz à effet de serre

4.1.1 - Production et consommation d'électricité et de chaleur

La production d'électricité et de chaleur risque de rester la principale source d'émissions de gaz à effet de serre au XXI^e siècle : dans les *scénarios de référence*, les émissions directes de CO₂ par ce secteur sont multipliées par 2 ou 3 d'ici 2050 (par rapport à 2010)

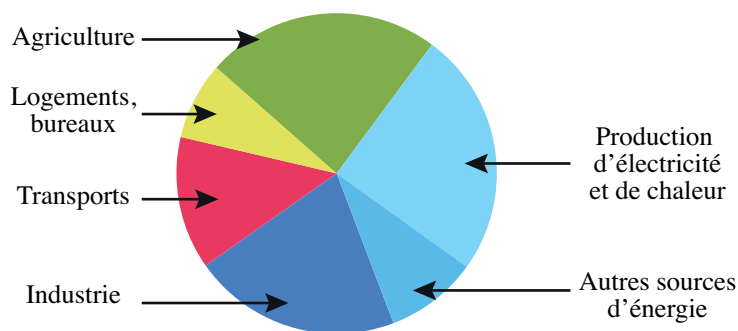


Figure 11.5 – Contribution des différents secteurs d'activité humaine aux émissions totales de gaz à effet de serre en 2010

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

Au contraire, les stratégies d'atténuation les plus efficaces tablent sur un renouvellement complet des sources d'énergie au profit des *énergies sobres* en carbone (ne reposant pas sur la combustion de carbone fossile : énergies renouvelables (solaire, éolien, hydroélectrique,...), énergie nucléaire et bioénergies).

Exemple : dans les scénarios restant sous le seuil des 2°C de réchauffement, la part des énergies sobres passe de 30% aujourd'hui à plus de 80% en 2050.

Ce renouvellement peut être moins contraignant s'il est mené graduellement, en favorisant dans un premier temps des « compromis » énergétiques (gaz naturel, pompes à chaleur,...), ayant vocation à être remplacés à terme par des énergies plus « propres ». On parle ainsi d'*énergies de transition*.

Voir exercice 8.

4.1.2 - Transport de passagers et de marchandises

La hausse prévue de la quantité de personnes et de biens transportés au XXI^e siècle peut être compensée par une meilleure efficacité énergétique des moteurs et des carburants, et une favorisation des services de proximité et des transports les moins polluants : transport ferroviaire, transports en commun, pistes cyclables, etc.

Ces seules mesures pourraient réduire de 40% les émissions de CO₂ par les transports. Elles requièrent des changements de comportements individuels mais apportent de nombreux *cobénéfices* (« effets secondaires positifs » dans des domaines qui n'étaient pas initialement visés) : sanitaires, économiques, sociaux, etc.

4.1.3 - Agriculture, gestion des forêts et utilisation des sols

Ce secteur est le seul qui connaisse actuellement une baisse de ses émissions. Celles-ci restent toutefois importantes et pourraient être considérablement diminuées grâce à une meilleure gestion des pâturages et des terres cultivées (moins de labour profond, jachère, etc.), visant à favoriser le stockage de carbone dans le sol et minimiser son relargage, la diminution de l'utilisation d'intrants issus de la pétrochimie et la réduction de la puissance des engins agricoles.

Voir exercices 4 et 5.

4.2 Les stratégies d'atténuation nécessitent une importante transformation des sociétés

La mise en œuvre des stratégies d'atténuation les plus pertinentes peut être accélérée par l'adoption de mesures économiques et politiques.

Exemple : orienter les investissements financiers vers les technologies respectueuses de l'environnement, taxer les entreprises les plus polluantes, mettre en place des réglementations sur la consommation énergétique des bâtiments et des équipements, etc.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Il n'est pas envisageable d'imposer ces mesures contre la volonté de la population. Elles reposent sur une modification volontaire et globale des comportements, grâce notamment à l'éducation et à la prévention.

Quels que soient les enjeux économiques ou sociaux, une transition efficace nécessite également que l'ensemble des décisions et actions politiques soient prises dans une même perspective d'atténuation, de réduction des risques et de développement durable.

4.3 L'importance d'une action internationale rapide

Le réchauffement climatique ne connaissant pas de frontière, il requiert une réponse planétaire : mise en commun des savoir-faire, mutualisation des efforts, adoption de politiques communes, etc.).

Voir exercice 10.

Nous avons vu aux chapitres 9 et 10 les effets d'*inertie* (« bombe à retardement ») et d'amplification (« boule de neige ») du système climatique. Toute perturbation actuelle a ainsi des conséquences démultipliées et qui ne commenceront à se faire ressentir que dans quelques décennies. Les choix de stratégies d'atténuation et d'adaptation qui seront faits dans les prochaines années auront donc un impact majeur pendant toute la durée du XXI^e siècle.

Des mesures d'atténuation appropriées pourront limiter conséquemment l'ampleur des changements climatiques, et des mesures d'adaptation pertinentes pourront énormément modérer les conséquences de ces bouleversements.

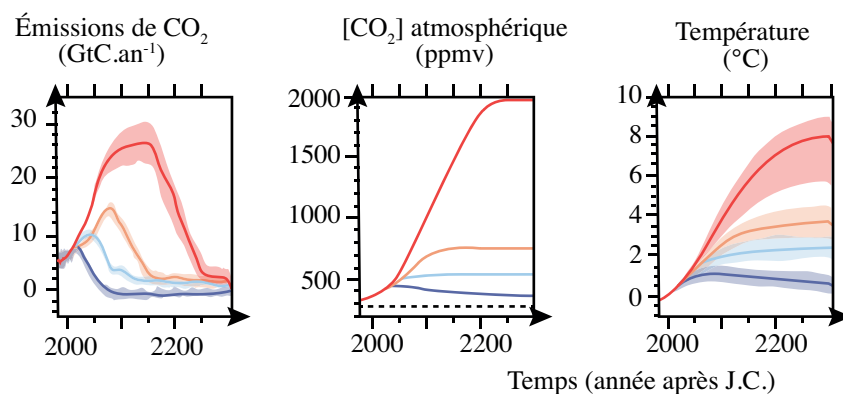


Figure 11.6 – Émissions de CO₂, concentration en CO₂ atmosphérique et variation de température par rapport à l'année 2000, en fonction des mesures de réduction des émissions qui seront prises : en rouge scénario de référence ; en orange, cyan et bleu trois autres scénarios possibles

Mathématiquement, plus cette transition se fera tôt, moins elle sera contraignante car moins elle sera extrême.

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

4.4 Des biais cognitifs peuvent ralentir la prise de décisions

Les politiques d'atténuation sont particulièrement difficiles à mettre en œuvre car elles nécessitent un investissement économique qui ne sera rentable qu'à long terme. Elles se heurtent de plus à d'importants *biais cognitifs* : une décision est ainsi difficile à prendre si l'on n'en voit pas les conséquences.

Voir exercice 9.

Cet obstacle ne peut être surmonté que par un changement de la perception de ces mesures par la population et une prise de conscience collective. Cependant face à cet enjeu planétaire, une transition ne peut s'opérer sans avoir dissipé certains doutes persistants au sein d'une partie de la population, concernant l'existence et l'ampleur du changement climatique, le rôle des activités humaines dans son déclenchement et la nécessité d'une réaction rapide.

L'adhésion de l'opinion publique aux stratégies d'atténuation et d'adaptation repose donc sur la démonstration de ces faits scientifiques. Ceux-ci font en effet désormais l'objet d'un vaste consensus : la question n'est plus celle de l'existence du changement climatique ni de son origine anthropique, mais de l'ampleur des actions qui peuvent être menées pour s'y préparer et/ou l'enrayer.

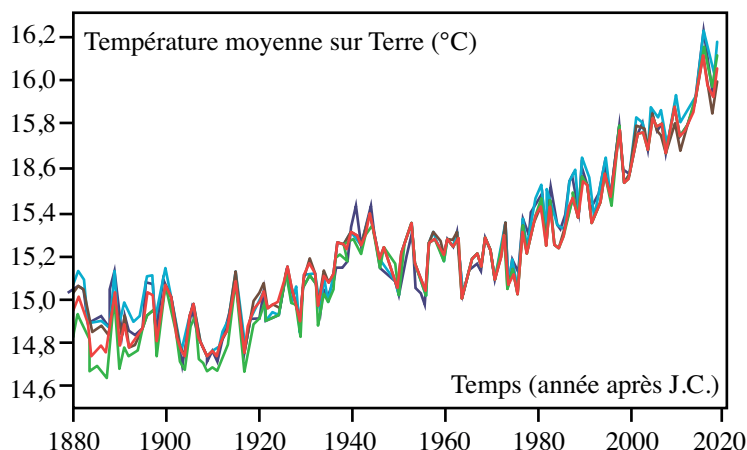


Figure 11.7 – Évolution de la température moyenne sur Terre depuis la révolution industrielle calculée par différents modèles

Un certain nombre d'idées reçues doivent ainsi être déconstruites.

Voir exercice 11.

► POUR ALLER PLUS LOIN

Les lobbies représentant les industries fossiles et d'autres secteurs économiques peuvent enfin constituer un frein important à la mise en place de mesures concrètes contre le changement climatique. Grâce à leur pouvoir financier et leur capacité à mobiliser des électeurs, ils ont une influence politique non négligeable.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

▶ POUR ALLER PLUS LOIN

Ils mènent fréquemment des campagnes de désinformation semant le doute sur les preuves scientifiques de la gravité du changement climatique ou sur l'efficacité des politiques environnementales. Ils peuvent par ailleurs bloquer activement les stratégies d'atténuation en faisant pression sur les gouvernements pour qu'ils adoptent des politiques moins restrictives ou pour qu'ils annulent des réglementations environnementales existantes.

➡ À RETENIR

Les stratégies d'*atténuation* incluent différents moyens de limiter les émissions de gaz à effet de serre.

La mise en œuvre de ces stratégies peut être favorisée par des décisions économiques et politiques.

Ces mesures sont d'autant plus efficaces qu'elles sont mises en œuvre avant que le changement climatique ne connaisse une accélération irréversible, et qu'elles sont coordonnées à de hauts niveaux de gouvernance (échelle nationale voire internationale).

De nombreux obstacles, propres à l'être humain et au fonctionnement des institutions politiques et financières, rendent encore difficile la prise de décisions politiques ambitieuses en terme d'atténuation.

Ces obstacles pourraient être surmontés par une dynamique globale ainsi qu'un fort soutien de l'opinion publique, grâce notamment à la réfutation des croyances qui remettent en cause l'importance voire l'existence du changement climatique.

5 Prévention des risques : s'adapter au changement

Face à la hausse des risques soulevés par le changement climatique, on assiste à une multiplication des initiatives visant à se préparer à ce changement.

? PROBLÉMATIQUE

Comment les risques liés au changement climatique peuvent-ils être diminués ou contrôlés ?

Définition 6 : adaptation

Processus par lequel les sociétés tentent de s'ajuster aux bouleversements du climat, qu'il s'agisse d'en éviter les nuisances ou d'en exploiter les éventuels bénéfices. Les sociétés peuvent également intervenir pour tenter d'adapter les écosystèmes naturels à ces changements : reforestation, migration assistée d'espèces, etc.

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

Différents degrés d'adaptation peuvent être mis en place, de préférence par *anticipation* : avant que les risques ne deviennent un réel danger.

5.1 Développement socio-économique

Il est important de limiter la vulnérabilité des populations les plus sensibles, à travers notamment la réduction des inégalités et des autres formes de marginalisation. Cela passe également par le développement des services de santé : programmes de vaccination, mise en place de services médicaux d'urgence, etc.

Il est également primordial d'adapter le secteur agricole, dont dépendent de nombreux autres risques.

Exemple : améliorer et mettre en commun les infrastructures de production énergétique et d'irrigation, de traitement et d'approvisionnement en eau ; modifier les pratiques agricoles au profit de pratiques plus durables ; adopter des variétés de culture et d'élevage *résilientes*, etc.

Définition 7 : résilience

Capacité d'une espèce, d'un environnement, d'une société ou d'un système économique à se réorganiser de manière à rester fonctionnel après une perturbation de son fonctionnement.

Remarque : la résilience d'un écosystème (après un incendie,...) est permise par sa capacité à se reconstituer à partir des racines, des bulbes et des graines enfouies dans le sol, et grâce aux migrations d'espèces.

5.2 Protection de l'environnement et gestion des risques naturels

Face au risque accru de catastrophes naturelles, il est important de prendre la mesure de ce risque afin d'y préparer les systèmes humains : carte des zones à risque, construction d'abris, plans d'évacuation, etc.

Par ailleurs, les actions menées pour améliorer la résilience des écosystèmes apportent en outre de nombreux cobénéfices pour les sociétés humaines.

Exemple : le boisement permet d'enrayer la désertification et de protéger les zones littorales contre les tempêtes marines.

On essaie notamment de préserver les *zones tampon*. Celles-ci incluent notamment les zones en périphérie des écosystèmes menacés, destinées à encaisser les perturbations anthropiques (bandes enherbées autour des rivières pour les protéger des pollutions agricoles,...). Inversement, il peut s'agir de marges destinées à protéger les infrastructures humaines (zones inondables en bordure des rivières,...).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Certains écosystèmes jouent même le rôle de *barrières naturelles* contre les risques naturels ou anthropiques.

Exemple : les mangroves ont prouvé leur rôle de protection des littoraux contre le risque de cyclone ou de tsunami : des études ont montré que pour 1 milliard de dollars dépensés à la reforestation des mangroves, 7 milliards sont économisés en coûts de réparation des inondations.

Voir exercices 6 et 7.

5.3 Des avantages interconnectés

De nombreuses mesures visant à s'adapter aux conséquences du changement climatique permettent également d'en atténuer les causes : gestion durable des forêts et des sols, changements de modes de culture, protection des écosystèmes, modernisation des moyens de production d'énergie, etc.

De même, rester sous le seuil de réchauffement de 2°C présente de nombreux avantages en terme de qualité de l'air, sécurité, santé, limitation de la pauvreté, etc. Enfin, les stratégies d'atténuation elles-mêmes (rénovation des équipements...) amènent d'emblée de nombreux cobénéfices dans les domaines de la santé, la sécurité alimentaire, la biodiversité, la qualité de vie, l'accès à l'énergie, la solidarité locale et internationale, etc.

Ces cobénéfices, ainsi que les économies réalisées en réduisant les coûts de l'adaptation au changement climatique, compensent largement le prix d'une transition rapide.

➡ À RETENIR

L'*adaptation* au changement climatique passe par la modernisation des équipements, l'adoption de cultures et de pratiques résilientes, et la préservation des écosystèmes.

Il s'agit également de se préparer aux risques : en faire l'inventaire et mettre en place des mesures de protection, des protocoles d'évacuation et des stratégies d'aides aux populations menacées.

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

1 QCM Vérification de connaissances

5 min

Corrigé
p. 367

Pour chacune des questions suivantes, plusieurs propositions de réponses sont faites dont une seule est correcte. Laquelle ?

- 1 Le GIEC :
 - a décide des mesures pour enrayer le changement climatique ;
 - b montre l'importance primordiale du Soleil dans le réchauffement climatique actuel ;
 - c est un organisme international regroupant des milliers de chercheurs ;
 - d prend en compte uniquement les travaux mettant en évidence l'origine anthropique du changement climatique.
- 2 Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre :
 - a s'accumulent uniquement dans l'atmosphère ;
 - b sont surtout dues au brûlage de combustibles fossiles ;
 - c sont surtout composées de méthane ;
 - d n'expliquent qu'une partie minoritaire du réchauffement climatique.
- 3 En 2100, en l'absence de mesures efficaces d'atténuation :
 - a la hausse du niveau des mers pourrait atteindre 3 m ;
 - b le réchauffement du climat devrait se stabiliser à 2°C ;
 - c les zones désertiques devraient s'étendre ;
 - d les pluies diluviennes devraient se faire plus rares.
- 4 Une diminution de la productivité agricole :
 - a est peu probable grâce au changement climatique ;
 - b amène des risques sanitaires, sociaux et économiques ;
 - c est peu sensible aux conséquences du changement climatique ;
 - d a moins d'influence sur ses populations pauvres.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

2 V/F Vérification de connaissances

5 min

Corrigé
p. 367

Qui suis-je ?

- 1 Capacité d'un système à se réorganiser de manière à rester fonctionnel après une perturbation de son fonctionnement.
- 2 Ajustement aux bouleversements du climat, qu'il s'agisse d'en éviter les nuisances ou d'en exploiter les éventuels bénéfices.
- 3 Intervention humaine visant à limiter le réchauffement climatique.
- 4 Utilité du fonctionnement naturel des écosystèmes et bénéfices que les êtres humains peuvent tirer de son exploitation.

INTERROS

- 5 Propension ou prédisposition d'un système à être affecté par une perturbation, fonction de sa sensibilité, de sa capacité à s'adapter et de son exposition à la perturbation concernée.
- 6 Conséquences potentielles d'un événement néfaste, fonction de la probabilité de cet événement, de la valeur des enjeux et de leur vulnérabilité.

3 V/F Vérification des connaissances

15 min  Corrigé
p. 368

Donnez en quelques lignes les conséquences du changement climatique sur ces différents éléments :

- 1 agriculture ;
- 2 eau potable ;
- 3 santé ;
- 4 fonte des glaces polaires / fonte des glaciers ;
- 5 acidification des océans ;
- 6 économie.

4 Atténuation – Mesures



10 min  Corrigé
p. 369

Nouveau programme

Pour chacune des mesures suivantes, justifiez en quelques mots leur intérêt dans le cadre des stratégies d'atténuation du changement climatique.

- 1 Secteur industriel :
 - ☐ a remplacement des technologies énergivores par des nouvelles technologies à meilleur rendement ;
 - ☐ b recyclage de la chaleur et des déchets ;
 - ☐ c réduction des distances de transport des matières premières et des déchets ;
 - ☐ d réduction des flux d'investissement vers les entreprises très consommatrices d'énergies fossiles.
- 2 Agriculture, gestion des forêts et utilisation des sols :
 - ☐ a réduction de la déforestation, gestion durable des forêts et accélération du reboisement ;
 - ☐ b gestion des sols : moins de labour, jachère, etc. ;
 - ☐ c programmes de conservation des zones humides et des nappes phréatiques.

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

- 3 Gestion des écosystèmes :
- a gestion de la surpêche (mise en place de quotas) ;
 - b migration et dispersion assistées d'espèces ;
 - c mise en place de corridors écologiques.

5 Atténuation – Agro-alimentaire



10 min

Corrigé
p. 370

Nouveau programme

En vous aidant des informations ci-dessous, rédigez un court texte expliquant comment des changements de comportements individuels peuvent permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre par le secteur agro-alimentaire.

- Chaque année, 1.3 milliard de tonnes de denrées alimentaires, soit un tiers des aliments produits pour la consommation humaine, est perdu ou gaspillé.
- La production de 1 kg de viande de bœuf conduit à l'émission d'une trentaine de kg de CO₂ dans l'atmosphère, contre 0.9 kg pour 1 kg de lentilles.
- Une étude réalisée aux États Unis a montré que les aliments achetés par les consommateurs américains avaient parcouru en moyenne 4 000 km avant de finir dans leur assiette.

6 Atténuation – Adaptation



15 min

Corrigé
p. 370

Nouveau Programme

Pour chacune des mesures suivantes, justifiez en quelques mots s'il s'agit de mesures **a** d'atténuation ou **b** d'adaptation :

- 1 diversification des revenus, des capitaux et des moyens de subsistance des populations agricoles ;
- 2 étiquetage énergétique sur les appareils électroniques ;
- 3 développement des régimes d'assurance et de sécurité sociale ;
- 4 mise en place de plans d'évacuation et d'information de la population ;
- 5 augmentation des investissements dans l'efficacité énergétique des transports, des bâtiments et des usines ;
- 6 mise en place de normes d'efficacité énergétique à respecter lors de la construction de nouveaux bâtiments, de moteurs, etc. ;
- 7 inventaire des zones à risque et mise en place de systèmes d'alerte ;
- 8 réductions d'impôts auprès des entreprises respectueuses des plans d'atténuation, et pénalisation des autres ;
- 9 construction d'abris, de digues et de réseaux de drainage ;

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 10 factorisation de l'échange d'équipements anciens (voitures...);
- 11 réduction des flux d'investissement vers les techniques de production d'énergies fossiles et réorientation vers les moyens de production d'électricité à faible émission de carbone;
- 12 renforcement des services sanitaires (programmes de vaccination, mise en place de services médicaux d'urgence, etc.);
- 13 mise aux normes des constructions les plus sensibles et facilitation du déplacement des populations les plus exposées.

7 Zones urbaines



15 min

Corrigé
p. 371

Nouveau programme

Le pourcentage de population résidant dans des villes devrait continuer de croître pour atteindre 64 à 69% en 2050.

- 1 Parmi les risques associés au changement climatique, lesquels pèsent particulièrement sur le milieu urbain et pourquoi ?
- 2 Expliquez pourquoi il est primordial d'intensifier des mesures d'adaptation dans les zones urbaines.
- 3 Quelles mesures d'atténuation pourraient être prises pour limiter les émissions de CO₂ en milieu urbain ?
- 4 Quels cobénéfices les mesures d'atténuation et d'adaptation en milieu urbain apportent-elles ?

8 Énergies de transition



15 min

Corrigé
p. 371

Nouveau programme

Pour rester sous le seuil des 2°C de réchauffement, les émissions mondiales de CO₂ issues de la production d'énergie devront baisser de l'ordre de 90% d'ici 2070 (par rapport à 2010). Ceci pourrait être réalisé grâce notamment à un renouvellement complet des sources d'énergie : augmentation de la part des énergies sobres pour passer de 30% aujourd'hui à plus de 80% en 2050.

- 1 Une des énergies de substitution évoquée est l'énergie nucléaire. Sa part dans la production totale d'énergie a pourtant diminué ces dernières années. Quels sont d'après-vous les arguments pour et les arguments contre le développement de cette technique de production d'énergie ?
- 2 La plupart des énergies dites *renouvelables* utilisent des quantités importantes de métaux rares qui entrent dans la composition de leurs aimants, capteurs solaires, batteries, etc. Pourquoi ce besoin de batteries ? Quel est d'après-vous l'intérêt du développement, depuis quelques années, de technologies sans métaux rares ?

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

- 3 Le remplacement des centrales à charbon par des centrales au gaz peut fortement réduire leur bilan carbone. Quelle pourrait en être l'intérêt dans un contexte de transition énergétique ?
- 4 En parallèle d'un renouvellement des sources d'énergie, l'efficacité de la transition énergétique repose également sur une réduction de la consommation d'énergie. Quelles sont les principales mesures permettant de diminuer cette consommation ?

9 Transition – Efficacité



20 min

Corrigé
p. 373

Nouveau programme

Ces dernières années, de nombreuses législations visant à limiter les émissions de gaz à effets de serre ont vu le jour (taxe carbone, bonus-malus, etc.). Elles s'appliquaient ainsi à 67% des émissions globales de CO₂ en 2012, contre 45% en 2007.

Pour autant, ces mesures n'ont pas réussi à enrayer l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre durant la même période.

- 1 Selon vous, quels sont les obstacles limitant l'efficacité de telles législations ?
- 2 Il n'est pas envisageable d'imposer ces mesures contre la volonté de la population. Selon vous, quels facteurs favorisent un changement de comportement de la population vis-à-vis du réchauffement climatique ?
- 3 Expliquez en quelques lignes les phénomènes qui ralentissent voire empêchent la prise de mesures d'atténuation ambitieuses par les gouvernements.
- 4 Inversement, quels facteurs pourraient pousser les décideurs à adopter de telles mesures ?

10 Niveau de gouvernance



20 min

Corrigé
p. 374

Nouveau programme

Avant d'être mise en œuvre, toute stratégie d'atténuation doit être discutée d'un point de vue scientifique (pertinente ?), technologique (réalisable ?), économique (abordable ?), environnementale (sans effet secondaire ?) et politique (à quel niveau de gouvernance ? – c'est-à-dire à quelle échelle : commune, pays, etc.).

- 1 À quel niveau de gouvernance les mesures d'adaptation au changement climatique sont-elles le plus souvent prises ? Vu la globalisation des risques associés, quel niveau de gouvernance pourrait, selon-vous, améliorer l'efficacité de ces mesures ? Pourquoi est-ce difficile ?
- 2 Les différents pays du monde contribuent-ils de manière équivalente à l'amplification du réchauffement climatique ? Y a-t-il un lien entre leur part de contribution au changement climatique et l'ampleur des risques associés ? (suite de la question page ci-contre).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

D'après vos réponses précédentes, pensez-vous que chaque pays doive participer de manière égale à l'effort d'atténuation du réchauffement climatique ?

- 3** Les pays en voie de développement, comme l'Inde, connaissent une augmentation rapide de leurs besoins en énergie. Ils réclament alors un « droit à polluer », soulignant que les pays riches ont vécu leur propre développement grâce à l'utilisation massives de combustibles fossiles mais au prix de considérables émissions de gaz à effet de serre. En quoi une transition énergétique efficace et rentable pourrait-elle résoudre ce problème ?

11 Idées reçues



30 min

Corrigé
p. 374

Nouveau programme

Les propositions suivantes peuvent être entendues fréquemment au cours de conversations. Il est important de savoir y répondre. À l'aide des connaissances acquises au cours des Chapitres 9, 10 et 11, expliquez en quelques lignes en quoi chacune de ces propositions est erronée.

- 1** « Non, le climat ne se réchauffe pas »
- 2** « Le climat a déjà changé et ce n'était pas catastrophique »
- 3** « C'est un phénomène naturel, un cycle »
- 4** « Ce n'est pas de notre faute »
- 5** « C'est la faute du soleil » *
- 6** « Un réchauffement du climat ne peut pas faire de mal »
- 7** « 5°C, ce n'est pas grand chose »
- 8** « Il a pourtant fait très froid cet hiver »
- 9** « On n'y peut rien »

* Pour ce point, vous pouvez vous aider de la figure suivante :

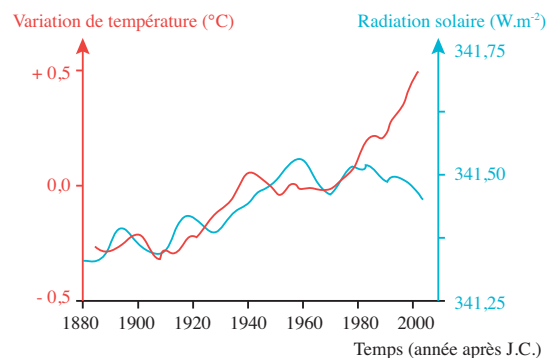


Figure 11.8 – Évolution de l'insolation et de la température moyenne sur Terre ces dernières décennies

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

1 QCM Vérification de connaissances

Énoncé
p. 361

- 1
 - a** Faux. Le GIEC teste les effets des différentes mesures possibles mais n'a aucun pouvoir de décision.
 - b** Faux. Le GIEC prend en compte l'importance du Soleil, mais celle-ci est secondaire.
 - c** Vrai. Il s'agit du « Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat ».
 - d** Faux. Il s'agit d'un organisme scientifique, non partisan et non orienté. Il prend en compte toutes les études.
- 2
 - a** Faux. Plus de la moitié est captée par des puits de carbone (océan et végétation terrestre notamment).
 - b** Vrai. Il représente 78% des émissions anthropiques de gaz à effet de serre.
 - c** Faux. Elles comprennent 76% de dioxyde de carbone, contre 16% de méthane.
 - d** Faux. Elles expliquent plus de 70% du réchauffement actuel.
- 3
 - a** Faux. Elle pourrait toutefois atteindre 2 m dans les pires scénarios.
 - b** Faux. Il s'agit du réchauffement si des mesures efficaces d'atténuation sont prises rapidement.
 - c** Vrai. Cela est dû à la hausse de l'évaporation et du nombre de jours de sécheresse.
 - d** Faux. Les pluies diluviennes devraient être plus fréquentes et plus violentes.
- 4
 - a** Faux. Les conséquences des catastrophes naturelles annulent largement les effets bénéfiques.
 - b** Vrai. Cela inclut des risques de malnutrition, de carences, de pauvreté et de violences.
 - c** Faux. Elle est particulièrement sensible aux inondations, sécheresses et incendies.
 - d** Faux. Les populations pauvres sont particulièrement sensibles aux baisses de rendements ou à la hausse des prix associée.

2 V/F Vérification de connaissances

Énoncé
p. 361

- 1 Résilience. Cela peut concerner une espèce, un écosystème, une société ou un système économique.
- 2 Adaptation. Cela concerne à la fois les sociétés et les écosystèmes naturels.
- 3 Atténuation. Cela passe principalement par la réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais aussi par l'augmentation des émissions négatives (puits de carbone) ou de l'albédo terrestre.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- 4 Services écosystémiques. Cela inclut des services culturels et économiques ainsi que différentes capacités d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques : absorption de CO₂, protection contre les risques naturels, etc.
- 5 Vulnérabilité. Dans le cadre des aléas climatiques, cela concerne à la fois les populations et les écosystèmes.
- 6 Risque (= Aléa × Vulnérabilité × Valeur).

3 V/F Vérification des connaissances

Énoncé
p. 362

- 1 Agriculture : la production agricole est très sensible à l'augmentation des phénomènes climatiques extrêmes et de leurs conséquences : inondations, sécheresses, tempêtes, feux de forêt, etc.
- 2 Ressource en eau : le changement climatique provoque une augmentation de l'évaporation et modifie la répartition temporelle et spatiale des pluies. Les précipitations sont ainsi plus fortes mais moins fréquentes : les sécheresses et les inondations sont plus fréquentes. Or ces dernières favorisent par ailleurs une augmentation de la concentration en polluants dans l'eau, notamment dans les régions subtropicales et/ou sèches.
- 3 Santé : on constate depuis le début du siècle un pic de mortalité associé aux canicules. L'insalubrité liée aux difficultés d'accès à l'eau potable dégrade également les conditions sanitaires dans le monde. Enfin, les maladies tropicales s'étendent vers les plus hautes latitudes : par exemple, le paludisme, responsable de 1.2 million de morts par an dans le monde, a récemment fait son apparition dans des zones jusqu'alors épargnées.
- 4 Fonte des glaces polaires : la disparition des glaces polaires menace la survie de certaines espèces et augmente le risque de collision des navires avec des icebergs.
Fonte des glaciers : 1 milliard de personnes dans le monde dépendent de l'eau douce fournie par la fonte des glaciers l'été. Si ceux-ci disparaissent, une importante pénurie d'eau pourrait se faire connaître.
- 5 Acidification des océans : la dissolution de CO₂ dans l'eau entraîne son acidification qui perturbe la formation de squelettes calcaires par les micro-organismes marins se situant à la base de la chaîne alimentaire océanique. L'intégralité des récifs coralliens risque également d'être menacée d'extinction en 2050, générant des conséquences désastreuses du fait de la biodiversité qu'ils hébergent ainsi que du rôle protecteur qu'ils jouent sur les côtes.
- 6 Économie : les coûts provoqués par le changement climatique excèdent largement ceux de sa prévention. Le coût d'une action contre le changement climatique, tant qu'il est encore temps, est infime par rapport aux dépenses qu'engendrerait ses multiples conséquences.

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

Les migrations de populations, la baisse des rendements agricoles et la multiplication des catastrophes naturelles pourraient ainsi déstabiliser l'économie mondiale.

4 Atténuation – Mesures

➔ Énoncé
p. 362

Nouveau programme

- 1
 - a La production d'énergie et de chaleur est le secteur d'activités humaines qui émet le plus de gaz à effet de serre. Limiter la consommation d'énergie par l'industrie diminue donc les émissions de CO₂ lors de sa production.
 - b La chaleur et les déchets produits par le secteur industriel peuvent être réutilisés pour le chauffage des bâtiments ou pour la production d'énergie, et le recyclage des déchets permet d'avoir à moins les transporter.
 - c La limitation des distances à parcourir permet de diminuer les émissions de CO₂ par les transports, notamment le transport routier.
 - d Une réorientation des flux d'investissement vers les entreprises les plus respectueuses de l'environnement peut les pousser à faire des efforts d'atténuation (rénovation, mise aux normes, etc.).

Le secteur industriel pourrait ainsi réduire de 25% sa consommation d'énergie grâce à ces quatre mesures.
- 2
 - a Une bonne gestion des forêts permet de maximiser le rôle de puits de carbone de la végétation terrestre. Les forêts ont également un rôle tampon : elles stabilisent le sol, empêchent la désertification et augmentent l'humidité par évapotranspiration.
 - b Une bonne gestion des sols permet également de favoriser le stockage de carbone atmosphérique dans le sol. Cela limite également son érosion lors de fortes pluies.
 - c Ces systèmes sont très sensibles à la pollution et aux variations d'apports en eau douce causées par le changement climatique. Leur protection est primordiale car les zones humides sont des écosystèmes riches mais fragiles avec un rôle tampon important, et les nappes phréatiques sont essentielles pour l'approvisionnement en eau potable.
- 3
 - a Le réchauffement des océans provoque une diminution de la biodiversité marine. Une gestion de la pêche est donc primordiale pour ne pas accélérer l'extinction des espèces dont dépend ce secteur.
 - b Le réchauffement climatique et l'anthropisation des paysages modifient les routes migratoires des espèces, d'où l'importance d'aider certains animaux à migrer.
 - c Les corridors écologiques mettent en lien différentes populations isolées d'une même espèce, permettant les brassages génétiques, ce qui limite leur risque d'extinction.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

5 Atténuation – Agro-alimentaire

Énoncé
p. 363

Nouveau programme

La réduction des émissions de gaz à effet de serre par l'agriculture est très dépendante de la demande des consommateurs, et nécessite des changements d'habitudes alimentaires. Il s'agit notamment de manger moins de viande, notamment la viande rouge, et de favoriser les produits locaux et de saison, qui n'ont pas voyagé sur des milliers de kilomètres au prix d'importantes émissions de CO₂. La réduction du gaspillage dans la chaîne d'approvisionnement est également primordiale puisque responsable d'importantes émissions « inutiles » de gaz à effet de serre lors de la fabrication, du transport, de l'emballage, de la conservation et de l'élimination de denrées finissant par être gaspillées.

6 Atténuation – Adaptation

Énoncé
p. 363

Nouveau Programme

- 1 **b** Cela permet d'éviter que ces populations ne dépendent d'une seule source de revenus en cas de destruction des cultures lors de catastrophes naturelles.
- 2 **a** Il s'agit de mesures de sensibilisation visant à favoriser l'achat des équipements les moins énergivores.
- 3 **b** Cela diminue les risques de marginalisation des populations en cas de catastrophe naturelle.
- 4 **b** L'efficacité des plans d'évacuation permet de diminuer drastiquement la vulnérabilité de la population.
- 5 **a** Il s'agit de diminuer les déperditions énergétiques donc les émissions de CO₂ causées par une production d'énergie supplémentaire.
- 6 **a** Il s'agit d'une réglementation interdisant la construction de logements ou d'équipements trop polluants.
- 7 **b** La prévention des risques naturels passe en premier lieu par la confection de cartes de risque et la mise en place de systèmes efficaces d'alerte.
- 8 **a** Ce genre de politiques fiscales contribue à diminuer la corrélation entre émissions de gaz à effet de serre et production économique. Leur mise en place est cependant complexe car les émissions de chaque entreprise doivent être comparées à un standard prenant en compte sa taille, son secteur d'activité, etc.
- 9 **b** Il s'agit de mesures de prévention du risque de crues.
- 10 **a** Nombre de ces systèmes de quotas et d'échanges ont récemment été mis en place, mais leur efficacité reste à prouver : trop peu contraignants, ils n'orientent pas vraiment le choix du consommateur.
- 11 **a** Il s'agit d'orienter les investissements vers des domaines et des entreprises moins émettrices de gaz à effet de serre.

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

- 12** **b** Cela permet d'éviter les pénuries de médicaments ou la saturation des structures de soins en cas de crise sanitaire.
- 13** **b** Il s'agit de diminuer respectivement la sensibilité et l'exposition des populations, donc leur vulnérabilité aux risques naturels.

7 Zones urbaines

→ Énoncé
p. 364

Nouveau programme

- 1** Les villes sont plutôt affectées par la pollution de l'air et de l'eau, du fait de la concentration de la population et des activités polluantes. La forte anthropisation des sols accentue également les inondations et les vagues de chaleur : les zones urbanisées sont ainsi environ 1°C plus chaudes que les territoires ruraux.
- 2** Suite à plusieurs décennies d'exode rural, les infrastructures des villes (systèmes d'approvisionnement en eau, en énergie, etc.) et les services essentiels (hôpitaux...) sont souvent déjà saturés. Or il s'agit de structures particulièrement vulnérables aux changements climatiques. Des mesures importantes d'adaptation sont donc cruciales, notamment dans les nouvelles mégalo-poles des pays en développement.
- 3** Les émissions de gaz à effet de serre par les villes peuvent être limitées grâce à une rénovation des bâtiments selon des normes strictes pour éviter la sur-consommation d'énergie (meilleure isolation des bâtiments, etc.). Les progrès technologiques dans le domaine de la construction pourraient ainsi permettre de réduire de 50% la demande en énergie par les logements et les bureaux d'ici 2050.
- Il s'agit également de restreindre au maximum les distances de trajet entre zones résidentielles et quartiers d'affaires, et de favoriser le recours aux pistes cyclables et aux transports en commun, afin de limiter les émissions de CO₂ par le trafic automobile.
- 4** Ces stratégies apportent de nombreux cobénéfices, notamment en terme de santé grâce à la réduction de la pollution. La rénovation des bâtiments améliore également la sécurité et la productivité des services, et participe à réduire la précarité et créer de nouveaux emplois. Enfin, le développement des pistes cyclables, espaces verts, commerces de proximité, etc. participe grandement à améliorer le bien-être, les interactions sociales et la qualité de vie.

8 Énergies de transition

→ Énoncé
p. 364

Nouveau programme

- 1** La part d'énergie d'origine nucléaire a diminué ces dernières années du fait des nombreux obstacles auxquels cette technologie est confrontée.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

En effet, des catastrophes historiques (Tchernobyl) ou plus récentes (Fukushima) ont exposé les risques de sécurité liés à cette technologie. On sait également que les centrales nucléaires produisent une grande quantité de *déchets nucléaires* qu'on ne sait pas traiter et qu'on est obligé d'enfouir en espérant que les générations futures se souviennent où ils se trouvent et sachent quoi en faire. Cette technologie présente également un lien fort avec le développement des armes nucléaires, d'où des restrictions vis-à-vis des pays jugés « instables », ainsi que sa mauvaise presse dans l'opinion publique.

Il s'agit toutefois d'un mode de production d'énergie à très faibles émissions de CO₂. Il serait ainsi beaucoup plus difficile d'amorcer une transition énergétique s'il fallait également remplacer l'énergie nucléaire par d'autres sources d'*énergies sobres* (solaire, éolien, hydraulique, etc.).

- 2 Les énergies renouvelables (éolien et solaire notamment) dépendent d'une source d'énergie non constante dans le temps et impossible à contrôler (vent, soleil). Celle-ci a peu de chance d'être maximale au moment où les besoins en énergie sont les plus grands, notamment le soir. Il faut donc stocker cette énergie sur des batteries pour la redistribuer ensuite.

Ces dernières années, le développement d'aimants, de capteurs solaires et de batteries sans métaux rares ont amené de nombreuses améliorations en termes de performance, de coût et d'impact écologique de ces sources d'énergie. En effet, les métaux rares ne sont généralement pas encore recyclables et doivent être extraits de mines dans des conditions humaines et environnementales souvent désastreuses. Ces constituants rares donc chers comptaient donc pour beaucoup dans le prix très élevé des premiers prototypes de panneaux solaires et d'éoliennes. Par ailleurs, les progrès technologiques récents ont permis le développement de procédés plus performants, maximisant leur rendement énergétique. La décennie 2020 est ainsi en mesure de connaître le déploiement à grande échelle de ces sources d'énergie à faible émission de CO₂.

- 3 L'idée de transition énergétique consiste à procéder par étapes, en commençant par les stratégies les plus simples et rapides à mettre en œuvre pour évoluer graduellement vers une complète *transformation* des sociétés.

Il peut ainsi être moins contraignant dans un premier temps de moderniser ou de remplacer les centrales à charbon par des centrales au gaz, avant de basculer complètement vers des énergies sobres. On parle alors d'*énergies de transition*.

- 4 Une réduction de la consommation d'énergie passe par une diminution de la demande en énergie (changement des habitudes de consommation, des régimes alimentaires, etc.) et par une amélioration des rendements énergétiques (acheminement de l'énergie, isolation des bâtiments, gaspillage, etc.). Cela repose notamment sur l'adoption de nouvelles normes énergétiques pour les bâtiments et les appareils électriques neufs, et sur une rénovation systématique des structures en place.

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

9 Transition – Efficacité

Énoncé
p. 365

Nouveau programme

- 1 Les législations favorisant les mesures d'atténuation sont pour l'instant très faibles et s'appliquent secteur par secteur plutôt que nationalement, ce qui les empêche d'agir sur l'ensemble de l'économie. Les sanctions pour le non-respect de ces législations sont également faibles voire inexistantes, par peur de freiner le dynamisme des secteurs considérés. De nombreux obstacles administratifs et politiques s'opposent ainsi encore à la généralisation et au durcissement de ces mesures.
- 2 Les changements de comportement reposent sur une modification globale de la perception du réchauffement climatique par la population, grâce à des mesures éducatives et informatives. Des changements de comportements peuvent également être incités par des mesures financières (systèmes de bonus, etc.).
- 3 Les politiques d'atténuation sont difficiles à mettre en œuvre car elles nécessitent un investissement économique important. Et même si les bénéfices réalisés sur les coûts de l'adaptation aux changements climatiques prévus compensent largement le prix d'une transition énergétique efficace, ceci ne sera rentable que sur le long terme.
Ces décisions peuvent ainsi sembler aller contre les intérêts propres des décideurs (marchés financiers, campagnes électorales, etc.), alors qu'ils ne porteront leurs fruits que dans les décennies à venir. Or c'est à court terme que fonctionnent les marchés financiers et les campagnes électorales. Ces décisions demandent ainsi une politique altruiste non seulement pour le plus grand nombre, mais également pour les générations futures.
Enfin, ces décisions sont difficiles à prendre de manière isolée : il peut sembler vain à un décideur d'adopter une mesure altruiste s'il a l'impression que la majorité de ses homologues ne prendra pas la peine de le faire.
- 4 Un soutien de l'opinion publique est essentiel pour prendre ces décisions. Une prise de conscience de l'aspect global de la transition est notamment importante : les mesures adoptées sont d'autant plus populaires qu'elles sont perçues comme une pierre ajoutée à l'édifice plutôt que comme une tentative isolée.
Ces mesures amènent également des cobénéfices dans de multiples domaines (santé, sécurité alimentaire, biodiversité, qualité de vie, accès à l'énergie, solidarité locale et internationale, etc.) qui peuvent motiver les pays à les mettre rapidement en place.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

10 Niveau de gouvernance

Énoncé
p. 365

Nouveau programme

- 1 Les mesures d'adaptation sont souvent le fait d'initiatives à l'échelle locale (villes, communautés, etc.). Ces initiatives sont toutefois difficilement généralisables. Avec la globalisation des risques associés au changement climatique, il semblerait opportun de coordonner ces initiatives à l'échelle nationale voire internationale.

POUR ALLER PLUS LOIN

Un niveau de gouvernance international pourrait sembler le mieux adapté (rôle du parlement Européen, de l'ONU, etc.), mais il est difficile à mettre en œuvre du fait du manque de moyens des instances internationales pour faire respecter leurs décisions.

- 2 Les contributions de chaque pays aux émissions totales de gaz à effet de serre ont été et vont continuer d'être inégales d'un pays à l'autre. Les pays très peuplés et/ou connaissant une forte croissance sont ainsi les principaux pollueurs (États Unis, Chine, etc.).

Le changement climatique est un problème partagé : les émissions de chaque pays ont des répercussions dans le monde entier et chaque pays en voit les conséquences, quelles que soient ses émissions.

Il peut sembler équitable que chaque pays prenne part dans l'effort de transition à hauteur de sa contribution totale aux émissions actuelles et passées. Pour autant, une coopération internationale reste de mise pour réduire efficacement les émissions de gaz à effet de serre.

- 3 Le développement de technologies de production d'énergies sobres bon marché pourrait inciter les pays en voie de développement à miser directement sur ces sources respectueuses de l'environnement pour pourvoir à leurs besoins croissants en énergie. Ils pourraient ainsi connaître un développement tout aussi efficace que les pays développés actuels, mais au prix d'émissions de gaz à effet de serre bien moindres.

11 Idées reçues

Énoncé
p. 366

Nouveau programme

- 1 Les données montrent déjà un réchauffement du climat de plus de 1°C depuis l'ère pré-industrielle. Or les modèles calculent que maintenir des émissions de gaz à effet de serre au même rythme qu'aujourd'hui conduirait de manière *extrêmement probable* à une poursuite de ce réchauffement. Cela signifie que seul un aléa majeur et potentiellement catastrophique (gigantesque éruption volcanique, pandémie,...) pourrait enrayer ce réchauffement.

AGIR FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE • CHAP. 11

⚠ ATTENTION

Il existe une multitude de modèles climatiques, dont les résultats peuvent être différents les uns des autres. Cette *variabilité* est exprimée dans les rapports du GIEC sous la forme de *probabilités*.

En tant qu'organisme scientifique, le GIEC s'interdit de présenter ses résultats comme des certitudes. Ainsi, si tous les modèles sont d'accord sur une donnée, il la présente comme *extrêmement probable*.

Exemple : « il est extrêmement probable que la hausse actuelle de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère soit due aux activités humaines, notamment l'usage des énergies fossiles. »

Remarque : cette manière de procéder est une source constante de confusion auprès du grand public.

- 2 Nous avons vu aux chapitres 9 et 10 que le climat a connu des variations naturelles durant l'histoire de la Terre. Certains sont tentés de prendre cet exemple pour minimiser les impacts du changement actuel. Cependant, une étude attentive montre au contraire l'extrême sensibilité du climat aux gaz à effet de serre, et le fossé majeur entre les échelles de temps de ces changements et du bouleversement actuel : les unes, géologiques, les autres, à la mesure d'une vie humaine.
En outre, ces variations ont toutes engendré des crises biologiques particulièrement graves, dont l'ampleur n'exclut pas la probabilité de provoquer l'extinction d'une espèce comme la nôtre.
- 3 Nous avons vu au Chapitre 10 que les cycles du climat répondent à des modifications de paramètres extérieurs appelés *forçages*. Or aucune force motrice connue autre que l'augmentation anthropique du CO₂ n'a pu être mise en évidence par les détracteurs du réchauffement climatique pour expliquer les changements actuels.
- 4 Les modèles climatiques confirment le lien entre réchauffement du climat et augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Or des mesures isotopiques permettent de démontrer que ce gaz est issu du brûlage de combustibles fossiles, donc des activités humaines. On peut par ailleurs calculer que les activités humaines émettent deux fois plus de gaz à effet de serre que ce qui s'accumule dans l'atmosphère. Elles en sont donc largement responsables.
- 5 Jusque dans les années 1980, une augmentation de l'activité du Soleil était assez bien corrélée avec le réchauffement du climat et a pu faire dire à certains qu'elle en était la cause. Or les modèles montrent que ces variations ne sont responsables que de 20% du réchauffement observé sur cette période. Cela a été confirmé durant les 35 dernières années : le réchauffement a continué d'accélérer tandis que le forçage solaire diminuait.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

- 6 Cette idée provient de la confusion entre réchauffement climatique et bouleversement des climats. Le premier concerne une hausse des températures moyennes, qui peut sembler anodine tant qu'on ne prend pas en compte la montée des eaux des océans, tandis que le second désigne une complète redistribution des régimes de précipitations, une extension des zones désertiques et une multiplication des phénomènes climatiques extrêmes, dont les conséquences peuvent être catastrophiques.
- 7 Nous avons vu que 5°C, c'est de l'ordre des plus grandes variations qu'a connues la Terre durant les 540 derniers millions d'années. Il s'agit de plus d'une moyenne sur l'ensemble du globe : le réchauffement est beaucoup plus fort sur les continents et notamment aux hautes latitudes.
- 8 Le climat global est une moyenne sur le long terme. Une vague de froid ne discrédite en aucun cas un réchauffement global, et peut au contraire aller dans le sens d'un bouleversement du climat. Il n'en reste pas moins que les deux premières décennies du siècle ont vu 19 des 20 années les plus chaudes depuis que les températures sont mesurées.
- 9 Les différents scénarios proposés par le GIEC (voir Figure 4.3 page 356 montrent bien l'importance d'une réaction humaine : une stratégie globale et efficace d'atténuation permettrait de limiter le réchauffement sous un seuil de 2°C tandis qu'une absence de mesures pourrait conduire à un réchauffement de $\approx 9^\circ\text{C}$ à l'horizon 2300 (par rapport à l'ère pré-industrielle).

Comportements, mouvements et système nerveux

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Le réflexe myotatique
3. Cerveau et mouvement volontaire

1 Introduction

La réalisation d'un mouvement fait intervenir un ensemble d'organes qui permettent la création et la transmission d'un message nerveux aboutissant à la contraction des muscles. Une contraction peut être volontaire, ou non. Dans ce dernier cas, on parle de *réflexe myotatique*.

PROBLÉMATIQUE

Comment interviennent le système nerveux et les muscles lors d'un réflexe myotatique ou lors de la réalisation d'une contraction volontaire ?



Retrouvez en vidéo les différentes étapes de la commande nerveuse du mouvement avec 

2 Le réflexe myotatique

Définition 1 : réflexe myotatique

Contraction involontaire et rapide d'un muscle suite à son propre étirement.

2.1 Un exemple de réflexe : le réflexe achilléen

2.1.1 - Mise en évidence du réflexe

Suite à la réalisation d'un choc au niveau du tendon d'Achille en utilisant un marteau neurologique, un mouvement involontaire est créé : la cheville entre en extension. Cette extension entraîne un étirement du muscle. Ce réflexe, faisant intervenir le tendon d'Achille, est appelé réflexe achilléen. Un réflexe similaire peut être observé au niveau de la rotule.

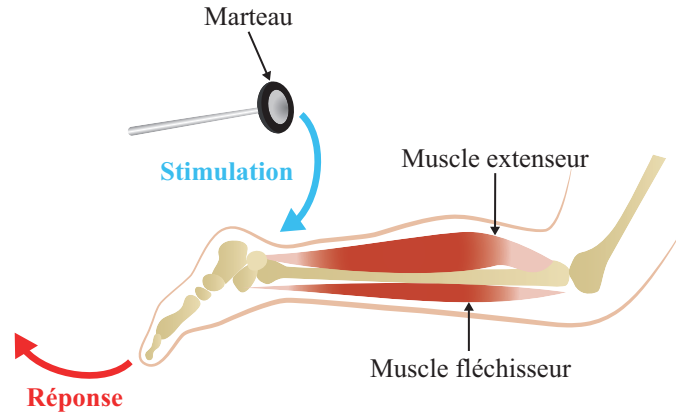


Figure 12.1 – D'une stimulation à une contraction musculaire : le réflexe achilléen

2.1.2 - La notion d'arc réflexe

Un réflexe myotatique, comme le réflexe achilléen, nécessite un ensemble d'organes permettant la perception de la stimulation, la transmission du message et la contraction musculaire. Cet ensemble de réponses est regroupé sous le nom d'*arc réflexe*. Cet arc fait intervenir la communication neuronale pour la conduction des messages. Le message est alors dit *afférent* s'il est transmis vers le centre nerveux, et *efférent* s'il a été généré par ce dernier.

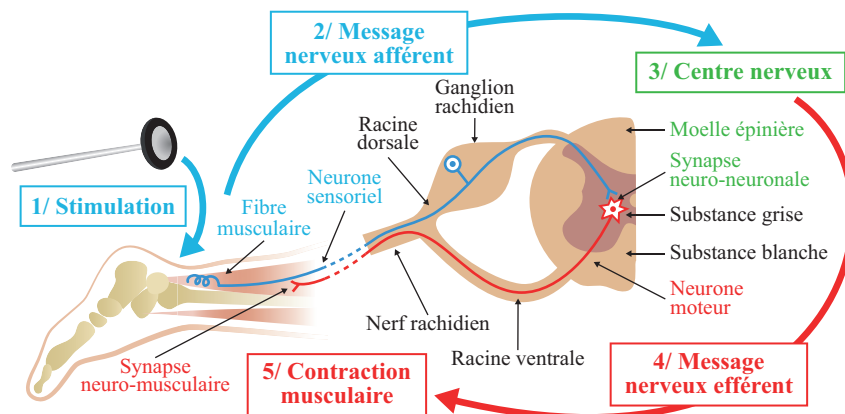


Figure 12.2 – Circuits neuronaux impliqués dans le réflexe achilléen

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

Élément du circuit	Structure anatomique	Caractéristiques
Récepteurs sensoriels	Fuseaux neuromusculaires	Émission d'un message nerveux quand stimulés en raison de l'étirement causé par le choc
Fibres nerveuses sensibles	Nerf sensitif passant par la racine dorsale de la moelle épinière	Conduction du message nerveux afférent (sensitif) vers le centre nerveux
Centre nerveux	Moelle épinière (au niveau de la substance grise)	Traitement des informations reçues et élaboration du message nerveux moteur
Fibres nerveuses motrices	Nerf moteur passant par la racine ventrale de la moelle épinière	Conduction du message nerveux efférent (moteur) vers les muscles
Organe effecteur	Muscle (au niveau des plaques motrices)	Contraction et donc production de la réponse réflexe

Tableau 12.1 – Caractéristiques des éléments de l'arc réflexe

Voir exercices 3, 5, 9 et 17.

2.2 Conduction du message nerveux

PROBLÉMATIQUE

Quels procédés permettent la conduction du message nerveux ainsi que la contraction musculaire ?

2.2.1 - Les neurones, des cellules particulières

Les neurones sont des cellules dont la fonction est de conduire un message rapidement à travers l'organisme. Les neurones sont compris dans les nerfs et possèdent une certaine régionalisation :

- le corps cellulaire, où est localisé le noyau, présente des prolongements cytoplasmiques appelés *dendrites*. C'est notamment au niveau de ces dernières que des contacts avec d'autres neurones ont lieu, appelés synapses neuro-neurales. Il est à noter que les corps cellulaires du neurone sensoriel et du motoneurone se situent respectivement dans le ganglion rachidien et dans la substance grise de la moelle épinière ;
- l'axone, long prolongement cytoplasmique (pouvant mesurer jusqu'à un mètre) où le message sera conduit jusqu'à la synapse ;

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- le bouton synaptique, extrémité de l'axone qui permet la mise en place de la synapse (neuro-neuronale ou neuro-musculaire).

Définition 2 : synapse

Zone de contact permettant la transmission de messages entre un neurone et une autre cellule. Si cette autre cellule est une cellule musculaire, la synapse est dite neuro-musculaire. Dans le cas où il s'agit d'un autre neurone, la synapse est dite neuro-neuronale. Une synapse est constituée d'un élément pré-synaptique (le bouton synaptique), d'une fente synaptique, et d'un élément post-synaptique (correspondant à une cellule musculaire, ou à un autre neurone).

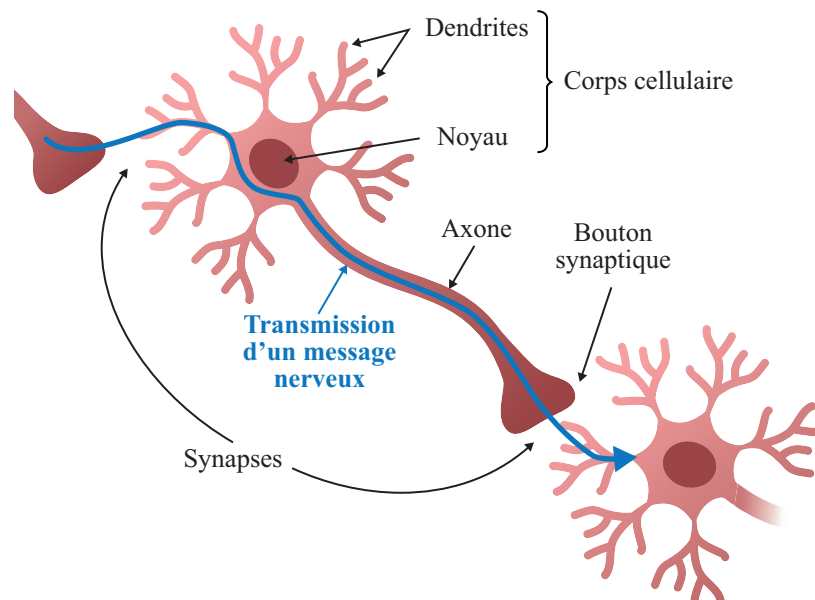


Figure 12.3 – Régionalisation des neurones

Au niveau des axones, les neurones peuvent être recouverts d'un revêtement appelé gaine de myéline, qui permet d'optimiser la conduction des messages nerveux.

2.2.2 - Le potentiel d'action et sa propagation le long de l'axone

Les milieux intra- et extra-cellulaire possèdent des ions (sodium, potassium, calcium etc.) en concentrations variables. Les différences de concentrations de ces ions de part et d'autre de la membrane sont à l'origine d'une différence de charges, que l'on appelle *potentiel de membrane*. Dans ce cas, la membrane est alors dite *polarisée*. Au repos, le potentiel de membrane des neurones est d'environ -70 mV (milliVolts). Il y a donc davantage de charges positives à l'extérieur de la cellule, et moins à l'intérieur.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

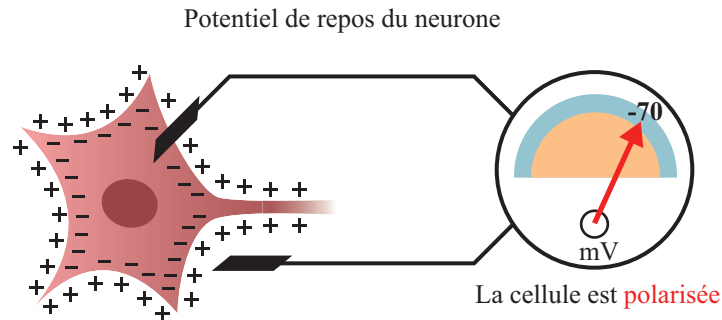


Figure 12.4 – La membrane des neurones est polarisée

La réception d'un message entraîne au niveau de la base de l'axone l'entrée ou la sortie d'ions. Localement, ceci engendre une modification brusque du potentiel de membrane, que l'on appelle *potentiel d'action*.

Définition 3 : potentiel d'action

Suite d'événements rapides (environ 1 ms) correspondant à des modifications brusques du potentiel de membrane de l'axone d'un neurone, permettant la transmission d'un message nerveux.

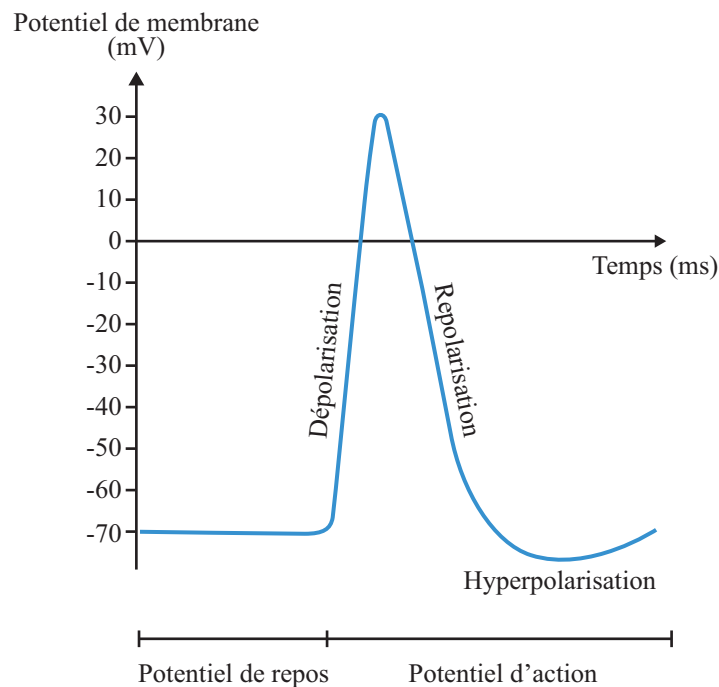


Figure 12.5 – Le potentiel d'action, ensemble de modifications du potentiel de membrane

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Le potentiel d'action est divisé en trois parties. Tout d'abord, le potentiel de membrane croît jusque 30 mV : la membrane se dépolarise. Dans un second temps, la membrane subit une repolarisation et le potentiel de membrane chute. Cette diminution atteint environ -80 mV puis se restabilise à -70 mV au cours de l'hyperpolarisation.

Un potentiel d'action en un site de l'axone conduit à la formation d'un autre potentiel d'action à proximité, et ainsi de suite, jusqu'au bouton synaptique, sans atténuation : les amplitudes des potentiels d'action sont les mêmes le long de l'axone.

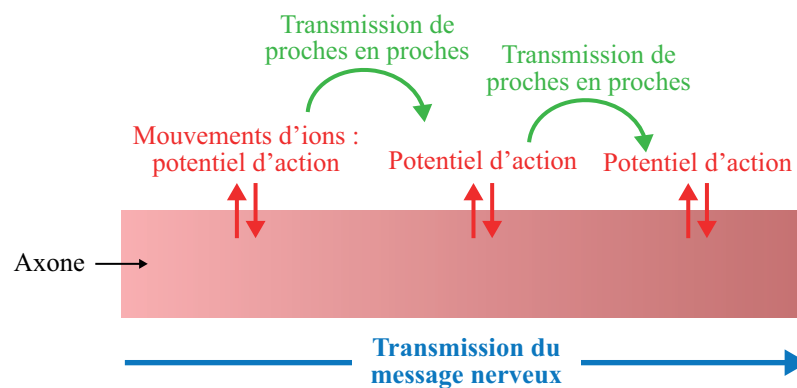


Figure 12.6 – La transmission du potentiel d'action

2.2.3 - La propagation et le codage du message nerveux

Des messages pouvant provenir d'autres neurones sont reçus au niveau des dendrites du corps cellulaire et s'additionnent à la base de l'axone. Si les stimulations sont suffisantes, c'est là que naît le premier potentiel d'action.

La création d'un potentiel d'action obéit à *la loi du tout ou rien*. Si la stimulation n'est pas assez forte, aucun potentiel d'action n'est formé. En revanche, si la stimulation est suffisante, quelque soit son intensité, le potentiel d'action restera le même : la dépolarisation ne sera pas plus forte.

Ainsi, le codage de l'intensité du message ne se fait pas en amplitude, mais il se fait en fréquence : plus l'intensité est élevée, plus la fréquence de potentiels d'action formés est grande.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

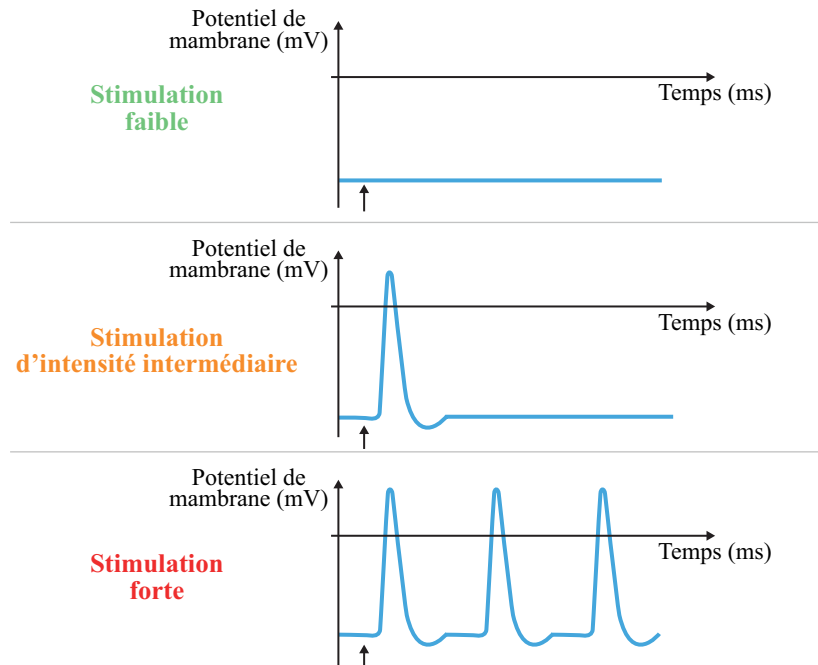


Figure 12.7 – Création de potentiels d'action en fonction de l'intensité de stimulation : loi du tout ou rien et codage en fréquence

Voir exercices 8, 14 et 15.

À RETENIR

Lors d'un réflexe myotatique, l'étirement d'un muscle entraîne la formation d'un message nerveux qui est conduit, grâce à des potentiels d'action, jusqu'à la moelle épinière via un neurone sensoriel. Ce dernier stimule en retour un motoneurone qui est en contact avec des cellules musculaires au niveau d'une synapse neuro-musculaire.

2.3 La transmission synaptique

PROBLÉMATIQUE

Comment un motoneurone peut-il conduire à une contraction des cellules musculaires à partir du fonctionnement de la synapse ?

Le message nerveux, de nature électrique, se propage le long des fibres nerveuses. Il doit aussi être transmis d'un neurone à un autre ou d'un neurone vers un organe effecteur comme le muscle. Au niveau de zones de connexions qualifiées de synapses, la transmission du message nerveux est en général de nature chimique.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Des vésicules contenant des molécules particulières, *des neurotransmetteurs*, sont présentes au niveau de l'élément pré-synaptique.

Définition 4 : neurotransmetteur

Molécule libérée par un neurone dans une fente synaptique lors de la transmission d'un message nerveux.

Lors de la survenue d'un message, les vésicules libèrent leur contenu dans la fente synaptique. *L'acétylcholine* est le neurotransmetteur libéré au niveau des synapses neuro-musculaires. Des récepteurs spécifiques de cette molécule sont présents dans la membrane de l'élément post-synaptique, participant ainsi à la transmission du message.

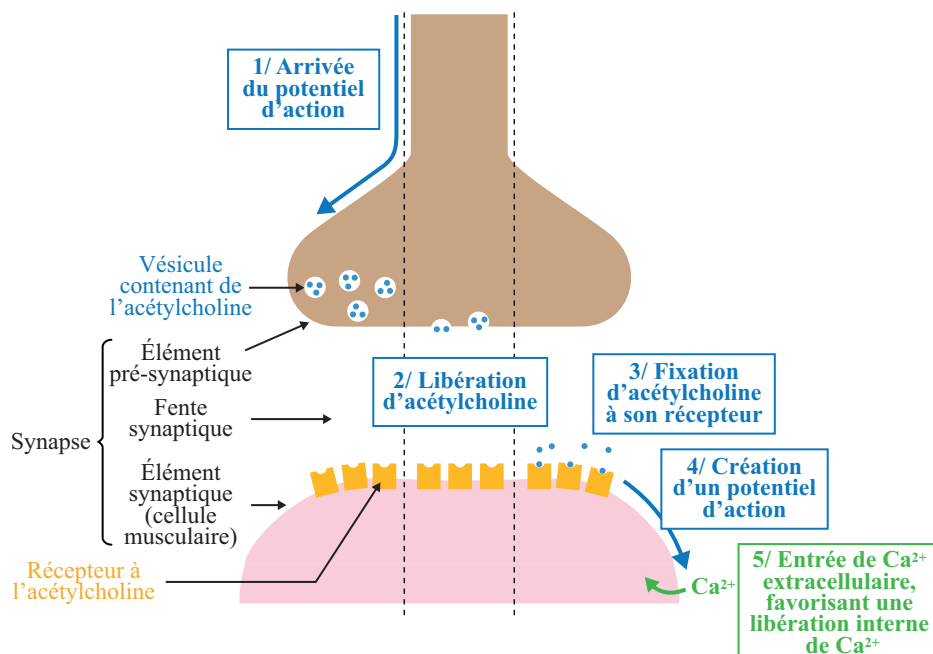


Figure 12.8 – Fonctionnement d'une synapse neuro-musculaire

La fixation de l'acétylcholine à son récepteur induit la création de potentiels d'action au niveau de la membrane de la cellule musculaire. Du calcium extracellulaire entre alors dans la cellule, ce qui entraîne une libération de calcium supplémentaire dans le cytoplasme par le réticulum sarcoplasmique, un organite des cellules musculaires. Ce calcium permet alors le raccourcissement temporaire de la cellule, ce qui se traduit par une contraction musculaire et donc une réponse au stimulus.

Le codage en fréquence de l'intensité de la stimulation laisse ici place à un codage biochimique en concentration : une intensité élevée induira la libération d'une grande quantité de neurotransmetteurs dans la fente synaptique.

Voir exercices 6, 10 et 12.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

▶ POUR ALLER PLUS LOIN

Dans la fente synaptique se trouvent des enzymes responsables de la dégradation de l'acétylcholine suite à sa libération. Le neurotransmetteur est ensuite recyclé par les neurones. Ceci permet de limiter le temps de contraction musculaire et d'éviter la tétanie.

↶ À RETENIR

L'arrivée du potentiel d'action au niveau de la synapse permet la libération d'acétylcholine dans la fente synaptique. Cette molécule, en se fixant à son récepteur, conduit à la création d'un potentiel d'action au niveau de la cellule musculaire, ce qui entraîne une forte augmentation de la concentration intracytoplasmique en calcium dans la cellule et la contraction musculaire.

2.4 Importance fonctionnelle des réflexes myotatiques

Les réflexes myotatiques sont primordiaux pour le maintien de la posture. Ils entraînent en effet une contraction basale des muscles appelée *tonus*. De plus, suite à un déséquilibre, ils permettent le rétablissement de la position.

Le réflexe achilléen est aussi un outil diagnostique : l'extension du pied qui fait suite à un choc sur le tendon d'Achille permet de s'assurer que le système neuromusculaire est efficace, et qu'aucune pathologie grave ne l'affecte.



 Voir une vidéo sur le réflexe myotatique avec 

3 Cerveau et mouvement volontaire

Le cerveau est un organe primordial chez l'être humain. Tout dysfonctionnement d'une région du cerveau peut engendrer des modifications du comportement ou peut avoir des conséquences sur la santé de l'individu.

❓ PROBLÉMATIQUE

La réalisation de mouvements volontaires nécessite des circuits neuronaux spécifiques. Comment s'effectue cette commande et en quoi le cerveau est-il ici nécessaire ?

3.1 Les régions cérébrales responsables de la commande du mouvement

Au niveau cellulaire, le cerveau est constitué de *neurones* permettant la transmission de messages nerveux, et de *cellules gliales*.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Définition 5 : cellule gliale

Cellule du cerveau formant l'environnement des neurones et permettant le fonctionnement de ces derniers. On peut mettre en évidence :

- les *astrocytes*, intervenant dans la protection, la nutrition et l'activité des neurones ;
- les *oligodendrocytes*, responsables de la formation de la gaine de myéline autour des axones de certains neurones ;
- les cellules de la microglie, responsables de la défense immunitaire du cerveau.

À l'échelle de l'organe, le cerveau peut être régionalisé en *aires* selon les fonctions associées. Au sein du cortex cérébral (c'est-à-dire la partie superficielle du cerveau), constituée de substance grise, contrairement à la moelle épinière où celle-ci est centrale alors que la substance blanche est en périphérie, plusieurs régions interviennent dans la commande du mouvement.

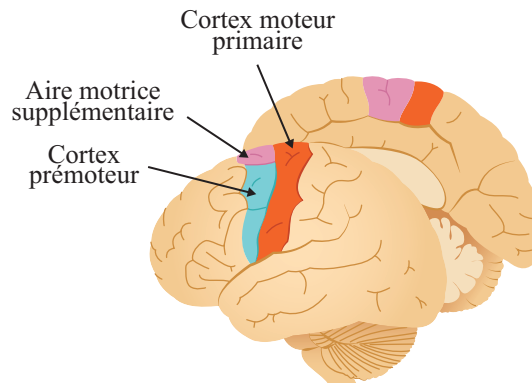


Figure 12.9 – Localisation des régions du cerveau impliquées dans la commande du mouvement

Le cortex pariétal, les aires motrices primaire et l'aire prémotrice jouent des rôles plutôt bien définis dans la commande du mouvement.

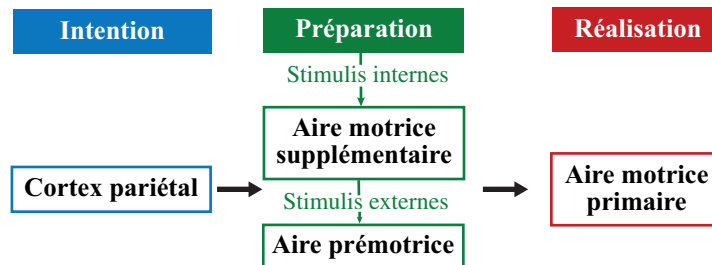


Figure 12.10 – Collaboration entre les différentes régions cérébrales à l'origine de la commande du mouvement

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

La commande du mouvement par le cortex moteur primaire présente deux grandes propriétés :

- les messagers nerveux moteurs qui partent du cerveau cheminent par des faisceaux de neurones et descendent dans la moelle épinière. À différents niveaux, ces neurones sont en connexion synaptique avec les motoneurones. Ces voies motrices se croisent, de telle sorte que la commande des mouvements volontaires est contralatérale : c'est l'aire motrice de l'hémisphère cérébral droit qui commande la partie gauche du corps, et inversement ;
- l'organisation du cortex cérébral est particulière. En effet, la taille occupée par les différentes aires corticales ne dépend pas de la taille de chaque organe, mais leur efficacité à contrôler la commande. On appelle *homuncule moteur* la représentation schématique des différentes parties du corps humain dans l'aire motrice primaire du cerveau. Ainsi la zone responsable de la motricité de la main est beaucoup plus importante que la zone responsable de la motricité de la cuisse par exemple.

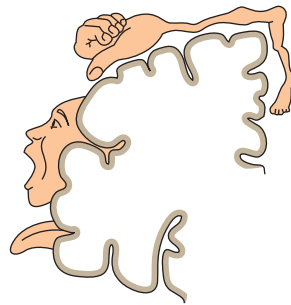


Figure 12.11 – Représentation des zones commandant les différents organes du corps humain : l'homuncule moteur

3.2 Les voies neuronales à l'origine de la commande volontaire

3.2.1 - Conduction du message du cortex jusqu'au muscle

Un message nerveux provenant du cortex moteur est conduit par des faisceaux de neurones contenus dans la moelle épinière. Ils entraînent l'activation de motoneurones qui conduisent à une contraction musculaire.

Voir illustration page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

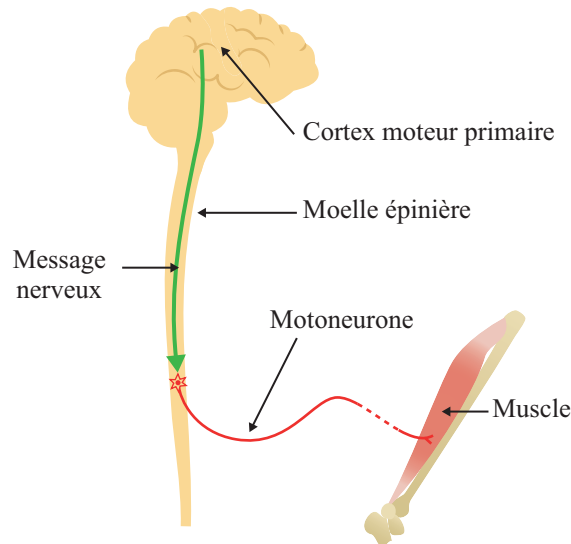


Figure 12.12 – Conduction d'un message nerveux du cortex au muscle

3.2.2 - Intégration des messages nerveux par le motoneurone

Comme nous l'avons vu précédemment, les motoneurones peuvent être stimulés par des neurones reliés au cortex moteur à l'origine de la commande du mouvement, et par le neurone sensoriel du muscle qu'ils innervent, participant au réflexe myotatique.

En réalité, les motoneurones reçoivent de multiples informations provenant de nombreux neurones par des synapses neuro-neurales. Selon le type de neurotransmetteur, une synapse peut être de deux types :

- une synapse est dite *excitatrice* lorsqu'elle est à l'origine d'une augmentation du potentiel de membrane postsynaptique, augmentation appelée *potentiel postsynaptique exciteur* (PPSE). L'arrivée de plusieurs PPSE conduit à la formation d'un potentiel d'action au niveau de l'axone du neurone excité si le seuil de stimulation est dépassé ;
- une synapse est dite *inhibitrice* lorsqu'elle engendre une diminution du potentiel de membrane postsynaptique, qui est appelée *potentiel postsynaptique inhibiteur* (PPSI). Un PPSI limite la création de potentiels d'action.

Voir illustration page ci-contre.

Les motoneurones reçoivent de multiples messages excitateurs et inhibiteurs, qu'ils doivent *intégrer*, autrement dit *sommer*.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

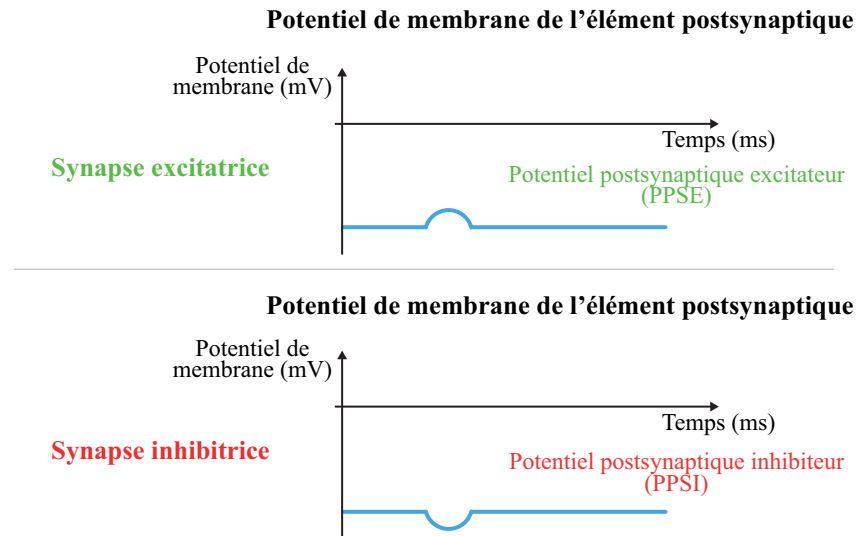


Figure 12.13 – Synapse excitatrice et synapse inhibitrice

Définition 6 : sommation spatiale

Intégration de messages arrivant au même moment et provenant de neurones différents.

Définition 7 : sommation temporelle

Intégration de messages provenant d'un seul neurone et arrivés en un court laps de temps.

Ainsi, si les messages excitateurs sont en quantité suffisante, il s'ensuit la transmission d'un message nerveux du motoneurone au muscle, à l'origine d'une contraction musculaire.

Exemple : dans le corps humain, les muscles fléchisseurs ont un comportement opposé aux muscles extenseurs : la contraction de l'un est associée au relâchement de l'autre. Ils sont dits *antagonistes*.

Suite à l'étirement d'un muscle fléchisseur, le neurone sensoriel de ce dernier est stimulé, et met en place un réflexe myotatique : le muscle fléchisseur se contracte. Le neurone sensoriel permet en parallèle l'activation d'un interneurone (un neurone situé entre deux neurones). Celui-ci partage une synapse inhibitrice avec le motoneurone du muscle extenseur. La stimulation de l'interneurone induit une inhibition de ce dernier, et donc un relâchement du muscle extenseur. Dans ce cas, le système permet donc bien un fonctionnement opposé des deux muscles.

Le motoneurone du muscle extenseur doit ainsi intégrer des messages liés à la commande volontaire, mais également aux neurones sensoriels du muscle extenseur et du muscle fléchisseur via un interneurone.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

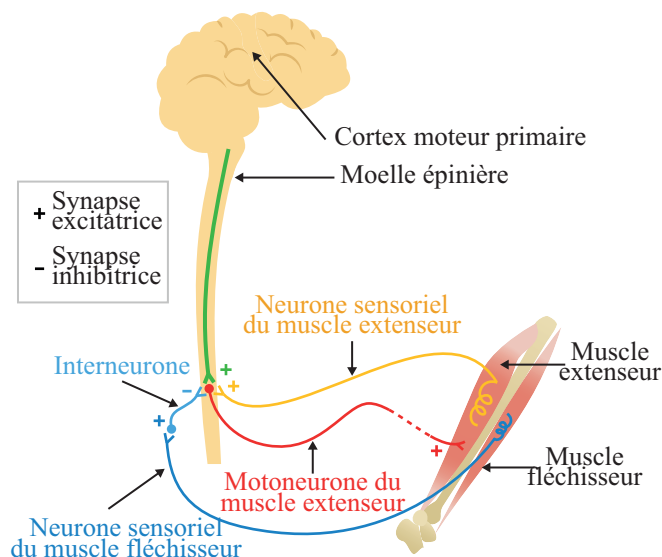


Figure 12.14 – Intégration des messages par le motoneurone

Voir exercice 16.

À RETENIR

La commande de la motricité volontaire naît au niveau de régions spécifiques du cerveau comme le cortex moteur. Le message est ensuite conduit par des neurones localisés dans la moelle épinière, puis par le(s) motoneurone(s) correspondant(s). Ces derniers intègrent des messages provenant de multiples synapses, conduisant, ou non, à une contraction musculaire.

3.3 Effets de substances pharmacologiques sur la commande du mouvement

Certaines molécules, pouvant être utilisées par les médecins, peuvent perturber la commande du mouvement. Au niveau synaptique par exemple, toutes les étapes peuvent être interrompues ou au contraire, prolongées :

- la libération des neurotransmetteurs dans la fente synaptique est empêchée par le botox, qui est utilisé en chirurgie esthétique pour relaxer les muscles du visage et faire disparaître les rides ;
- des agonistes de l'acétylcholine restreignent sa dégradation au sein de la fente synaptique, prolongeant les contractions ;
- le curare se fixe aux récepteurs à l'acétylcholine et empêche son action : c'est un antagoniste. Il permet un relâchement musculaire temporaire. À faible dose, il est utilisé en temps que myorelaxant en chirurgie mais à haute dose, il peut devenir mortel.

Voir exercice 11.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

3.4 Le cerveau, un organe plastique et fragile qu'il faut préserver

3.4.1 - La plasticité du cerveau

Au cours de la vie d'un individu, son cerveau est amené à se modifier structurellement et fonctionnellement. Le cerveau est un organe *plastique*.

Définition 8 : plasticité

Capacité d'un organe, d'un tissu ou d'une cellule à évoluer au cours du temps en fonction des modifications de son environnement.

Cette plasticité repose sur la capacité du cerveau à réarranger les connexions synaptiques. L'apprentissage et l'entraînement, par exemple, induisent un réarrangement synaptique avec davantage de connexions synaptiques au niveau de la région concernée. De plus, suite à une amputation, les neurones commandant l'organe amputé sont affectés à de nouveaux organes.

Enfin, la plasticité peut notamment être primordiale suite à un accident vasculaire cérébral, ou à une lésion d'une région du cortex moteur. Si la sévérité n'est pas majeure, le cerveau est ainsi capable de récupérer après un certain temps.

Cependant, la plasticité du cerveau diminue au cours du temps. En effet, l'âge entraîne une diminution du nombre de neurones au niveau du cortex, il y a donc moins de possibilités de réarrangements synaptiques.

Voir exercices 4 et 13.

3.4.2 - Le cerveau, un organe fragile

Les différentes régions du cerveau communiquent entre elles par des voies neuronales avec libération de neurotransmetteurs. Ceci explique par exemple que des comportements nécessaires à notre survie, comme la prise de nourriture, puissent activer le système de récompense du cerveau et soient associés au plaisir.

Cependant la prise de certains agents (alcool, drogue, etc.) active également le système de récompense, conduisant à une addiction. En raison de la plasticité du cerveau, des réarrangements synaptiques ont lieu à long terme, augmentant le seuil de récompense : des doses de plus en plus importantes sont nécessaires pour une même sensation de plaisir.

Voir exercice 7.

À RETENIR

Le cerveau est un organe plastique : en fonction des habitudes, de l'entraînement ou de l'apprentissage, certaines régions voient leur nombre de connexions synaptiques évoluer. Cependant, la prise de certains agents peut avoir le même effet, ce qui peut notamment engendrer une addiction. Le cerveau est donc un organe fragile, qu'il faut préserver.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

1 QCM Vérification de connaissances

5 min

Corrigé
p. 412

Pour chacune des questions suivantes, plusieurs propositions de réponses sont faites dont une seule est correcte. Laquelle ?

- 1 Le réflexe myotatique et la commande volontaire diffèrent car :
 - a les zones du cerveau impliquées sont différentes ;
 - b les muscles impliqués dans la posture ne peuvent pas être commandés par le cerveau ;
 - c les messages nerveux ne suivent pas les mêmes voies : du muscle à la moelle épinière puis de retour au muscle dans le premier cas, et du cerveau vers le muscle dans le second ;
 - d le réflexe myotatique fait intervenir des motoneurones, ce qui n'est pas le cas pour la commande volontaire du mouvement.
- 2 L'acétylcholine est :
 - a un neurotransmetteur, c'est-à-dire une molécule libérée par un muscle et agissant sur un neurone ;
 - b un neurotransmetteur, c'est-à-dire une molécule libérée dans une fente synaptique par un neurone ;
 - c une hormone, molécule libérée dans le sang et agissant à distance sur des cellules cibles ;
 - d un type de cellules impliqué dans le réflexe myotatique ;
 - e une molécule qui, si elle est consommée, peut induire une dépendance.

2 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 412

Qui suis-je ?

- 1 Neurone réalisant une synapse neuro-musculaire, pouvant induire une contraction musculaire
- 2 Capacité du cerveau à évoluer fonctionnellement et structuralement au cours du temps, en fonction de l'environnement, des habitudes et de l'entraînement
- 3 Région du neurone pouvant mesurer jusqu'à un mètre, où naissent les potentiels d'action, permettant la propagation du message nerveux

3 Moelle épinière - Structure



10 min

Corrigé
p. 412

Lycée Victor Hugo

- 1 Donnez les légendes correspondant aux chiffres de l'image page suivante.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

- 2 Indiquez où on peut trouver des prolongements de neurones d'une part, des corps cellulaires d'autre part (nommez les neurones), et enfin des synapses.

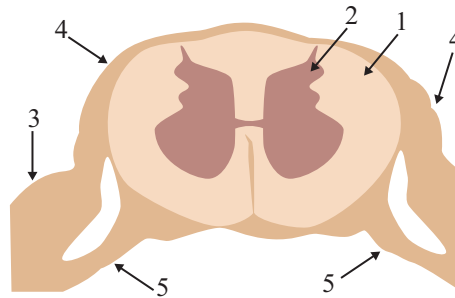


Figure 12.15 – Coupe transversale de moelle épinière

4 Cortex frontal – Apprentissage



15 min

Corrigé
p. 412

Lycée Saint Michel de Picpus, Paris

On effectue la comparaison des performances d'apprentissage sur des singes de même âge, qui ont subi une ablation du cortex frontal. Cette ablation n'a pas été réalisée au même moment :

- pour un premier lot, elle a eu lieu deux mois avant la naissance ;
- pour un deuxième lot, 50 jours après la naissance ;
- pour le dernier lot, deux ans après la naissance.

On fait subir à ces singes un test d'apprentissage et on mesure le nombre d'erreurs par rapport à un lot témoin non opéré.

Nombre d'erreurs par rapport au témoin non opéré

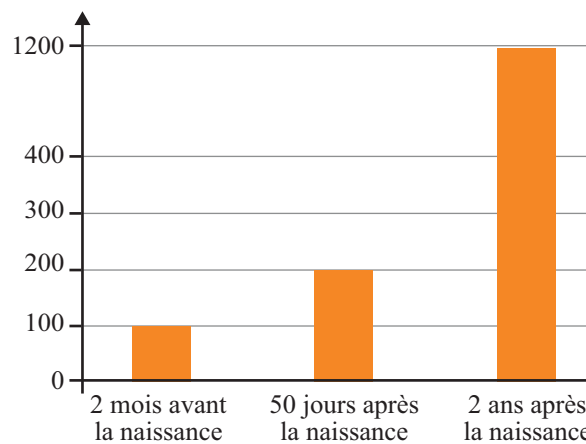


Figure 12.16 – Comparaison des performances des singes de même âge, opérés (ablation du cortex frontal) deux mois avant la naissance, 50 jours après la naissance et deux ans après la naissance, dans un test d'apprentissage

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

1 Exploitez les résultats de cette expérience.

L'expérience suivante a été réalisée sur un lot de jeunes rats d'un jour, dans les années 70, à l'université du Michigan. On a pratiqué sur la moitié des sujets des lésions bilatérales du cortex occipital et sur l'autre moitié une pseudo-opération, c'est-à-dire que ces rats ont subi tous les aspects de l'opération exceptée la lésion du système nerveux central. Pendant les trois premiers mois de leur vie, certains de ces animaux ont été élevés dans un environnement riche en stimulations physiques (objets dans la cage) et sociales (12 rats par cage), d'autres en revanche ont été placés dans un milieu beaucoup plus pauvre (pas d'objets dans la cage et trois rats par cage). L'équipe de chercheurs a ensuite mesuré la capacité de ces rats à traverser un labyrinthe complexe et de configuration changeante en évaluant le nombre moyen d'erreurs. Les groupes A et B sont constitués de rats placés dans un environnement riche en stimulations. Les groupes C et D sont constitués de rats placés dans un milieu pauvre en stimulations. Les groupes B et D sont constitués de rats qui ont subi une lésion corticale.

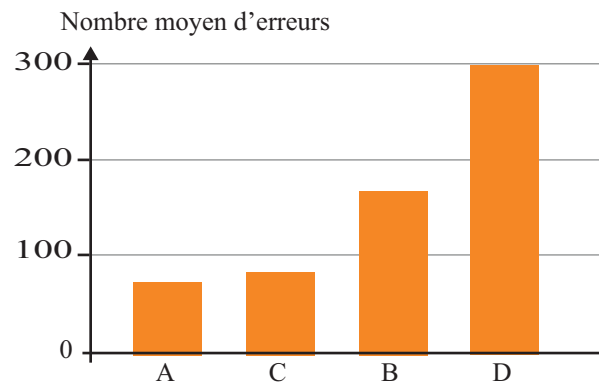


Figure 12.17 – Performances des différents lots de rats

2 Tirez des résultats de cette expérience des informations montrant l'influence de l'environnement sur le remodelage du cortex à la suite d'une lésion.

5 Réflexe myotatique



15 min

Corrigé
p. 413

Lycée Notre Dame, Meudon

Dans cet exercice, nous nous intéressons aux mécanismes impliqués dans la survenue du réflexe myotatique.

Une personne adopte la position 1. On lui pose dans la main une masse de 1 kilogramme. Son avant-bras se déplace légèrement vers le bas (position 2) et revient automatiquement en position initiale (position 3).

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

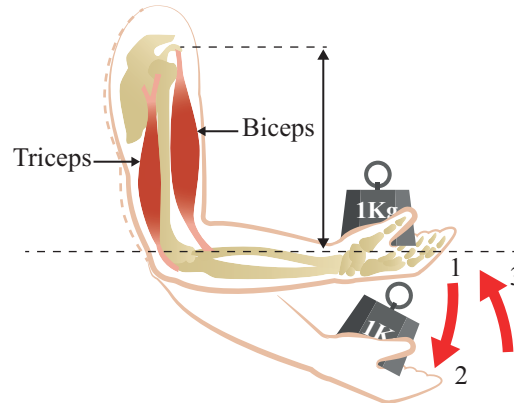


Figure 12.18 – Mouvements de l'avant-bras lors de l'application d'un poids
Décrivez les phénomènes qui permettent d'expliquer le mouvement de flexion dans ce réflexe.

6 Récepteur sensoriel – Codage



15 min

Corrigé
p. 413

Lycée Riquet, Saint Orens

On cherche à comprendre l'origine du message sensoriel, en s'appuyant sur l'étude du fonctionnement d'un type de récepteurs.

Les corpuscules de Pacini sont des mécanorécepteurs (récepteurs à la pression) localisés dans le derme. Il est possible par microdissection d'isoler l'un de ces récepteurs et d'enregistrer son activité lors de stimulations en contact avec le corpuscule lui-même (voir schéma ci-après).

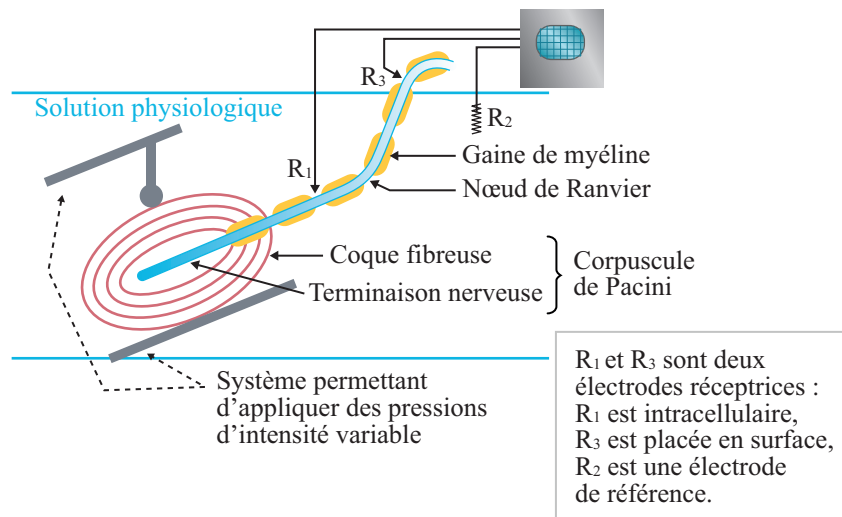


Figure 12.19 – Dispositif permettant d'enregistrer l'activité électrique d'un corpuscule de Pacini isolé

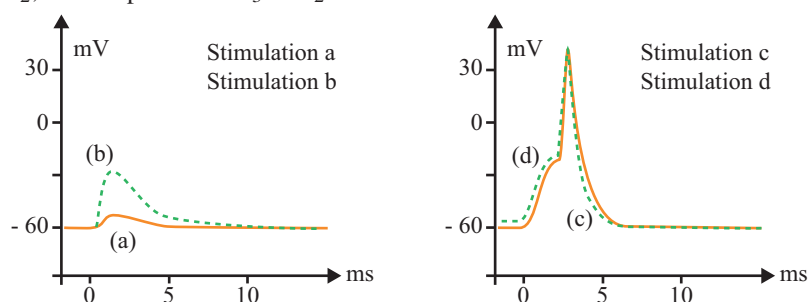
COURS

INTERROS

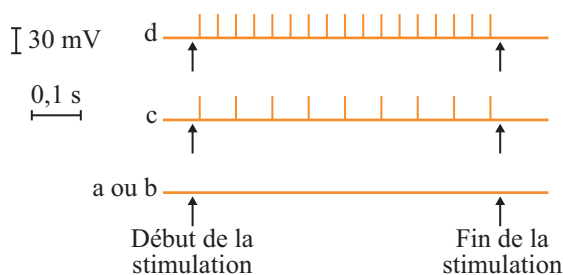
CORRIGÉS

INTERROS

On exerce sur le corpuscule une série a, b, c et d de pressions d'intensité croissante, mais de même durée, qui ont valeur de stimulation. On enregistre les variations de potentiel de la fibre de ce récepteur d'une part entre R_1 et R_2 , d'autre part entre R_3 et R_2 .



Réponses électriques recueillies par les électrodes R_1 et R_2 en fonction de l'intensité des stimulations



Potentiels d'action recueillis par les électrodes R_2 et R_3 en fonction de l'intensité des stimulations

Figure 12.20 – Potentiels recueillis par les électrodes R_1 et R_2 d'une part, R_2 et R_3 d'autre part, en fonction de l'intensité de stimulation

À partir de ces résultats, donnez les caractéristiques du fonctionnement du corpuscule.

7 Additions



15 min

Corrigé
p. 414

Nouveau programme

À partir du document ci-dessous, précisez en quoi la prise de drogue peut engendrer des modifications fonctionnelles du cerveau.

L'addiction aux drogues passe souvent par plusieurs phases : après la première exposition à la substance addictive, l'individu consomme de manière maîtrisée sa « drogue », mais ensuite il peut perdre le contrôle et glisse vers une consommation compulsive. Tous les consommateurs n'atteignent pas ce niveau d'addiction.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

Des chercheurs de l'université de Genève ont voulu savoir quelle était la différence, au niveau du cerveau, entre quelqu'un qui se drogue de manière compulsive et un utilisateur plus « raisonné ». Pour cela, ils ont mis au point un modèle de dépendance chez la souris. Les animaux pouvaient stimuler leur système de récompense dans le cerveau, simplement en appuyant sur un levier. En effet, la sensation de plaisir associée aux drogues est liée à l'activation du système de récompense, dans lequel agit le neurotransmetteur dopamine.

Pour savoir quelles souris faisaient un usage compulsif et incontrôlé de cette « drogue », les chercheurs ont puni les souris qui actionnaient le levier avec une petite décharge électrique. 60 % des souris ont continué à appuyer quand même sur le levier, tandis que les autres, comprenant la leçon, ont arrêté leur consommation. (...)

Les chercheurs ont alors observé que dans le cerveau des animaux addict à leur drogue un circuit était activé : il allait d'une zone impliquée dans la prise de décision (le cortex orbito-frontal) aux ganglions de la base du système de récompense.

Futura-sciences Décembre 2018

8 Fibre nerveuse - Stimulation



20 min

Corrigé
p. 415

Lycée Saint Michel de Picpus, Paris

Dans le cadre de l'étude des propriétés d'un axone géant de Calmar, on réalise le montage ci-après :

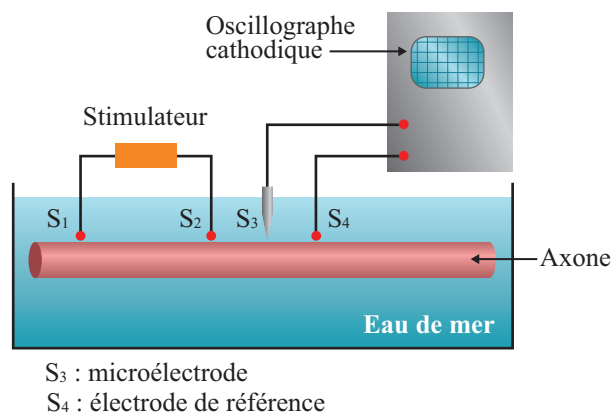


Figure 12.21 – Dispositif de stimulation et d'enregistrement

- 1 Au début de l'expérience, la microélectrode S₃ est posée à la surface de l'axone ; sur l'écran de l'oscilloscope on observe la partie AB du tracé ci-après. Au temps t₁, on fait pénétrer la microélectrode S₃ à l'intérieur de l'axone et on enregistre la portion CD. Au temps t₂, on porte une stimulation électrique avec les électrodes stimulatrices S₁-S₂ et on obtient la partie EF du tracé page ci-contre.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

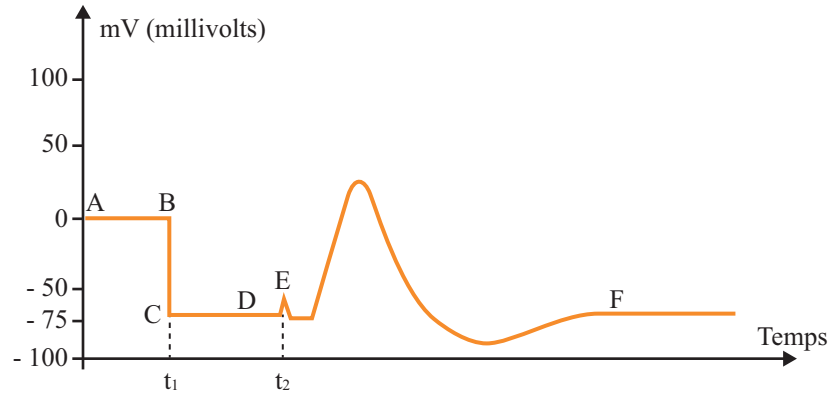


Figure 12.22 – Enregistrement obtenu avant et après stimulation

Interprétez successivement les différentes parties de cet enregistrement et concluez quant à la nature des phénomènes observés.

- 2 Indiquez comment cet enregistrement serait modifié si, avant la stimulation au temps t_2 :
 - 1^{er} cas : on avait éloigné les électrodes S_3 - S_4 des électrodes de stimulation S_1 - S_2 ;
 - 2^e cas : on avait lésé l'axone entre l'électrode de stimulation S_2 et l'électrode d'enregistrement S_3 .
- 3 On porte sur l'axone des stimulations électriques d'intensités croissantes I_1 , I_2 , I_3 , I_4 . On obtient l'enregistrement ci-après.

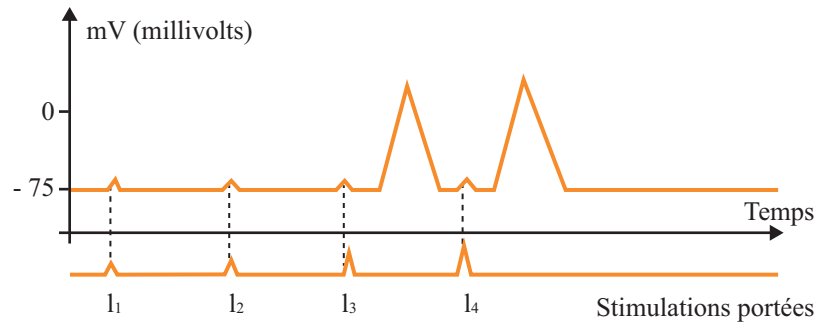


Figure 12.23 – Enregistrement obtenu pour différentes intensités de stimulation

Analysez cet enregistrement. Quelles conclusions pouvez-vous en tirer quant aux propriétés de l'axone ?

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

9 Section – Réseau neuronique

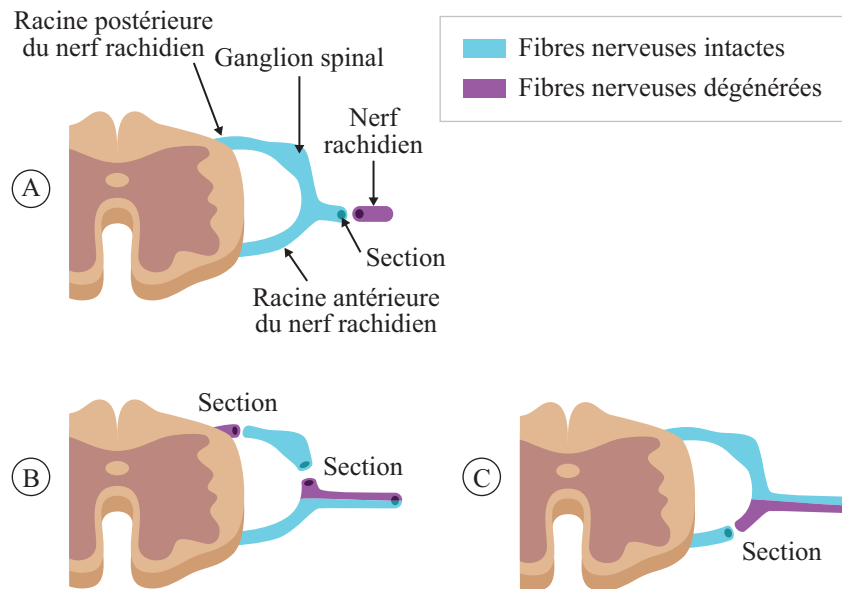


20 min

Corrigé
p. 415

Lycée Riquet, Saint Orens

Interprétez chacune des expériences A, B et C présentées ci-après :



Expériences de section	Conséquences immédiates	Observations à plus long terme
Expérience A	La région du corps innervée par le nerf rachidien sectionné perd toute sensibilité et toute motricité.	Toutes les fibres nerveuses de la section de nerf séparée de la moelle épinière dégèrent.
Expérience B	La région du corps innervée par le nerf rachidien perd toute sensibilité ; la motricité volontaire est maintenue, que la section soit réalisée d'un côté ou de l'autre du ganglion.	Les fibres nerveuses dégèrent de part et d'autre du ganglion rachidien isolé, ainsi que dans la partie dorsale du nerf rachidien.
Expérience C	Toute la région du corps innervée par le nerf perd sa motricité.	Les fibres nerveuses dégèrent dans la partie de la racine antérieure séparée de la moelle épinière, ainsi que dans la partie ventral du nerf rachidien.

Tableau 12.2 – Modalités et résultats de trois expériences

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

10 PA - Synapse



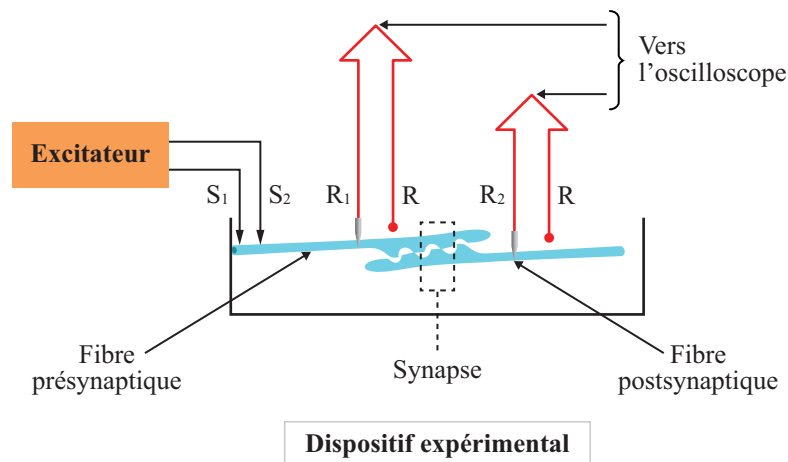
20 min

Corrigé
p. 416

Lycée Saint Martin, Rennes

Certains neurones du calmar (sorte de petit poulpe) présentent des synapses géantes. On isole deux fibres séparées par une telle synapse et on monte l'expérience représentée sur le document 1. Une stimulation permet d'obtenir sur l'oscilloscope l'enregistrement figuré sur le document 2.

Document 1



Document 2

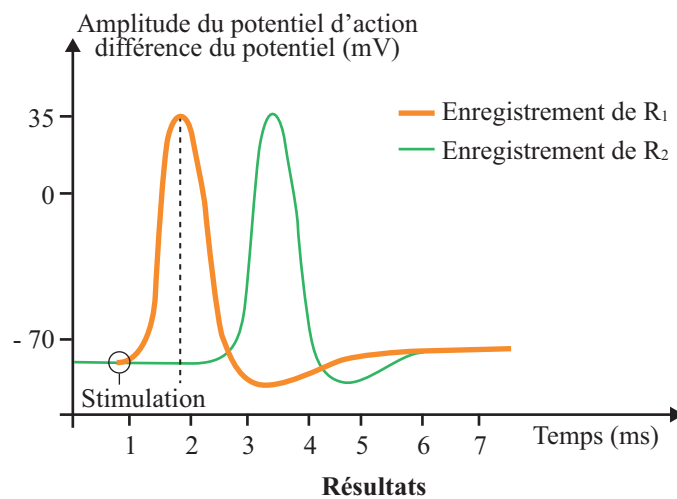


Figure 12.25 – Dispositif expérimental (document 1) et résultats (document 2)

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

- 1 Nommez chacun des deux potentiels obtenus.
- 2 La distance entre R_1 et R_2 est de 10mm. Sachant que la vitesse de propagation d'un potentiel sur une fibre est de l'ordre de 11 m.s^{-1} , calculez le délai qui devrait séparer les deux potentiels.
- 3 Mesurez ce délai sur l'enregistrement et déduisez-en l'influence des synapses sur la vitesse de transmission du message nerveux.

11 Synapse - Curare



20 min

Corrigé
p. 417

Lycée Saint Martin, Rennes

On étudie les effets de l'acétylcholine sur le muscle droit abdominal de la grenouille. Ce muscle, après prélèvement, est maintenu dans un bain physiologique adéquat.

- Dans un premier temps, on introduit dans le bain différentes concentrations d'acétylcholine et on enregistre, pour chaque concentration, l'amplitude de la réponse (courbe A).
- Dans un deuxième temps, on réalise de nouveau la même expérience, mais avant d'introduire l'acétylcholine, on déverse dans le bain une quantité définie de curare (courbe B).

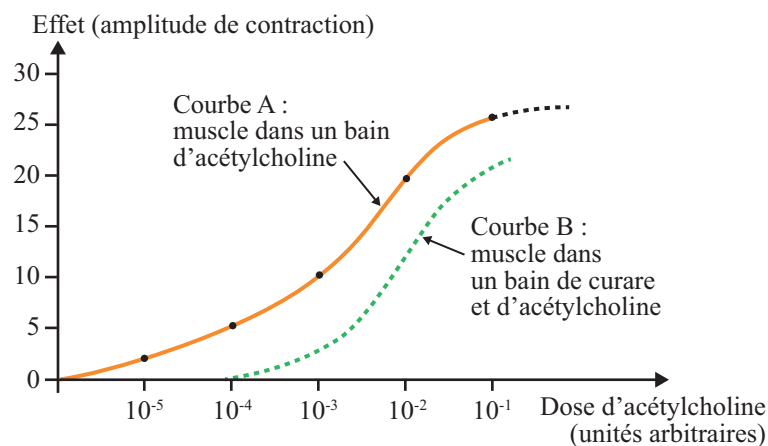


Figure 12.26 – Effet de l'acétylcholine et effet du mélange du curare et de l'acétylcholine sur le muscle

- 1 Présentez et décrivez la courbe A.
- 2 Expliquez l'évolution de la courbe A.
- 3 À partir de la comparaison des deux courbes, proposez une explication à l'action du curare.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

12 Synapse – myasthénie



20 min

Corrigé
p. 417

Lycée Jules Ferry, Paris

La myasthénie est une anomalie qui se caractérise par une difficulté croissante à contracter efficacement les muscles.

À partir de l'exploitation rigoureuse des résultats expérimentaux, proposez une hypothèse explicative du mécanisme à l'origine de la myasthénie.

Document A

À l'aide d'électrodes réceptrices, on mesure les potentiels d'action musculaires après des stimulations identiques de l'axone moteur. On réalise cette manipulation sur deux jonctions neuromusculaires, celle d'un individu sain et celle d'un individu myasthénique.

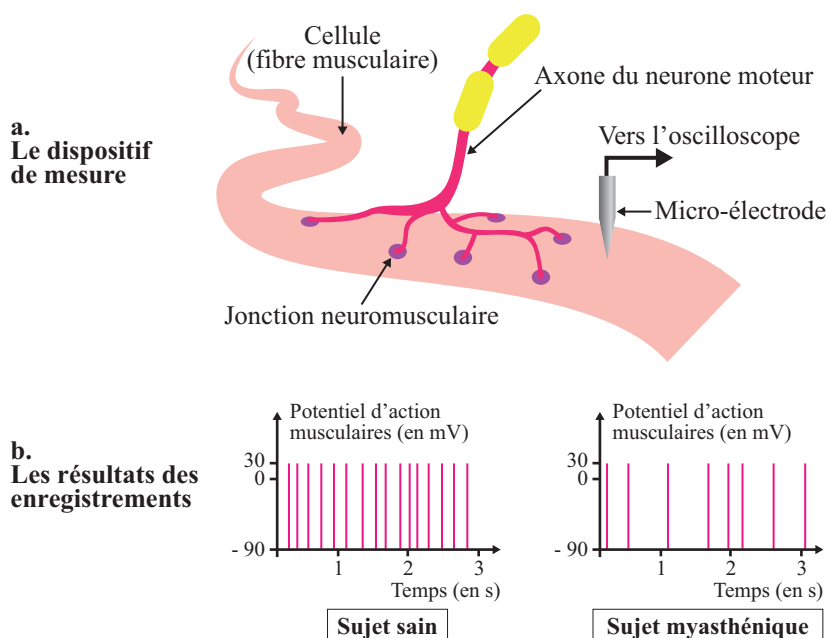


Figure 12.27 – Étude expérimentale des perturbations dans les contractions musculaires

Document B

L'alpha bungarotoxine, molécule toxique extraite du venin de serpent, possède la propriété de se fixer sur les récepteurs à l'acétylcholine. Son injection à une souris saine entraîne des symptômes analogues à ceux de la myasthénie.

Par autoradiographie, on peut localiser l'alpha bungarotoxine radioactive sur la membrane d'une cellule musculaire : le résultat de cette localisation chez un individu sain (A) et chez un individu myasthénique (B) est illustré par le document page suivante.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

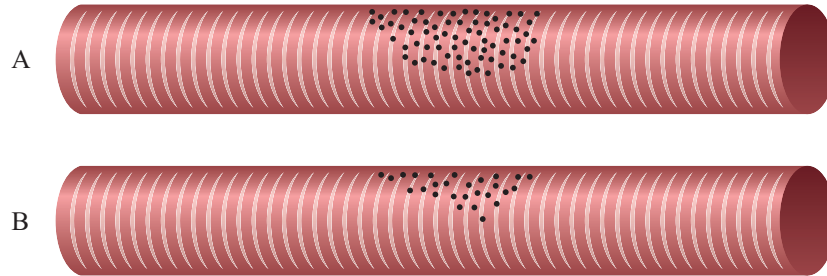


Figure 12.28 – Résultats obtenus sur des portions de cellules musculaires

13 Cortex moteur - apprentissage



20 min

Corrigé
p. 418

Lycée Hoche, Versailles

On cherche à connaître les mécanismes nerveux cérébraux à l'origine des apprentissages. Pour cela on étudie l'activation de zones corticales au cours d'un apprentissage manuel. L'apprentissage consiste en des oppositions successives au pouce des extrémités des doigts 1 à 4 suivant une séquence précise « 4, 1, 3, 2, 4 », ceci en utilisant la main non dominante et sans la regarder. La séquence sera répétée pendant 10 à 20 minutes tous les jours durant les trois semaines du test. La séquence contrôle est une séquence opérée dans les mêmes conditions (main non dominante sans regarder) mais qui ne sera pas répétée pendant les trois semaines.

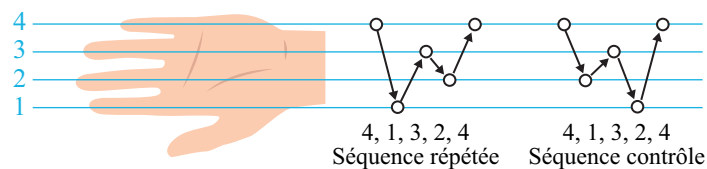


Figure 12.29 – Séquence de mouvements des doigts réalisés au cours de l'expérience

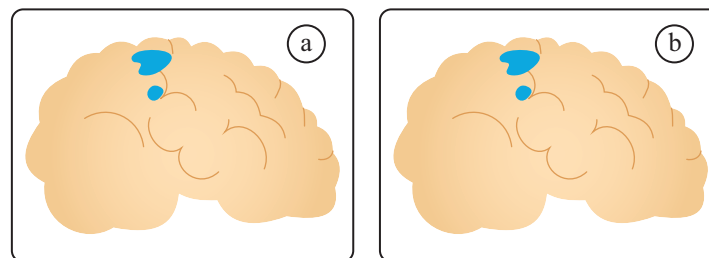


Figure 12.30 – Résultats obtenus par imagerie cérébrale montrant les zones corticales activées le premier jour de l'entraînement
(a : 4, 1, 3, 2, 4; b : séquence contrôle)

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

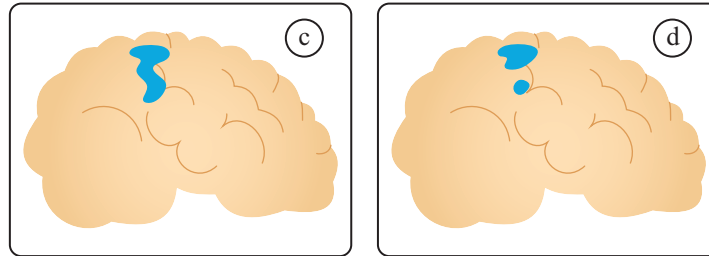


Figure 12.31 – Résultats obtenus par imagerie cérébrale montrant les zones corticales activées à la fin des trois semaines d'apprentissage (c : 4, 1, 3, 2, 4; d : séquence contrôle)

Quelles informations et conclusions peut-on tirer de cette expérience ?

- 1 Dans un premier temps, étudier le protocole pour en déduire l'hypothèse que cette expérience vise à valider, puis étudier les résultats en comparant les situations deux à deux.
- 2 Faire une synthèse des observations de manière à répondre à la problématique de départ (mécanismes neuronaux d'apprentissage).

14 Motoneurone - Synapse



25 min

Corrigé
p. 419

Lycée Colbert, Lorient

Afin de préciser les transmissions synaptiques impliquées dans un réflexe myotatique, des expériences ont été réalisées au niveau des motoneurones médullaires M_1 et M_2 . Une fibre sensitive F_1 provenant du muscle extenseur est stimulée et les messages sont enregistrés en différents points : E_1 , E_2 , M_1 et M_2 .

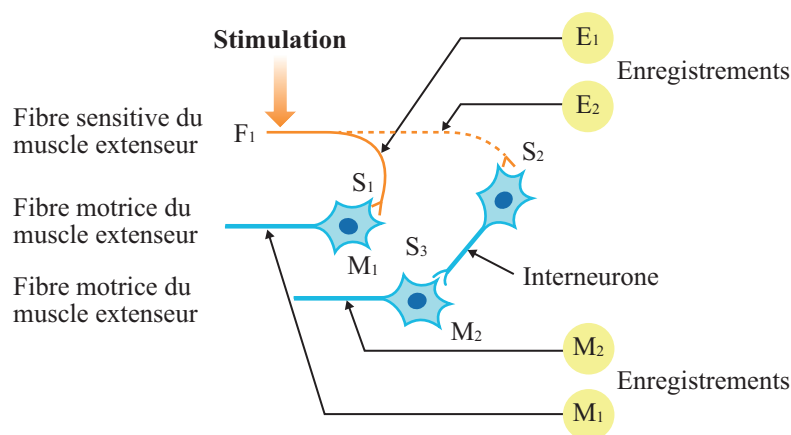


Figure 12.32 – Schéma du protocole expérimental

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

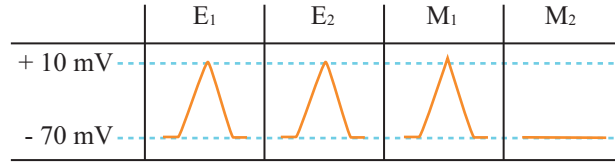


Figure 12.33 – Résultats expérimentaux suite à une stimulation efficace de F_1

Recherchez dans ces résultats expérimentaux la preuve que les deux muscles concernés sont des muscles antagonistes, c'est-à-dire des muscles ayant un effet opposé sur le membre.

15 Axone – PA



30 min

Corrigé
p. 419

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

Analysez avec rigueur ces deux séries d'expériences et présentez l'interprétation des résultats obtenus ; précisez ensuite les propriétés de l'axone mises en évidence en complétant avec quelques connaissances.

Première série d'expériences

Le schéma ci-après présente les conditions expérimentales : E_1 est une microélectrode qui peut être introduite à un moment choisi dans l'axone, E_2 est une électrode de référence.

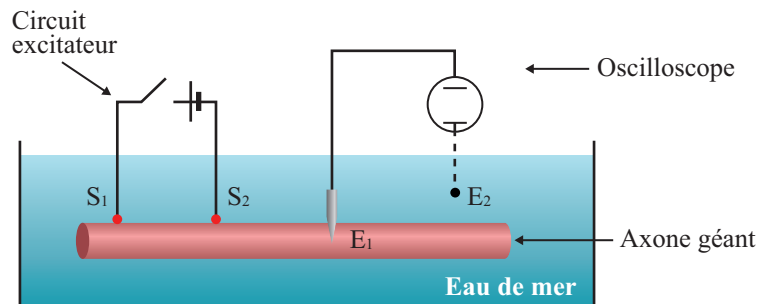


Figure 12.34 – Dispositif de stimulation et d'enregistrement

On applique successivement (espacées d'environ 3 millisecondes) des stimulations électriques d'intensité croissante : S_1 , S_2 , S_3 , S_4 et S_5 : on obtient le tracé 1 (voir page suivante).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

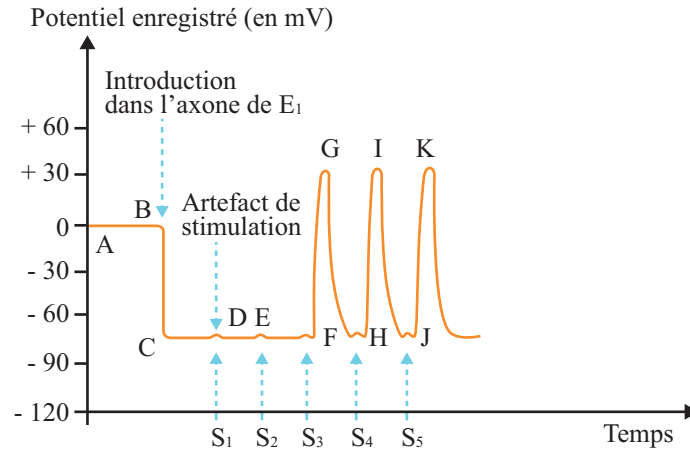


Figure 12.35 – Tracé 1

E_1 étant maintenue enfoncée, on augmente la vitesse de balayage de façon à mieux analyser le tracé élémentaire obtenu en G ou I ou K : on obtient le tracé 2.

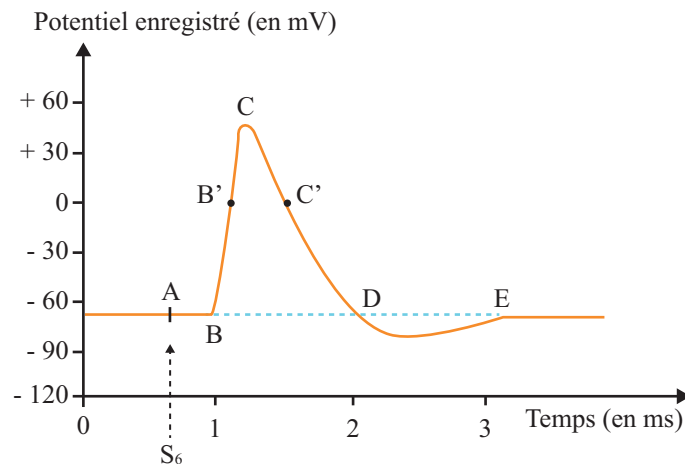


Figure 12.36 – Tracé 2

Deuxième série d'expériences

À l'aide du montage schématisé ci-après, on pratique la stimulation d'un axone de Calmar et on enregistre les phénomènes « électriques » grâce à trois paires d'électrodes réceptrices de plus en plus éloignées du point de stimulation.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

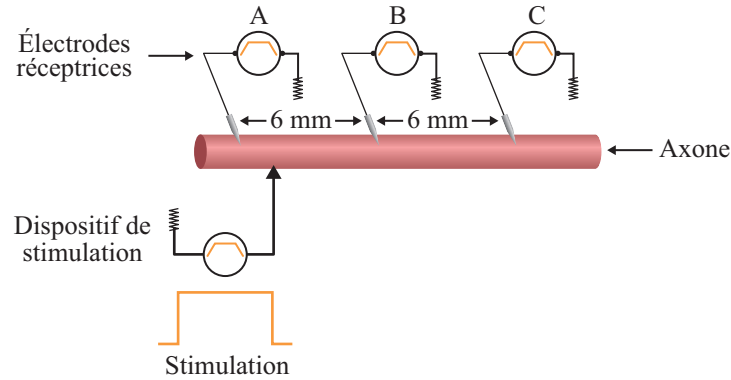


Figure 12.37 – Dispositif de stimulation et d'enregistrement

Les phénomènes électriques enregistrés après une stimulation infraliminaire ou bien après une stimulation supraliminaire (appliquée à $t = 0$ ms) sont représentés sur les documents 1 et 2 ci-après :

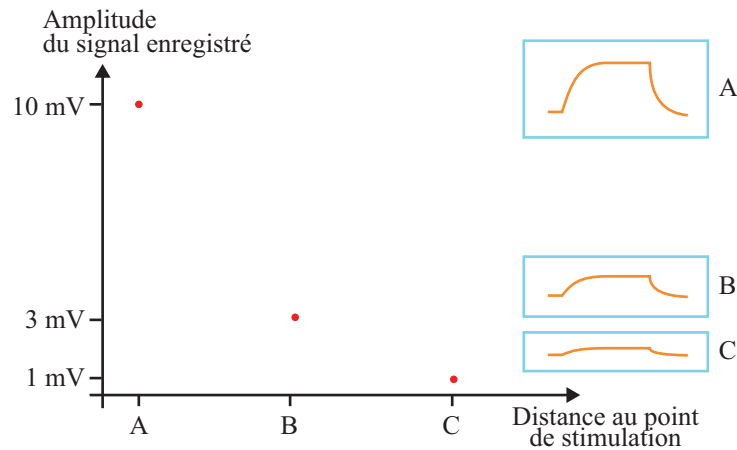


Figure 12.38 – Document 1 : Réponse de l'axone à une stimulation infraliminaire

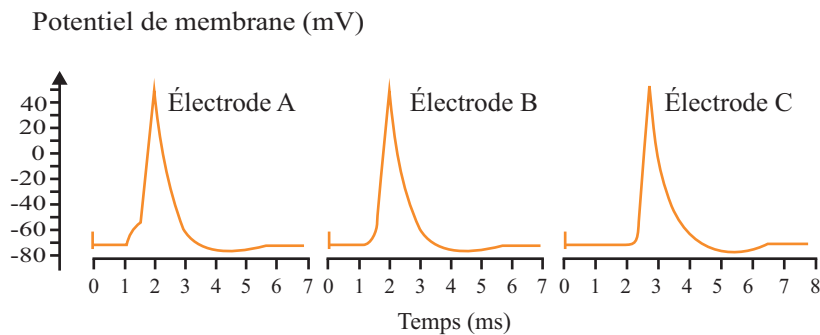


Figure 12.39 – Document 2 : Réponse de l'axone à une stimulation supraliminaire

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

16 Cortex moteur - Réflexe



25 min

Corrigé
p. 421

Lycée Hoche, Versailles

La sclérose latérale amyotrophique (SLA) ou maladie de Charcot, est une maladie neurologique progressive et très invalidante touchant sélectivement les systèmes moteurs. La perte de motricité associée à la SLA est la conséquence d'une dégénérescence de deux types de neurones. La perte des neurones pyramidaux, situés entre le cortex moteur et la moelle épinière, est responsable de troubles moteurs centraux et celle des motoneurones, directement connectés avec les muscles, des atteintes périphériques. Les patients présentent successivement, durant l'évolution de la maladie, les deux types de symptômes.

	Troubles moteurs centraux	Atteinte périphérique
Faiblesse musculaire	Oui	Oui
Atrophie musculaire	Non	Oui
Réflexes	Accrus	Diminués
Tonus	Accru	Diminué

Tableau 12.3 – Les symptômes des troubles moteurs liés à la sclérose latérale amyotrophique

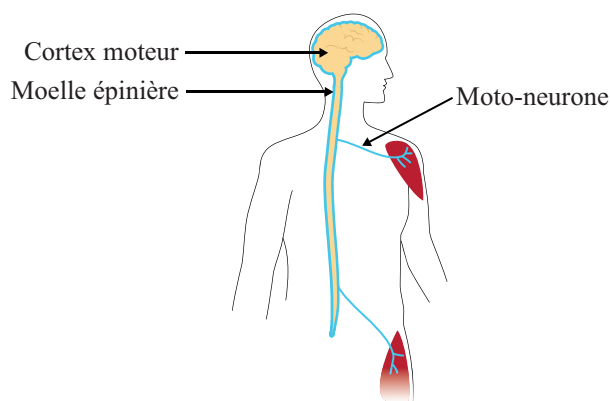


Figure 12.40 – Schéma à compléter présentant le circuit neuronique de la commande volontaire du mouvement

Après une lecture attentive des informations de l'énoncé, représentez schématiquement les connexions nerveuses en relation avec un motoneurone de la moelle épinière (afférences, efférences).

Faites ensuite évoluer votre schéma de manière à expliquer les troubles qui se manifestent au cours de la maladie ; les symptômes du tableau devront être révélés par vos schémas, appuyés de quelques commentaires d'analyse en relation avec vos connaissances.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

17 Réflexe de fuite



30 min

Corrigé
p. 423

Lycée Charlemagne, Paris

Vous écrivez pour le magazine « la Hulotte », bien connu des naturalistes ; en reliant l'ensemble des documents, expliquez les deux comportements différents des papillons selon la distance de leur prédateur, la chauve-souris ; vous terminerez par un schéma fonctionnel du réflexe permettant au papillon de s'éloigner (à toute vitesse !) si la chauve-souris est encore lointaine.

Document A

Les chauves-souris détectent leurs proies, en particulier les papillons, grâce à un système de sonar : elles émettent en permanence des ultrasons qui se réfléchissent sur tout obstacle, fixe ou mobile. L'écho ainsi produit est capté par les oreilles de la chauve-souris et la renseigne sur son environnement, jusqu'à une distance d'à peu près 3 mètres.

Certains papillons de nuit échappent aux chauves-souris bien qu'ils soient moins rapides car ils peuvent capter les ultrasons émis par le prédateur, grâce à des organes auditifs placés de chaque côté du thorax. Ils les détectent jusqu'à une distance d'environ 30 mètres :

- si la chauve-souris est à une distance supérieure à 10 mètres, le papillon accélère son vol et s'éloigne en ligne droite à l'opposé de la source sonore ;
- si elle est à proximité du papillon, celui-ci effectue de brusques changements de direction, des piqués et il finit souvent par se poser au sol ou sur un buisson.

Dans les deux cas, on a prouvé qu'il s'agissait de réflexes. Le but de cet exercice est de comprendre comment le réflexe adéquat est sélectionné dans l'organisme dans chaque cas.

Document B

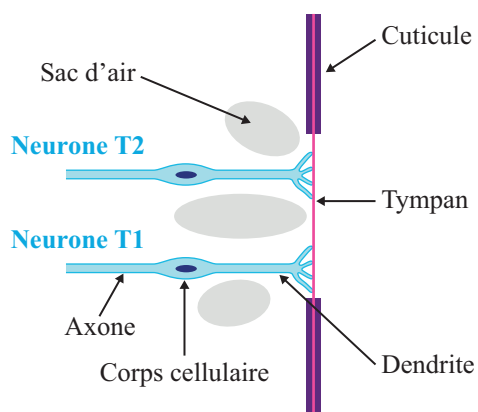


Figure 12.41 – Structure d'un organe auditif de papillon

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Document C

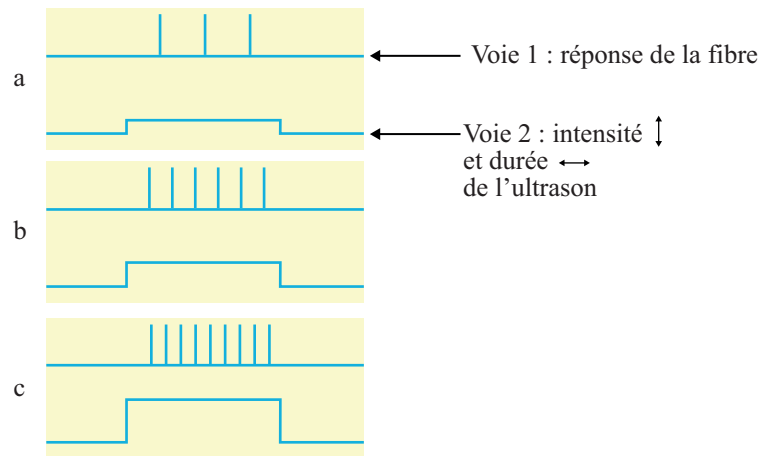


Figure 12.42 – Messages nerveux parcourant la fibre nerveuse de T1 en réponse à des stimulations (ultrasons) d'intensité croissante $a < b < c$ faisant vibrer le tympan

Document D

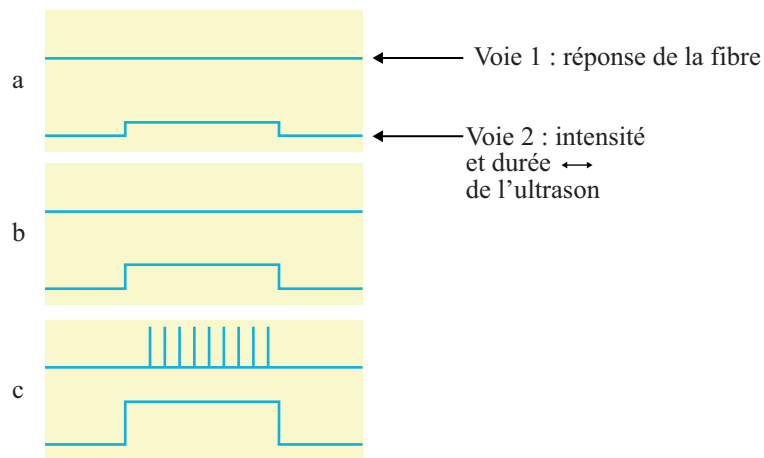


Figure 12.43 – Messages nerveux parcourant la fibre nerveuse de T2 en réponse aux mêmes stimulations (ultrasons) d'intensité croissante $a < b < c$ faisant vibrer le tympan

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

Document E

Les centres nerveux (ganglions) du papillon reçoivent deux types de messages nerveux : ceux apportés par les neurones de type 1 et ceux apportés par les neurones de type 2. On remarque que des neurones de type A et B, en relation respectivement avec les neurones de type 1 et 2, font des synapses avec les motoneurones des muscles des ailes.

On observe deux cas :

- si l'intensité des ultrasons est faible à moyenne, seuls les neurones de type A et les motoneurones sont parcourus d'un message nerveux ;
- si elle est forte, les neurones de type A et B sont parcourus d'un message nerveux intense mais pas les motoneurones.

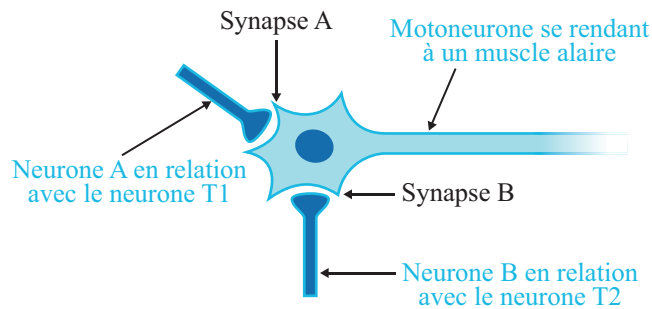


Figure 12.44 – Synapses d'un motoneurone alaire

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Vérification de connaissances

Énoncé
p. 392

- 1 Réponse **c**. 2 Réponse **b**.

2 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 392

- 1 Un motoneurone. 2 La plasticité. 3 L'axone.

3 Moelle épinière - Structure

Énoncé
p. 392

Lycée Victor Hugo

- 1 Les légendes sont les suivantes :
- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 1 : substance blanche ; | 4 : racine dorsale ; |
| 2 : substance grise ; | 5 : racine ventrale. |
| 3 : ganglion rachidien ; | |
- 2 Les prolongements des neurones sont localisés dans la substance blanche de la moelle épinière et dans les racines ventrale et dorsale.
- Les corps cellulaires des neurones sensoriels afférents sont localisés au niveau des ganglions rachidiens (racine dorsale de la moelle) alors que les corps cellulaires des motoneurones conduisant le message nerveux efférent moteur sont localisés dans la substance grise de la moelle épinière.
- Les synapses neuro-neurales sont dans la substance grise et les synapses neuro-musculaires au niveau des muscles.

4 Cortex frontal – Apprentissage

Énoncé
p. 393

Lycée Saint Michel de Picpus, Paris

- 1 Des singes ayant subi une ablation du cortex frontal à différents âges doivent réaliser un test d'apprentissage. On compte le nombre d'erreurs de ces derniers par rapport à un groupe contrôle n'ayant pas subi d'ablation. On observe tout d'abord que les trois groupes testés font davantage de fautes que les singes contrôles, laissant supposer que le cortex frontal est important dans cet exercice. De plus, on observe que plus l'ablation est faite tôt, moins les singes font d'erreurs (100 pour une ablation 2 mois avant la naissance, 200, 50 jours avant, et 1 200, 2 ans après la naissance). Ceci suggère donc que, plus on laisse de temps, plus les singes sont capables de compenser la perte de leur cortex frontal. Le cerveau est un organe avec une certaine plasticité.
- 2 Des rats ont subi ou non une lésion du cortex occipital à un jour d'âge, et ont été placés trois mois dans un milieu riche ou pauvre en stimulations. Ils ont ensuite été soumis à un exercice et le nombre d'erreurs a été quantifié.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

On observe tout d'abord que quelque soit l'environnement dans lequel ils ont été élevés, les rats n'ayant pas subi d'ablation et régulièrement stimulés font globalement assez peu d'erreurs (environ 80). L'environnement en tant que tel ne conditionne donc pas la réussite à cet exercice. Or les rats ayant subi l'ablation et ayant été élevés dans un milieu pauvre en stimulations réalisent un nombre important d'erreurs (300). Ceci suggère donc que le cortex occipital est déterminant pour la réussite de l'exercice. Néanmoins, si les rats ayant subi l'ablation sont placés dans un environnement riche en stimulations, le nombre d'erreurs est fortement diminué (180), ce qui est inférieur au nombre d'erreurs des rats sans lésion mais élevés dans un milieu peu stimulant. L'environnement semble donc ici jouer un rôle dans la compensation de la perte du cortex occipital : des stimulations favoriseraient donc la plasticité du cerveau et la régénération de la zone perdue.

5 Réflexe myotatique

Énoncé
p. 394

Lycée Notre Dame, Meudon

Après avoir déposé la masse de 1 kilogramme dans la main de l'individu, son avant-bras se déplace pour atteindre la position 2. Ceci est simplement dû à l'effet de la masse sur le bras.

Le bras revient ensuite automatiquement à sa position initiale (position 3). Le déplacement de la position 1 à la position 2 a engendré un étirement du biceps. Des fuseaux neuro-musculaires ont été stimulés par cet étirement, ce qui a conduit à l'activation de neurones sensoriels, puis de motoneurones. Ceci a entraîné la contraction du biceps ; le bras a donc retrouvé sa position initiale par réflexe myotatique.

6 Récepteur sensoriel – Codage

Énoncé
p. 395

Lycée Riquet, Saint Orens

MÉTHODE

Pour faciliter l'analyse de ces deux documents, il est possible de réaliser une interprétation croisée : les deux documents sont analysés en même temps. On commence par l'étude de l'effet de la stimulation a pour finir par la stimulation d.

On souhaite comprendre le fonctionnement du corpuscule de Pacini qui est un récepteur à la pression (mécanorécepteur) localisé dans le derme.

Un corpuscule de Pacini est isolé et des pressions d'intensités variables sont appliquées. Le potentiel de membrane est mesuré à proximité du corpuscule par le récepteur R_1 , et à distance par le récepteur R_3 .

Dans un premier temps, on observe que les stimulations les plus faibles (a et b) conduisent à une faible variation du potentiel de membrane à proximité

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

du corpuscule. La stimulation n'est pas suffisante pour induire un potentiel d'action.

Cependant, les stimulations les plus fortes (c et d) induisent toutes deux la même réponse à proximité du corpuscule, c'est-à-dire une dépolarisation suivie d'une repolarisation et d'une hyperpolarisation : un potentiel d'action. On a donc ici une preuve de la loi du tout ou rien : quelque soit son intensité tant qu'elle est suffisante, une stimulation engendre un potentiel d'action d'amplitude constante.

À distance, on remarque que les deux stimulations c et d conduisent à la formation de potentiels d'action. La fréquence d'émission n'est toutefois pas la même : la stimulation la plus forte (d) entraîne la formation d'un plus grand nombre de potentiels d'action que la stimulation c. On a donc ici un codage de l'information en fréquence.

Une pression élevée au niveau d'un corpuscule de Pacini conduit donc à l'émission de potentiels d'action. Ces corpuscules, présents au niveau du derme, sont donc capables de convertir une pression en message nerveux, et seraient en conclusion à l'origine du sens du toucher.

7 Addictions

Énoncé
p. 396

Nouveau programme

On souhaite comprendre les modifications fonctionnelles du cerveau dans le cas d'une addiction aux drogues.

Selon le document, la naissance d'une addiction nécessite deux phases : le sujet consomme tout d'abord de la drogue de manière raisonnée avant que cela ne devienne compulsif. Un changement de comportement a donc lieu entre les deux phases, laissant suggérer des modifications fonctionnelles du cerveau.

Une étude en laboratoire en utilisant la souris a été réalisée. Les souris ont été considérées comme addict dès lors qu'elles continuaient à consommer de la drogue malgré des décharges électriques. Il est possible de créer une addiction chez des souris, ce qui laisse supposer que ce modèle d'étude est justifié. En étudiant ces souris, les chercheurs ont remarqué une suractivation des circuits neuronaux reliant les zones de prise de décision au système de récompense dont le neurotransmetteur est la dopamine. L'idée qui émerge ici est que chez ces souris, la notion de plaisir intervient grandement dans la prise de décisions, et serait à l'origine de l'addiction.

Ainsi, la prise de drogue peut entraîner des modifications fonctionnelles au sein du cerveau : les régions responsables de la prise de décision semblent être davantage sous l'influence du système de la récompense, ce qui peut expliquer la notion d'addiction.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

8 Fibre nerveuse - Stimulation

Énoncé
p. 397

Lycée Saint Michel de Picpus, Paris

- 1 Avant le t_1 , la différence de potentiel entre S_3 et S_4 est nulle, les deux microélectrodes étant toutes les deux à la surface de la membrane.
Entre t_1 et t_2 , la microélectrode S_3 est plongée au-travers de la membrane. La différence de potentiel mesurée est celle de part et d'autre de la membrane et est ici de -70 mV. La membrane de l'axone est donc polarisée.
À t_2 , une stimulation est réalisée. On observe au point E une augmentation brève de la différence de potentiel qui est simplement un artefact lié à la stimulation elle-même. Après un certain temps, cette mesure augmente jusque 20 mV transitoirement (la membrane se dépolarise) puis diminue jusque -90 mV (repolarisation suivie d'une hyperpolarisation de la membrane) avant de se stabiliser. La stimulation a donc entraîné un signal au niveau de la membrane qui est assimilable à un potentiel d'action.
- 2 Si les électrodes S_3 - S_4 avaient été placées à plus grande distance des électrodes de stimulation S_1 – S_2 , l'intensité de la dépolarisation aurait été la même. En revanche, le temps d'arrivée du potentiel d'action aurait été allongé.
Si l'axone avait été lésé entre l'électrode de stimulation S_2 et l'électrode d'enregistrement S_3 , aucune variation de potentiel n'aurait été enregistrée (la zone lésée empêchant la propagation du message nerveux).
- 3 On observe pour les stimulations d'intensités I_1 et I_2 une seule variation de potentiel (artefact) liée à la stimulation. Aucun potentiel d'action n'est visible, ce qui suggère que la stimulation n'est pas suffisante. Pour les stimulations d'intensités I_3 , I_4 , des potentiels d'action sont visibles et sont de même amplitude. À partir d'un certain seuil de stimulation, un potentiel d'action est créé et reste le même, quelque soit l'intensité de stimulation. C'est la loi du tout ou rien.

9 Section – Réseau neuronique

Énoncé
p. 399

Lycée Riquet, Saint Orens

⚠ ATTENTION

Il faut bien séparer les effets à court terme et les effets à long terme des lésions. En effet, on sait que les neurones présentent une certaine plasticité : à partir du corps cellulaire, un axone peut être régénéré. Les effets à long terme permettent donc de localiser les corps cellulaires des neurones étudiés.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

La section du nerf rachidien (expérience A) entraîne à court terme une perte de sensibilité et de motricité. Le nerf rachidien est donc aussi bien constitué de neurones sensitifs que de neurones moteurs. À long terme, toutes les fibres nerveuses séparées de la moelle épinière dégénèrent. Les corps cellulaires des neurones sensitifs et moteurs sont donc localisés en amont du nerf rachidien.

Au cours de l'expérience B, le ganglion rachidien est séparé du reste du système par deux lésions. À court terme, seule la sensibilité est perdue, prouvant que seuls les neurones sensitifs passent par le ganglion rachidien. À long terme, les fibres nerveuses séparées du ganglion rachidien dégénèrent. Les corps cellulaires des neurones lésés sont donc localisés au niveau du ganglion rachidien.

Enfin, en sectionnant la partie antérieure du nerf rachidien, seule la motricité est perdue. Les neurones moteurs ont donc des prolongements au niveau de cette région. De plus, à long terme, les fibres séparées de la moelle épinière dégénèrent. Les corps cellulaires de ces neurones sont donc probablement localisés au sein de la moelle épinière.

10 PA - Synapse

Lycée Saint Martin, Rennes

➔ Énoncé
p. 400

MÉTHODE

Lors de l'étude de plusieurs neurones communiquant au moyen de synapses, il faut toujours, avant toute analyse, se demander si les synapses sont inhibitrices ou excitatrices.

- 1 Après stimulation, les deux enregistrements montrent une modification de potentiel brusque et transitoire : ce sont des potentiels d'action. On note que la synapse est ici excitatrice.
- 2 On sait que la relation entre une vitesse v , un temps t et une distance d , est $v = \frac{d}{t}$. La distance est de 10 mm, soit $10 \cdot 10^{-3}$ m. On a donc :

$$t = \frac{d}{v} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{11} = 0.91 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 0.91 \text{ ms.}$$

- 3 Le délai entre l'arrivée du potentiel d'action en R_1 et R_2 est de 1.5 ms, donc plus que les 0.91 ms théoriques. Le retard observé est probablement dû à la présence de la synapse, qui ralentit donc la propagation du message nerveux.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

11 Synapse - Curare

Énoncé
p. 401

Lycée Saint Martin, Rennes

- 1 La courbe A représente l'amplitude de contraction du muscle droit abdominal de grenouille en fonction de la quantité d'acétylcholine introduite au cours de l'expérience.
On observe que, à mesure que la dose d'acétylcholine ajoutée augmente, l'amplitude de contraction augmente faiblement d'abord (de 5 en passant de 0 à 10^{-4} doses) puis fortement (passage de 5 à 20 en atteignant 10^{-2} doses) avant de se stabiliser vers 25 à 10^{-1} doses.
- 2 On sait que l'acétylcholine est un neurotransmetteur libéré par un motoneurone induisant la contraction de cellules musculaires en se fixant à son récepteur. Ceci explique donc que l'ajout de doses croissantes d'acétylcholine produit des contractions d'intensités de plus en plus élevées. La stabilisation de l'effet peut s'expliquer par le fait que le nombre de récepteurs à l'acétylcholine est un nombre fini : à partir d'une certaine doses d'acétylcholine, tous les récepteurs sont occupés et un ajout additionnel de cette molécule n'a donc plus d'effet.
- 3 Grâce à la courbe B, on observe que l'ajout de curare induit un effet limité de l'acétylcholine sur la contraction musculaire. Le curare empêche donc l'acétylcholine d'agir, possiblement en se fixant au récepteur du neurotransmetteur.

12 Synapse – myasthénie

Énoncé
p. 402

Lycée Jules Ferry, Paris

On souhaite ici comprendre le mécanisme à l'origine de la myasthénie.

Dans une première expérience (document A), un motoneurone d'un patient sain en contact avec une fibre musculaire est stimulé et un enregistrement du potentiel de membrane est réalisé grâce à une micro-électrode plantée dans la fibre musculaire. On observe que la stimulation conduit à la formation de « barres » correspondantes à un train de potentiels d'action, à haute fréquence (16 en 3 secondes). L'expérience est réalisée chez un patient myasthénique, et on remarque également la formation de potentiels d'actions, mais avec une fréquence plus faible (8 en 3 secondes). L'incapacité de contracter les muscles chez un patient myasthénique proviendrait donc d'une mauvaise transmission des messages nerveux provenant des motoneurones.

⚠ ATTENTION

Deux données sont importantes ici : l'effet de la toxine sur l'activité musculaire et la quantification de la fixation de la toxine aux récepteurs. La toxine sert alors de marqueur qui met en évidence les récepteurs à l'acétylcholine.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

Dans le document B, la bungarotoxine est mise en présence d'une fibre musculaire d'un patient sain et d'un patient atteint de myasthénie. La présence de la bungarotoxine est mise en évidence, et permet d'observer les récepteurs à l'acétylcholine auxquels elle se fixe. On observe bien moins de zones de présence des récepteurs chez le patient myasthénique que chez le sujet sain. Ceci suggère donc que le patient a un nombre réduit de récepteurs, ce qui pourrait être à l'origine de son incapacité à produire des contractions efficaces. Cette hypothèse est validée par le fait que la toxine conduit aux mêmes symptômes que ceux de la myasthénie. En se fixant aux récepteurs à l'acétylcholine, la toxine empêcherait donc l'action du neurotransmetteur.

Ainsi, la myasthénie est causée par une production limitée de récepteurs à l'acétylcholine par les fibres musculaires, ce qui se traduit par une transmission des messages nerveux affaiblie, et donc des contractions musculaires moins efficaces.

13 Cortex moteur - apprentissage

Énoncé
p. 403

Lycée Hoche, Versailles

MÉTHODE

L'étude approfondie du cas témoin permet de comprendre rapidement le but de l'expérience.

- 1 Au cours de cette expérience, on demande à des personnes de réaliser une séquence de gestes avec les doigts de leur main non dominante sans regarder. Cette séquence doit être travaillée 10 à 20 minutes tous les jours pendant trois semaines. On étudie par imagerie corticale les zones du cortex activées le premier et le dernier jour des trois semaines. Le même type d'exercice est demandé à des individus témoins, mais sans travailler la séquence pendant les trois semaines. Ceci nous indique donc que la répétition et l'entraînement est la variable qui est étudiée ici.

On émet donc ici l'hypothèse que l'entraînement modifie les zones du cortex activées lors de la réalisation de la séquence, et donc qu'il y a une certaine plasticité du cerveau associée à cet entraînement.

Dans un premier temps, on remarque qu'en début d'expérience, le groupe test et les contrôles présentent les mêmes zones du cortex activées. Ceci suggère donc que ce n'est pas la séquence qui dicte les régions activées, mais bel et bien l'exercice en lui-même. Après trois semaines, il n'y a aucune différence dans les résultats obtenus pour le contrôle par rapport au premier jour. Le fait de répéter l'exercice trois semaines plus tard ne modifie donc pas les zones activées. En revanche, après les trois semaines d'entraînement, on observe que les individus tests possèdent une zone d'activation plus étendue. Les individus ont donc subi un réarrangement de leur fonctionnement cérébral.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

En comparant les individus tests et contrôles après les trois semaines, on obtient la même conclusion : l'entraînement induit une augmentation quantitative de l'efficacité des régions activées lors de la réalisation de l'exercice.

- 2** La réalisation de la séquence est corrélée à l'activation de certaines régions corticales, ce qui suggère que ce sont ces régions qui commandent le mouvement. Les mêmes régions sont activées quelque soit la séquence réalisée. De plus, un entraînement quotidien pendant trois semaines induit une zone d'activation du cortex plus étendue. La plasticité du cerveau a donc permis à des réarrangements synaptiques de se réaliser, affectant à davantage de neurones la réalisation de l'exercice.

14 Motoneurone - Synapse

Énoncé
p. 404

Lycée Colbert, Lorient

On souhaite prouver que les deux muscles étudiés sont des muscles antagonistes.

Tout d'abord, on remarque que les deux muscles ont des actions opposées : le premier est extenseur et le second est fléchisseur. Cela constitue un premier indice suggérant que les deux muscles sont antagonistes.

En stimulant la fibre sensitive F_1 du muscle extenseur, on observe la création d'un potentiel d'action au niveau de la fibre sensitive en E_1 , la stimulation est donc supralaminaire. Un potentiel d'action est également visible en M_1 , au sein de la fibre motrice du muscle extenseur. La synapse S_1 entre F_1 et M_1 est donc excitatrice, la stimulation conduit ainsi à la contraction du muscle extenseur. On a donc reproduit ici un réflexe myotatique.

En parallèle, un interneurone est également relié à la fibre sensitive du muscle extenseur *via* une synapse S_2 . En théorie, cette synapse est également excitatrice, car présentant le même élément pré-synaptique que S_1 . La stimulation conduit donc également à une activation de l'interneurone. Toutefois, l'enregistrement au niveau de la fibre motrice du muscle fléchisseur en lien avec l'interneurone par la synapse S_3 ne présente aucun potentiel d'action. L'activation suggérée de l'interneurone ne conduit donc pas à une activation en M_2 , la synapse S_3 est donc inhibitrice.

La stimulation de la fibre sensitive du muscle extenseur conduit donc à des effets opposés pour les deux muscles étudiés. Ces derniers sont donc bien antagonistes.

15 Axone – PA

Énoncé
p. 405

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

Grâce à ce corpus de documents, on souhaite mettre en évidence des propriétés des axones.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Dans une première série d'expériences, on exerce des stimulations électriques d'intensité croissante sur un axone et on enregistre le potentiel membranaire. Tout d'abord on remarque que l'introduction de l'électrode au-travers de la membrane induit une chute du potentiel mesurée à -70 mV. La membrane de l'axone est donc polarisée.

Selon le tracé 1, les stimulations les plus faibles S_1 et S_2 ne conduisent à aucune variation majeure du potentiel de membrane. La stimulation n'est donc pas suffisante (on dit qu'elle est infralaminaire). En revanche, les stimulations S_3 , S_4 et S_5 conduisent toutes à une même variation brusque du potentiel de membrane (de -70 mV à 30 mV) avant un retour au potentiel de repos (elles sont supralaminaires). Ces variations de potentiel sont des potentiels d'action. Or, les stimulations S_3 , S_4 et S_5 ne présentent pas la même intensité. C'est donc la loi du tout ou rien, selon laquelle toute stimulation qui dépasse un seuil d'intensité, conduit à un potentiel d'action de même amplitude.

Le tracé 2 permet d'affiner l'analyse des variations de potentiel de membrane. Un potentiel d'action de membrane est formé d'une augmentation du potentiel de membrane qui conduit transitoirement à la perte de la polarité membranaire (la dépolarisation, d'environ $0,3$ ms), suivie d'un retour aux valeurs du potentiel de repos (repolarisation d'environ $0,7$ ms) avant une hyperpolarisation.

Dans une seconde série d'expériences, un axone est stimulé et le potentiel de membrane est enregistré en trois points A, B et C, distants de 6 mm les uns des autres.

Dans un premier temps, une stimulation infralaminaire est exercée et l'amplitude de la réponse est enregistrée en A, B et en C. On remarque que plus la distance par rapport au dispositif est élevé, moins l'amplitude est importante (10 mV pour le point A et seulement 1 pour le point C). Dans le cas d'une stimulation infralaminaire, on a donc une atténuation du signal le long de l'axone.

En revanche, dans le cas d'une stimulation supralaminaire, un potentiel d'action de même amplitude (ici de -70 mV à 50 mV) est enregistré au niveau des trois points. Si la stimulation est supralaminaire, aucune atténuation du signal n'est visible le long de l'axone.

Enfin, on observe que le signal arrive en A après 1 ms, en B après $1,5$ ms, et en C après 2 ms. Il faut donc $0,5$ ms au signal pour se déplacer entre deux points, soit une distance de 6 mm. Ainsi la vitesse de propagation du signal peut être calculée et est de 12 m.s^{-1} .

En conclusion, la membrane de l'axone est polarisée : elle a un potentiel de repos de -70 mV. Dans le cas d'une stimulation, elle montre une dépolarisation jusque 30 mV suivie d'une repolarisation et d'une hyperpolarisation. Ce signal est un potentiel d'action. La création de potentiels d'action obéit à la loi du tout ou rien, et le signal se propage le long de l'axone sans aucune atténuation, à une vitesse de plus de 10 m.s^{-1} .

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

16 Cortex moteur - Réflexe

Énoncé
p. 408

Lycée Hoche, Versailles

MÉTHODE

Même si les deux atteintes doivent être séparées dans votre analyse, prises ensembles, elles vous permettent de reconstruire les circuits neuronaux impliqués.

On souhaite comprendre les différents symptômes chez les patients atteints de SLA à partir des différents neurones impliqués.

Selon l'énoncé, la perte de neurones pyramidaux situés entre le cortex moteur et la moelle épinière est à l'origine de troubles moteurs centraux et celle de motoneurones, d'une atteinte périphérique. Les symptômes dans les deux cas nous permettent de reconstruire les rôles des deux types de neurones.

Tout d'abord, la perte des motoneurones induit une faiblesse et une atrophie musculaire, ainsi que des réflexes et un tonus diminués. Les motoneurones permettant la contraction des muscles, ceci explique les symptômes observés. La perte des neurones pyramidaux entraîne également une faiblesse musculaire, suggérant qu'ils jouent un rôle dans la commande du mouvement et dans la contraction. Ils peuvent donc probablement communiquer avec les motoneurones *via* des synapses excitatrices. Cependant, aucune atrophie musculaire n'est visible, et le tonus et les réflexes sont au contraire augmentés. Cela suggère donc qu'ils possèdent aussi un rôle inhibiteur sur les motoneurones et la contraction musculaire. Or, un neurone ne peut pas exercer une action excitatrice et une action inhibitrice sur un autre neurone. On peut donc émettre l'hypothèse de l'existence d'un autre type de neurones, qui seraient activés par les neurones pyramidaux, et auraient une action inhibitrice sur les motoneurones. La perte des neurones pyramidaux entraînerait ainsi une absence d'inhibition, d'où l'augmentation des réflexes et du tonus.

Les motoneurones sont donc capables d'intégrer les signaux provenant de trois types de neurones : les neurones sensoriels qui participent au réflexe myotatique, les neurones pyramidaux permettant la commande du mouvement, et les neurones inhibiteurs, eux-mêmes activés par les neurones pyramidaux.

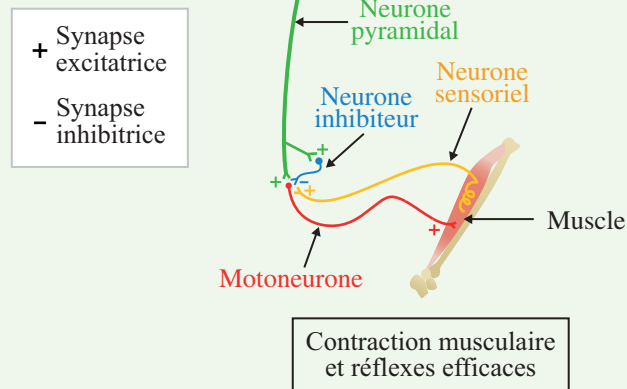
Voir schéma page suivante.

COURS

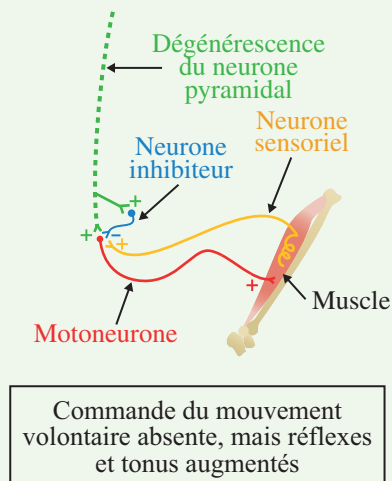
INTERROS

CORRIGÉS

Circuit neuronique de la commande volontaire du mouvement chez un individu sain



Patient avec des troubles moteurs centraux



Patient avec une atteinte périphérique

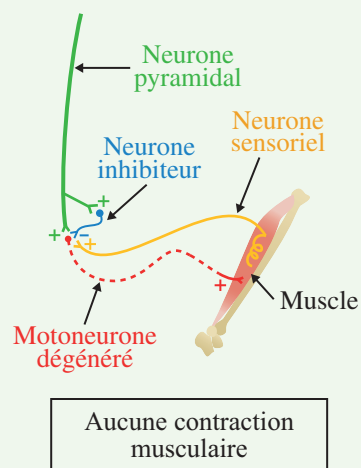


Figure 12.45 – Circuit neuronique de la commande volontaire du mouvement chez un individu sain et chez des patients avec des troubles moteurs centraux ou une atteinte périphérique

COMPORTEMENTS, MOUVEMENTS ET SYSTÈME NERVEUX • CHAP. 12

17 Réflexe de fuite

Énoncé
p. 409

Lycée Charlemagne, Paris

⚠ ATTENTION

La forme demandée est ici un article scientifique pour le magazine « La Hulotte ». Il faut ainsi adapter l'analyse, tout en gardant à l'esprit que le niveau scientifique doit être conservé.

Les chauve-souris sont des prédateurs de la nuit. Elles utilisent une technique assez sophistiquée de chasse aérienne : le sonar. Des ultrasons sont envoyés par la chauve-souris puis, en présence d'un obstacle (un papillon présent au mauvais moment, au mauvais endroit), les ultrasons sont réfléchis et réceptionnés par celle-ci. Ce système permet au prédateur de localiser les insectes volants pour les poursuivre et n'en faire qu'une bouchée.

Cependant, les papillons n'ont pas dit leur dernier mot. En effet, certains sont capables de s'échapper de justesse en adoptant un comportement de fuite élaboré. En fonction de la distance séparant nos deux protagonistes, le papillon peut soit fuir dans la direction opposée (si la chauve-souris est à plus de 10 mètres de distance), soit effectuer de brusques changements de direction avant de se poser (si la chauve-souris est à proximité).

Comment ces insectes sont-ils capables de localiser leur prédateur et d'adapter leur fuite ?

Les papillons possèdent un organe auditif constitué de deux types de neurones (T1 et T2) en relation par leurs dendrites avec un tympan. En présence d'ultrasons faisant vibrer le tympan, ces deux neurones forment des messages nerveux visibles sur les enregistrements. T1 et T2 ne possèdent pas la même activité. Quelque soit l'intensité des ultrasons, T1 est actif et est à l'origine de messages nerveux assimilés à des potentiels d'action (plus nombreux si l'intensité des ultrasons est élevée). Grâce au neurone T1, le papillon est donc capable d'évaluer la distance à laquelle se situe la chauve-souris émettrice d'ultrasons. Ce n'est pas le cas pour T2, qui a besoin d'une forte intensité d'ultrasons pour envoyer un grand nombre de messages nerveux. Si l'intensité est trop faible, aucun message n'est envoyé. Le neurone T2 est donc capable d'envoyer des messages d'urgence si la chauve-souris est à proximité.

Les neurones T1 et T2 sont respectivement en relation avec des neurones A et des neurones B forment des synapses avec des motoneurones (neurones en lien avec des muscles).

Si la chauve-souris est à distance, les ultrasons sont de faible ou de moyenne intensité, et seuls les neurones T1 sont actifs. Les neurones A sont stimulés et activent le motoneurone. Le papillon vole et fuit.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Dans le cas où la chauve-souris est très proche, les ultrasons sont de forte intensité. En plus des neurones T1 activant les neurones A, les neurones T2 sont actifs, et stimulent les neurones B. Dans ce cas, le motoneurone est inactif. Le neurone B a une action inhibitrice sur le motoneurone, le papillon se pose donc.

Les papillons, grâce à ces neurones, sont donc capables de discerner la distance à laquelle se situe la chauve-souris et, par réflexe, d'adapter son vol.

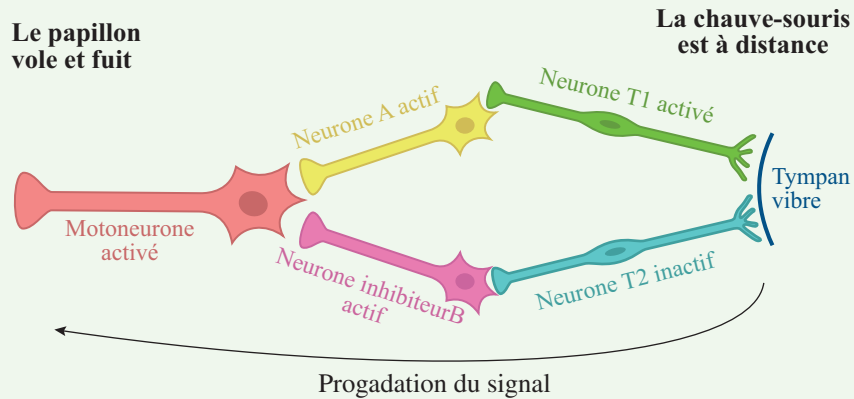


Figure 12.46 – Schéma fonctionnel du réflexe permettant au papillon de s'éloigner si la chauve-souris est à distance

Chapitre 13

Produire le mouvement

Plan du chapitre

1. Introduction
2. La cellule musculaire : une structure spécialisée dans son propre raccourcissement
3. Origine de l'ATP nécessaire à la contraction de la cellule musculaire
4. Le contrôle des flux de glucose, source essentielle d'énergie des cellules musculaires

1 Introduction

Nous avons au cours dans le Chapitre 12 que la libération d'acétylcholine dans la fente synaptique par les motoneurones conduisait à une augmentation du taux de calcium intracellulaire des cellules musculaires, induisant leur raccourcissement et participant à la contraction musculaire.

? PROBLÉMATIQUE

Comment se réalise le mouvement à l'échelle moléculaire et cellulaire ?

2 La cellule musculaire : une structure spécialisée dans son propre raccourcissement

2.1 Organisation du muscle strié et mouvement

Les muscles sont majoritairement constitués de cellules musculaires striées, organisées en faisceaux. Les deux extrémités des muscles striés sont reliés à des os par des tendons. Le raccourcissement des cellules musculaires entraîne un épaississement et une diminution de la longueur du muscle et un rapprochement des deux os auxquels il est relié : un mouvement est réalisé.

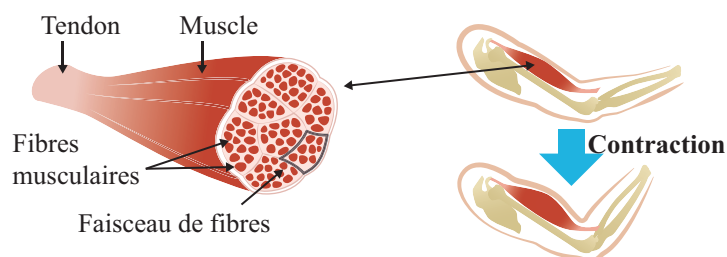


Figure 13.1 – Organisation du muscle et contraction

2.2 Le cytosquelette de la cellule musculaire

La forme et la dynamique des cellules eucaryotes sont permises par un groupe de molécules réunies sous le nom de *cytosquelette*.

Définition 1 : cytosquelette

Réseau de filaments protéiques jouant le rôle de squelette pour les cellules.

L'actine est une des molécules appartenant au cytosquelette. Dans les cellules musculaires striées, elle s'associe à une autre protéine, la myosine. Cette association est visible en microscopie, et est à l'origine du qualificatif « striée » pour décrire ces cellules musculaires.

Cette striation est due à l'organisation moléculaire des myofibrilles qui occupent leur cytoplasme. Les myofibrilles sont des structures contractiles de nature protéique. Elles sont constituées d'une succession d'unités fonctionnelle, les *sarcomères*. Chaque sarcomère contient des myofilaments fins d'actine et des myofilaments épais de myosine. Les sarcomères sont formés par des molécules d'actine reliées entre elles par d'autres molécules. Au centre des sarcomères se trouvent des molécules de myosine intercalées entre les molécules d'actine.

Lors d'une contraction, l'actine semble glisser sur la myosine. Il en résulte alors un raccourcissement des sarcomères, et donc un raccourcissement de la cellule musculaire. À l'échelle de l'organe, le muscle se contracte.

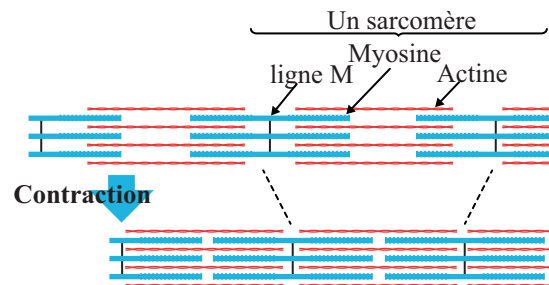


Figure 13.2 – L'association actine-myosine et sa dynamique à l'origine de la contraction

Le cytosquelette permet également aux cellules musculaires de réaliser des liens moléculaires avec l'environnement, c'est-à-dire leur matrice extracellulaire. Ces interactions sont nécessaires pour leur fonctionnement.

Par exemple, la myopathie de Duchenne (DMD) est une maladie génétique affectant essentiellement les garçons et provoquant la dégénérescence des cellules musculaires, en raison de mutations touchant le gène de la dystrophine, gène porté par le chromosome X.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

Le dysfonctionnement de la dystrophine provoque un défaut dans les interactions entre les protéines de la membrane plasmique et la matrice extracellulaire, ce qui entraîne une fragilité des muscles conduisant à leur paralysie. De nombreuses pistes de recherche sont explorées aujourd'hui pour ralentir, voire guérir cette maladie.

Voir exercice 6.

2.3 Mécanismes moléculaires de la contraction musculaire

La contraction musculaire nécessite de l'énergie.

L'ATP (Adénosine TriPhosphate) est une molécule de la famille des nucléotides qui, comme son nom l'indique, contient trois groupements phosphates H_2PO_4^- . Ces derniers sont reliés au ribose par une liaison covalente à haut potentiel énergétique : la libération d'un groupement phosphate, réaction appelée *hydrolyse de l'ATP*, permet la création d'énergie qui pourra être utilisée par la cellule. Le groupement phosphate libéré est nommé P_i , pour Phosphate inorganique.



Les myosines possèdent une région appelée tête de myosine, qui est capable de se lier aussi bien à l'ATP qu'à l'actine.

Le mécanisme moléculaire de la contraction musculaire est un cycle.

À l'origine, les têtes de myosines sont liées à de l'ADP + P_i et pas à l'actine. L'augmentation du taux de calcium intracellulaire (voir Chapitre 12) conduit à une fixation additionnelle de la tête de myosine sur l'actine.

Puis les molécules de myosines libèrent l'ADP + P_i , ce qui a pour conséquence la courbure des têtes de myosine, et un glissement de l'actine qui y est arrimée. Ce glissement, à l'échelle de la cellule, est responsable de son raccourcissement, et ainsi de la contraction musculaire.

Enfin, l'état initial est retrouvé grâce à l'hydrolyse de l'ATP, qui fournit l'énergie nécessaire à un retour à l'état aligné des myosines (voir figure 13.3 page suivante).

➡ À RETENIR

La contraction musculaire est permise par la dynamique de l'assemblage de molécules de myosine avec le cytosquelette d'actine. Cette dynamique nécessite du calcium et de l'énergie sous forme d'ATP.

COURS

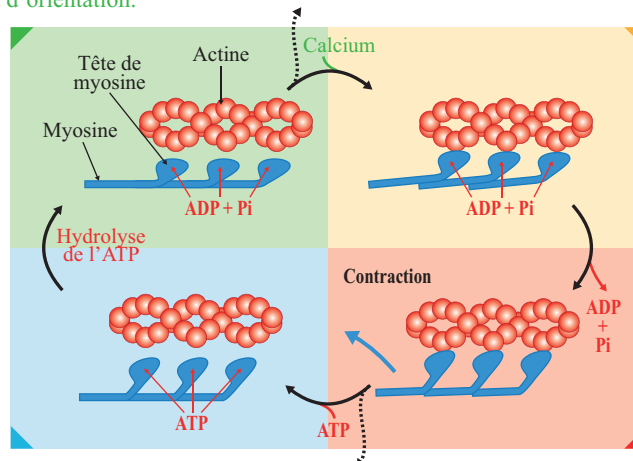
INTERROS

CORRIGÉS

Activation
L'hydrolyse de l'ATP par les têtes de myosine conduit à une activation de ces dernières : elles changent d'orientation.

Sans calcium : repos
Aucune fixation de l'actine à la myosine n'est possible : le muscle est au repos.

Fixation
En présence de calcium, les têtes de myosine activées se fixent à l'actine.



Séparation
La fixation de l'ATP entraîne la séparation des têtes de myosine et de l'actine.

Sans ATP : rigidité cadavérique
Les myosines restent fixées à l'actine, comme c'est le cas après la mort.

Désactivation
Le retour des têtes de myosine à leur orientation initiale fait glisser l'actine, entraînant un raccourcissement du sarcomère.

Figure 13.3 – Le cycle actine-myosine à l'origine de la contraction musculaire

3 Origine de l'ATP nécessaire à la contraction de la cellule musculaire

Les cellules sont capables de régénérer l'ATP à partir de la dégradation d'autres molécules énergétiques comme le glucose.

PROBLÉMATIQUE

Quelles réactions permettent la régénération d'ATP grâce à la dégradation de glucose ?



Retrouvez en vidéo la vision d'ensemble du métabolisme cellulaire permettant la contraction musculaire avec **live**

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

3.1 Localisation des réactions nécessaires à la synthèse d'ATP

Les premières réactions permettant la production d'ATP à partir de glucose sont rassemblées sous le nom de glycolyse et ont lieu dans le cytoplasme des cellules. La glycolyse conduit à la synthèse d'un intermédiaire, *le pyruvate*. Ce dernier a deux devenir possibles :

- il peut participer à la *fermentation lactique* ;
- il peut être intégré dans la mitochondrie, permettant la *respiration cellulaire*.

La mitochondrie est un organe des cellules eucaryotes, siège d'une partie des réactions de la production d'ATP.

Au sein des mitochondries, deux membranes délimitent le milieu intérieur, appelé *matrice*. Au sein de la membrane interne sont localisées des ATP synthétases, dont le fonctionnement a déjà été vu au cours du Chapitre 6.

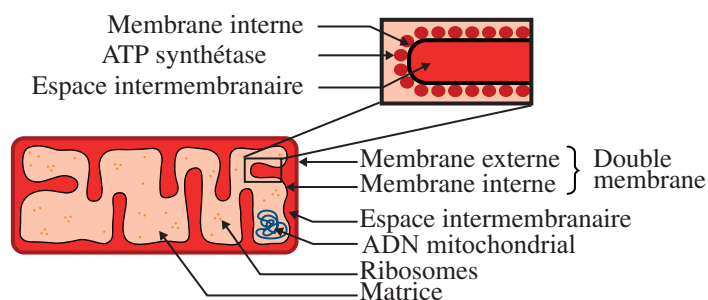


Figure 13.4 – Organisation d'une mitochondrie

3.2 La première étape dans le cytoplasme : la glycolyse

La *glycolyse* correspond à la transformation du glucose, molécule à 6 carbones, en deux molécules de pyruvate (ou acide pyruvique), une molécule à 3 carbones. Cette première étape a lieu dans le cytoplasme des cellules et correspond à une suite de réactions chimiques catalysées par des enzymes. Au cours de la glycolyse, le glucose subit une oxydation, conduisant à la libération de deux électrons. Ces derniers sont pris en charge par deux molécules acceptatrices d'électrons, NAD^+ , qui donneront alors deux NADH, H^+ .

De plus, la glycolyse permet la régénération de deux molécules d'ATP par molécule de glucose dégradée.

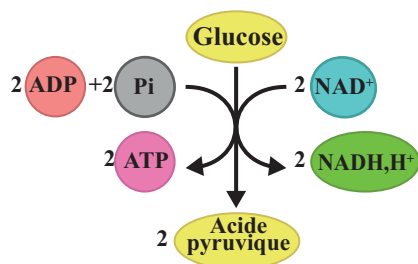


Figure 13.5 – Équation-bilan de la glycolyse

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

3.3 Le cycle de Krebs, suite de réactions dans la mitochondrie

Le pyruvate nouvellement formé peut passer dans la matrice des mitochondries. Il est alors pris en charge par des enzymes et subit une décarboxylation, c'est-à-dire le retrait d'un carbone, à l'origine d'une molécule de CO_2 . Cette première réaction permet aussi la formation d'un NADH, H^+ à partir d'un NAD^+ .

Des réactions successives, rassemblées sous le nom de *cycle de Krebs*, vont ensuite se dérouler et conduire à deux décarboxylations à l'origine deux molécules de CO_2 . Sont également formés quatre NADH, H^+ et un ATP par tour de cycle.

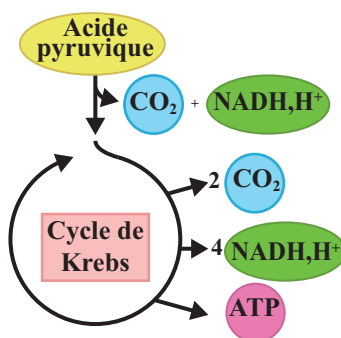


Figure 13.6 – Le cycle de Krebs

3.4 Chaîne respiratoire et synthèse d'ATP

Les premières réactions ont été à l'origine d'une formation massive de 12 NADH, H^+ . Pour son fonctionnement, les cellules doivent donc régénérer du NAD^+ .

Dans la membrane interne des mitochondries se trouve un ensemble de complexes protéiques, qui forment ce que l'on appelle *la chaîne respiratoire*. Cette dernière est tout d'abord capable de catalyser la régénération de NAD^+ à partir de NADH, H^+ . Deux électrons sont formés lors de cette réaction, et participeront à la synthèse d' H_2O à partir d' O_2 , réaction également catalysée par la chaîne respiratoire.

Le fonctionnement de la chaîne respiratoire permet également la libération de protons H^+ dans l'espace intermembranaire, et ainsi la mise en place d'un gradient de protons de part et d'autre de la membrane interne de la mitochondrie. Le retour des protons vers la matrice au travers des ATP synthétases permet le fonctionnement de ces dernières et la régénération d'ATP, comme vu lors de l'étude de la photosynthèse dans le chapitre 6.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

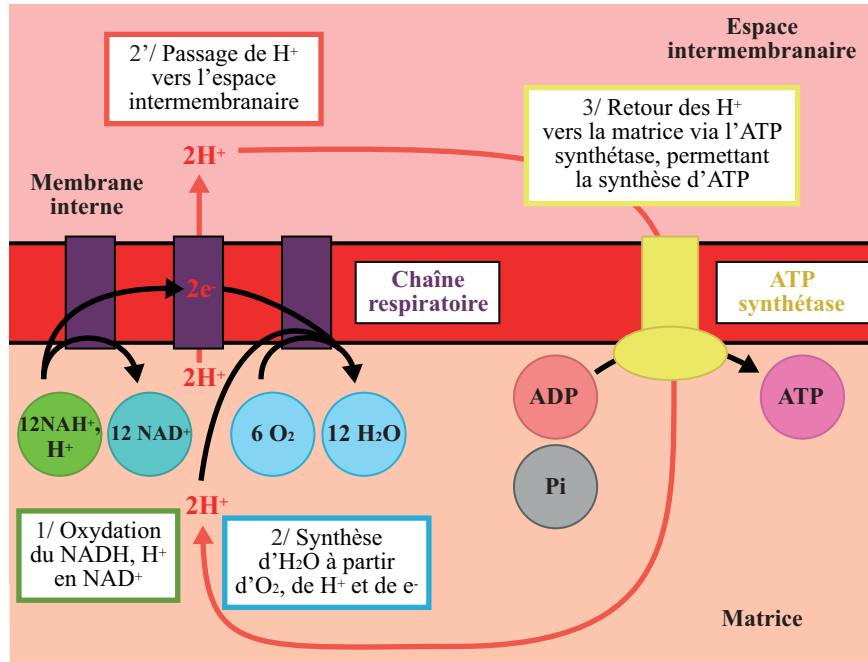


Figure 13.7 – Fonctionnement de la chaîne respiratoire synthèse d'ATP

La glycolyse et les réactions métaboliques ayant lieu au sein de la matrice mitochondriale sont donc interdépendantes en raison de la dégradation du glucose en pyruvate ainsi que de l'utilisation et la régénération du NAD^+ .

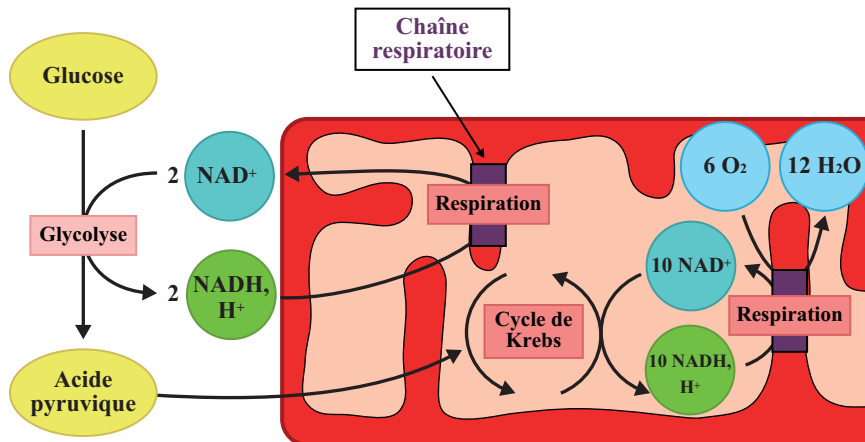


Figure 13.8 – Interdépendance entre glycolyse et réactions métaboliques mitochondriales

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

On considère que 32 molécules d'ATP sont ainsi régénérées par molécule de glucose dégradée, ce qui permet un apport important d'énergie, nécessaire pour les efforts longs et intenses. Cependant, la respiration cellulaire nécessite des apports importants en O_2 , ce qui peut parfois s'avérer être un facteur limitant lors d'efforts intenses.

En considérant les différentes réactions, l'équation bilan de la respiration cellulaire peut s'écrire ainsi :



Voir exercices 4, 9, 11 et 16.

3.5 La fermentation lactique, transformation du pyruvate sans nécessité d' O_2

En absence de dioxygène, la respiration cellulaire ne peut s'effectuer. Or, la glycolyse nécessite du NAD^+ , qu'il faut constamment régénérer.

La fermentation lactique a lieu dans le cytoplasme des cellules musculaires et permet la formation de NAD^+ , en parallèle de la transformation du pyruvate en acide lactique, un déchet qui est libéré dans le sang par la cellule musculaire.

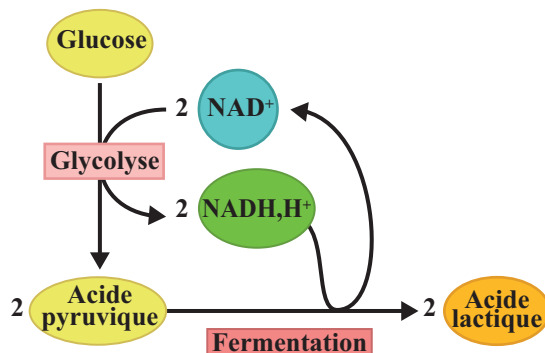


Figure 13.9 – Régénération des coenzymes oxydés lors de la fermentation lactique

La fermentation lactique ne nécessite pas d' O_2 pour se réaliser : elle peut se faire dans des conditions dites *anaérobies*.

Définition 2 : anaérobie

Absence de dioxygène dans le milieu.

La fermentation lactique ne permet toutefois pas la formation de molécules d'ATP surnuméraires. L'ATP formé ne provient donc que de la glycolyse, ce qui est limitant pour des efforts de longue durée. La respiration cellulaire et la fermentation lactique ont donc des caractéristiques et des efficacités différentes lors d'efforts physiques.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

Métabolisme	Respiration	Fermentation lactique
Réactifs	Matière organique, O ₂	Matière organique
Déchets métaboliques	CO ₂ et H ₂ O	Acide lactique
Lieux de production de NADH, H ⁺	Cytoplasme (glycolyse), matrice mitochondriale (cycle de Krebs)	Cytoplasme (glycolyse)
Lieux de régénération de NAD ⁺	Membrane interne des mitochondries (chaîne respiratoire)	Cytoplasme (via la fermentation)
NADH, H ⁺ formés lors de la glycolyse	2	2
NADH, H ⁺ formés lors du cycle de Krebs	10	0
Total de NADH, H ⁺ formés	12	2
Molécules d'ATP formés lors de l'oxydation du glucose	2 (glycolyse) + 2 (cycle de Krebs)	2 (glycolyse)
Molécules d'ATP formés lors de la réoxydation des NADH, H ⁺	32 (chaîne respiratoire)	0
Total d'ATP produits	36	2

Tableau 13.1 – Comparaison respiration cellulaire / fermentation lactique

Voir exercice 13.

3.6 Bilan des voies métaboliques impliquées lors d'un effort physique

Nous avons vu précédemment que la respiration cellulaire et la fermentation lactique ne présentaient pas les mêmes bilans énergétiques : selon le type d'effort réalisé, son intensité et sa longueur, une voie ou l'autre peut alors être favorisée.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

En réalité, les cellules musculaires utilisent différentes sources d'énergie lors d'un effort physique :

- à très court terme (1 seconde), l'ATP déjà présent dans les cellules est utilisé ;
- la phosphocréatine, une protéine présentant un groupement phosphate, peut transférer ce dernier à une molécule d'ADP selon l'équation :
 $\text{Phosphocréatine} + \text{ADP} \rightarrow \text{créatine} + \text{ATP}$
- à moyen terme, un métabolisme anaérobie (glycolyse et fermentation) permet la régénération du stock d'ATP, mais n'est pas suffisante pour les longs efforts ;
- à long terme, le métabolisme aérobie avec la respiration cellulaire devient actif.

Dépense énergétique (%)

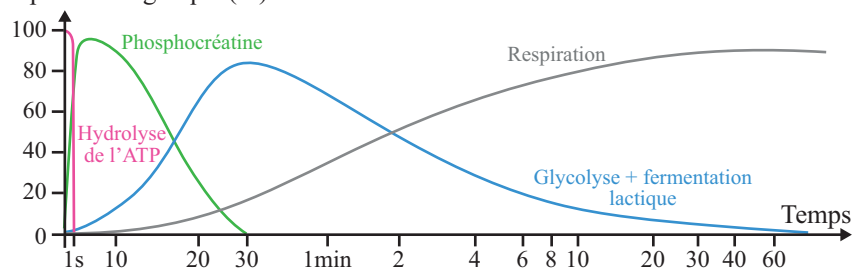


Figure 13.10 – Voies de dégradation du glucose et synthèse d'ATP dans les cellules musculaires

Des produits dopants qui favorisent la régénération de l'ATP existent, permettant la réalisation de meilleures performances musculaires. Cependant, ces derniers présentent des effets secondaires comme des atteintes du foie, ou des reins.

Voir exercice 10.

À RETENIR

Le fonctionnement des cellules musculaires nécessite des apports importants en glucose, permettant la réalisation de suites de réactions chimiques comme la glycolyse, la fermentation lactique ou la respiration cellulaire. Ces réactions sont à l'origine d'une synthèse plus ou moins importante d'ATP lors d'efforts physiques.

4 Le contrôle des flux de glucose, source essentielle d'énergie des cellules musculaires

PROBLÉMATIQUE

Alors que les apports en glucose par l'alimentation n'ont en théorie lieu qu'en périodes de repas, comment l'organisme est-il capable de mettre en réserve le glucose ou de le rétrocéder en fonction des apports et des besoins ?

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

4.1 La glycémie, une valeur relativement stable

Définition 3 : glycémie

Taux de glucose sanguin, exprimé en grammes de glucose par litre de sang.

Le suivi pendant 24 heures de la glycémie montre que cette valeur varie assez peu, aussi bien après une prise de nourriture que pendant un effort physique. Elle se trouve en effet toujours entre $0,8 \text{ g.L}^{-1}$ et $1,2 \text{ g.L}^{-1}$, la valeur normale se situant à 1 g.L^{-1} .

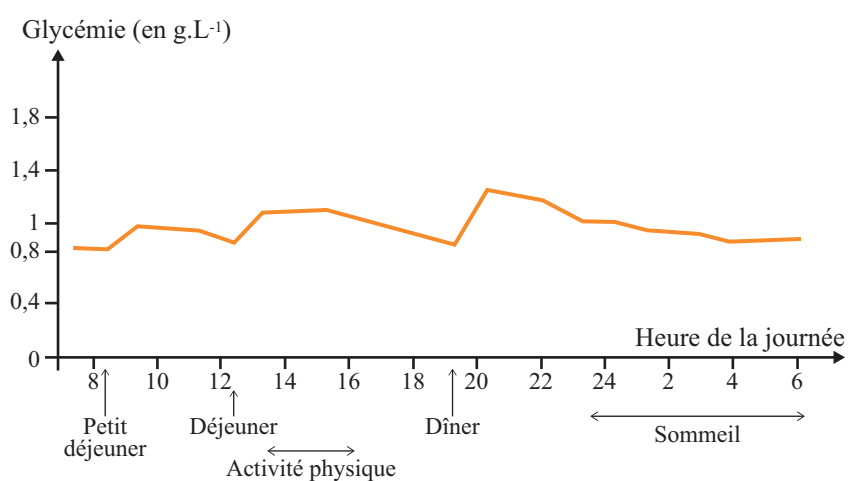


Figure 13.11 – Variation de la glycémie au cours d'une journée

Cette stabilité suggère donc que des voies de régulation existent, permettant une diminution de la glycémie et une mise en réserve du glucose après un repas, et une remobilisation du glucose en cas de besoin.

4.2 La régulation de la glycémie autour d'une valeur consigne

Les systèmes de régulation ont un fonctionnement stéréotypé. Lors du dépassement d'une valeur consigne, des capteurs sont capables d'envoyer des messages qui activent des cellules effectrices, dont l'action permet un retour à la valeur consigne.

Les messages sont ici *des hormones*, c'est-à-dire des molécules libérées dans le sang, agissant à distance sur des cellules cibles qui expriment leurs récepteurs.

4.2.1 - Détection des variations de la glycémie

Le pancréas est un organe situé à proximité de l'intestin grêle, derrière l'estomac. Des observations microscopiques de coupes de pancréas révèlent que cet organe est notamment composé de regroupements de cellules, appelés *îlots de Langerhans*.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

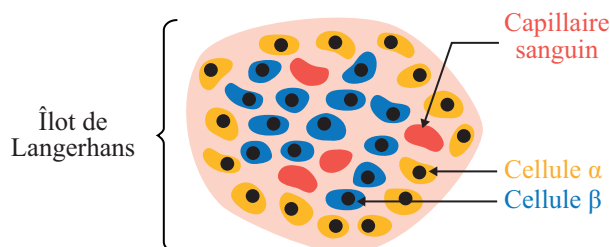


Figure 13.12 – Organisation d'un îlot de Langerhans

Au sein des îlots, trois types de cellules existent :

- les cellules α , situées en périphérie des îlots, qui libèrent dans le sang l'hormone *glucagon* en réponse à une hypoglycémie ;
- les cellules β , localisées au centre des îlots, qui relarguent dans le sang l'hormone *insuline* en cas d'hyperglycémie ;
- des capillaires sanguins, dont la proximité importante avec les cellules α et β leur permet de capter les variations de la glycémie, et d'y libérer des hormones en cas de besoin.

Ainsi, deux systèmes de régulation co-existent en parallèles, et ont des rôles opposés. L'insuline et le glucagon ont des fonctions dites *antagonistes*.

4.2.2 - Rôles de l'insuline et du glucagon

Les deux hormones agissent sur leurs cellules cibles dites effectrices, c'est-à-dire les cellules exprimant leurs récepteurs.

Tout d'abord, l'insuline, libérée par les cellules β lors d'une hyperglycémie, comme c'est le cas après un repas, permet la diminution de la glycémie : c'est une hormone *hypoglycémiante*.

Elle induit le stockage du glucose, pour une utilisation ultérieure en cas de besoin et agit sur différentes cellules cibles :

- l'insuline cible les cellules hépatiques (cellules du foie), dont le rôle primordial est la mise en réserve du glucose en synthétisant du glycogène, un polymère de glucoses, par un processus appelé *glycogénogenèse* ;
- l'insuline active également la lipogenèse par les cellules adipeuses (cellules de la graisse corporelle) c'est-à-dire la mise en réserve de lipides (de matière grasse) à partir du glucose ;
- elle stimule également la glycogénogenèse (synthèse de glycogène) par les cellules musculaires, en augmentant le nombre de transporteurs de glucose GLUT4 (voir ci-après). Le glycogène stocké pourra donc être utilisé par les cellules musculaires lors d'efforts pour donner du glucose, dont la dégradation permettra la régénération d'ATP. Contrairement au foie, les réserves des cellules musculaires sont pour leur propre usage.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

Le prélèvement du glucose sanguin par ces trois types cellulaires induit donc une diminution de la glycémie et un retour aux valeurs consignes.

En parallèle, lors d'une hypoglycémie, le glucagon relargué par les cellules α permet une augmentation de la glycémie. C'est une hormone *hyperglycémiant*. Le glucagon cible les cellules hépatiques et permet une remobilisation des molécules de réserve qu'elles ont préalablement stockées. Du glycogène est hydrolysé en molécules de glucoses, processus qu'on appelle *la glycogénolyse*, et les molécules lipidiques sont utilisées pour produire du glucose via *la néoglucogenèse*. Le glucose nouvellement formé est alors libéré dans le sang, permettant une augmentation de la glycémie.

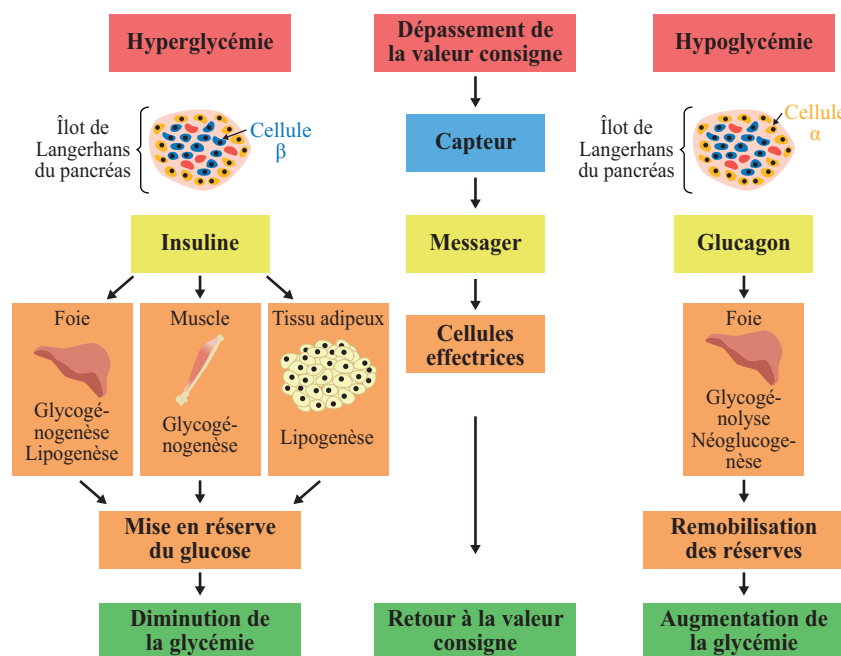


Figure 13.13 – Schéma bilan de la régulation de la glycémie

Voir exercices 5, 7, 8 et 12.

À RETENIR

Des systèmes de régulation existent permettant de conserver la glycémie autour d'une valeur consigne d'environ 1 g.L^{-1} . Les cellules des îlots de Langerhans détectent les variations de la glycémie et libèrent du glucagon ou de l'insuline, des hormones respectivement hyper et hypoglycémiantes.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

4.2.3 - Les transporteurs GLUT

Le stockage et déstockage du glucose implique des transferts de part et d'autre de la membrane plasmique des cellules. Ils sont réalisés par une catégorie de protéines membranaires dites GLUT (Glucose Transporter). Ces molécules permettent un transfert unidirectionnel ou bidirectionnel, sont parfois spécifiques de certains tissus, et leur nombre peut varier au cours du temps. Le transport du glucose est facilité par leur gradient de concentration.

Au niveau des cellules hépatiques, le transporteur GLUT2 permet l'entrée et la sortie de glucose.

Au niveau des cellules musculaires (et des adipocytes), le transporteur GLUT4, permet l'entrée de glucose uniquement.

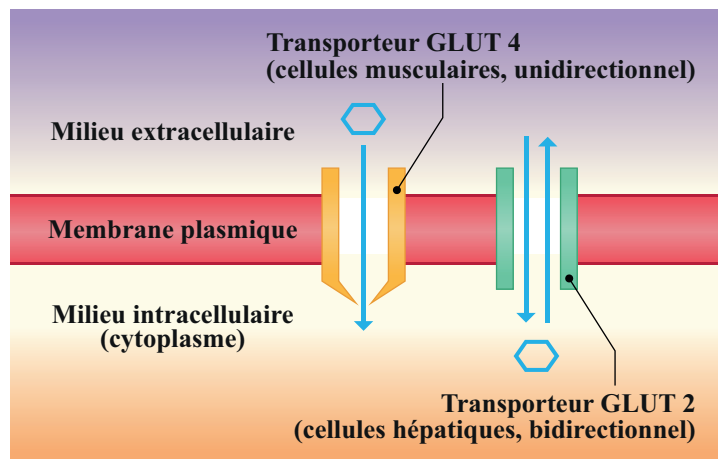


Figure 13.14 – Transporteurs GLUT

4.3 Les dysfonctionnements des systèmes de régulation de la glycémie : l'exemple des diabètes

Les systèmes de régulation de la glycémie sont assez complexes et font intervenir divers organes, hormones et récepteurs.

PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les conséquences d'un dysfonctionnement de ces systèmes ?

Certains patients présentent une hyperglycémie chronique, suggérant des dysfonctionnements du système de régulation de la glycémie, et plus précisément de l'axe cellule β des îlots de Langerhans / insuline / récepteur à l'insuline.

Regroupés sous le nom de *diabète*, plusieurs pathologies à l'origine de cette hyperglycémie chronique existent.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

4.3.1 - Les symptômes des diabètes

On considère une personne comme diabétique lorsqu'elle présente une glycémie supérieure à $1,26 \text{ g.L}^{-1}$ à jeun, et 2 g.L^{-1} après ingestion de glucose.

Plusieurs types de diabètes existent, les principaux sont le diabète de type 1 et le diabète de type 2. Il est possible de répartir les patients diabétiques selon leurs symptômes.

	Diabète de type 1	Diabète de type 2
Survenue du diabète	Souvent avant 20 ans	Plus tardive
Fréquence	Environ 10% des diabètes	Environ 90% des diabètes
Symptômes	Hyperglycémie Soif, amaigrissement, fatigue Atteintes artérielle, veineuse et reinale	Hyperglycémie souvent associé à une obésité Tardivement, mêmes symptômes que le type 1

Tableau 13.2 – Caractéristiques des diabètes des type 1 et de type 2

4.3.2 - Processus cellulaires à l'origine des diabètes et traitements

Le diabète de type 1 est caractérisé par une destruction massive des cellules β de Langerhans par le système immunitaire. C'est donc une *maladie auto-immune*. Aucune production d'insuline n'est donc possible chez ces patients, ce qui explique l'hyperglycémie chronique. Il est cependant possible de s'affranchir temporairement de l'action de ces cellules en traitant les patients par injection d'insuline. Le diabète de type 1 est donc *insulinodépendant*.

Voir exercices 3, 14 et 15.

POUR ALLER PLUS LOIN

Les causes du diabète de type 1 peuvent être multiples, aussi bien génétiques qu'environnementales. Il a été proposé qu'une infection par un virus, appelé entérovirus, pouvait conduire à une activation du système immunitaire, entraînant une réponse inadaptée contre les cellules β de Langerhans.

Chez les patients diabétiques de type 2, les cellules β de Langerhans produisent normalement de l'insuline, au moins pendant les premiers stades de la pathologie. Ce sont les cellules-cibles de cette hormone qui ne réagissent pas sa fixation sur ses récepteurs. Toute injection d'insuline serait inutile chez ces patients, ce diabète est *non insulinodépendant*. Au contraire, on traite les patients avec des médicaments permettant de restaurer partiellement l'action de l'insuline sur son récepteur.

À RETENIR

La compréhension des processus à l'origine des diabètes a permis la mise en place d'approches thérapeutiques ciblant directement les causes de la maladie : synthèse diminuée d'insuline, ou cellules cibles ne répondant pas à l'hormone.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Vérification de connaissances

5 min

Corrigé
p. 459

Pour chacune des questions suivantes, plusieurs propositions de réponses sont faites dont une seule est correcte. Laquelle ?

- 1 La fermentation lactique :
 - a est plus efficace que la respiration cellulaire pour la régénération d'ATP ;
 - b nécessite du dioxygène pour se réaliser ;
 - c permet une régénération du NAD^+ nécessaire à la glycolyse ;
 - d est une étape de la respiration cellulaire ;
 - e a lieu dans la matrice des mitochondries.
- 2 Une hyperglycémie chronique peut être due à :
 - a une destruction des cellules α des îlots de Langerhans ;
 - b une destruction des cellules β des îlots de Langerhans ;
 - c un manque d'activité des récepteurs au glucagon ;
 - d une maladie auto-immune, c'est-à-dire une maladie causée par une mutation dans le gène du récepteur à l'insuline.

2 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 459

Qui suis-je ?

- 1 Molécule du cytosquelette s'associant avec la myosine lors d'une contraction musculaire.
- 2 Maladie auto-immune à l'origine d'une hyperglycémie chronique.
- 3 Produit de la glycolyse transformée en déchets lors de la respiration cellulaire ou de la fermentation.

3 Diabète - Type 1 / type 2



10 min

Corrigé
p. 459

Lycée Voltaire, Paris

Plusieurs sujets, correspondant à quatre catégories différentes, subissent des mesures de la concentration de leur insuline plasmatique durant les trois heures qui suivent une injection de 100 g de glucose. Les résultats obtenus sont fournis par le graphique page suivante.

- 1 Indiquez quelles courbes peuvent correspondre respectivement aux sujets diabétiques de type 1 et aux sujets diabétiques de type 2.
- 2 Proposez une hypothèse expliquant la différence entre les deux catégories de sujets obèses.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

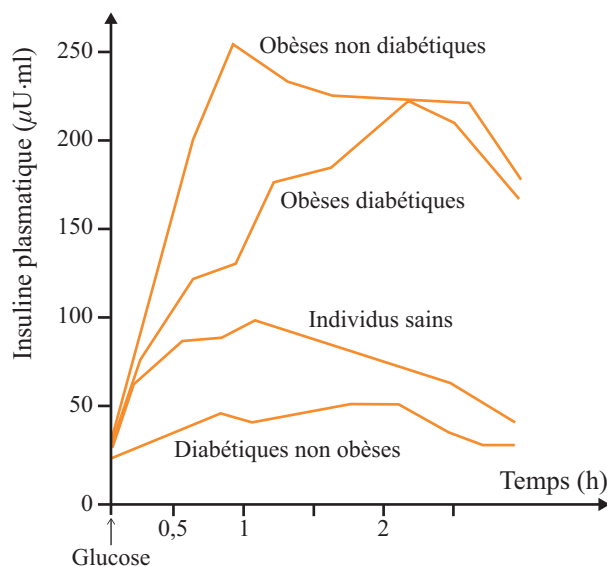


Figure 13.15 – Concentrations plasmatiques d'insuline chez différents sujets

4 Production d'ATP – Respiration



10 min

Corrigé
p. 459

Lycée Richelieu, Rueil Malmaison

On réalise deux expériences afin de mettre en évidence l'origine des gaz échangés avec l'extérieur par les animaux.

Expérience 1 : on fait ingérer à des animaux des glucides marqués au carbone radioactif (^{14}C). Le dioxyde de carbone qu'expirent ces animaux est radioactif.

Expérience 2 : les mêmes animaux inspirant du dioxygène marqué ($^{18}\text{O}_2$) produisent de la vapeur d'eau contenant de l'eau avec ^{18}O .

Donnez une explication aux affirmations suivantes.

- 1 La respiration consiste en une décarboxylation complète des métabolites utilisés.
- 2 Le dioxygène sert d'accepteur final d'électrons et de protons provenant de la déshydrogénation des métabolites.

5 Hormone – Cellule-cible



10 min

Corrigé
p. 460

Lycée Riquet, Saint-Orens

En utilisant du glucagon marqué, il est possible, grâce à une investigation au microscope électronique à transmission, de localiser cette hormone lorsqu'elle agit sur sa cellule-cible. Le schéma page suivante montre les résultats de cette recherche.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

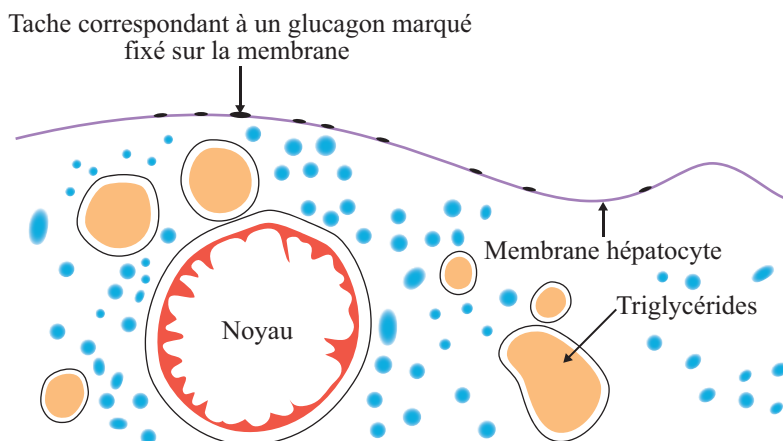


Figure 13.16 – Schéma d'une partie d'une cellule hépatique après perfusion de cette dernière par une solution contenant du glucagon marqué ($\times 7\,000$)

- 1 Expliquez la localisation de cette hormone.
- 2 Le glucagon qui circule librement dans le plasma est rapidement dégradé par le foie. Indiquez en quoi cette dégradation est indispensable au bon déroulement de la transmission du message hormonal.

6 Myopathie

Nouveau programme



15 min

Corrigé
p. 460

La myopathie de Duchenne est une maladie génétique touchant 1 garçon sur 3 500 à la naissance. À partir de l'étude des documents, expliquez l'origine moléculaire et cellulaire de la myopathie de Duchenne.

Document 1

L'enfant atteint présente en général peu de signes de la maladie avant l'âge de 3 ans mais il marche parfois tard, tombe souvent et se relève difficilement. Au fil des années, apparaît une faiblesse musculaire progressive des membres et du tronc. Bientôt la montée des escaliers, puis la marche, vers 10-12 ans, deviennent impossibles et l'utilisation des membres supérieurs se limite progressivement. L'atteinte des muscles respiratoires rend l'enfant particulièrement sensible aux infections broncho-pulmonaires et nécessite souvent la mise en place d'un appareil de ventilation assistée. Le muscle du cœur est aussi le siège d'une destruction des cellules musculaires : il perd alors en souplesse et en efficacité.

La myopathie de Duchenne est liée à l'absence d'une protéine appelée dystrophine. La dystrophine est une protéine spécifique des cellules musculaires.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

Allongée en bâton, elle est localisée sous la membrane de la cellule musculaire. Elle est associée à d'autres protéines qui forment ensemble un complexe moléculaire appelé DAP (dystrophin associated proteins). (...)

La dystrophine est codée par le gène appelé DMD, localisé sur le chromosome X. Dans la myopathie de Duchenne, le gène DMD est porteur de mutations qui sont responsables d'une absence totale de dystrophine.

Source : Zoom sur la dystrophie musculaire de Duchenne, AFM, août 2009

Document 2

L'ancrage des cellules dans leur environnement est primordial pour leur survie. Chez la cellule musculaire, des complexes protéiques auxquels participe la dystrophine permettent la formation de liens physiques entre le cytosquelette d'actine de la cellule et son environnement (la matrice extracellulaire).

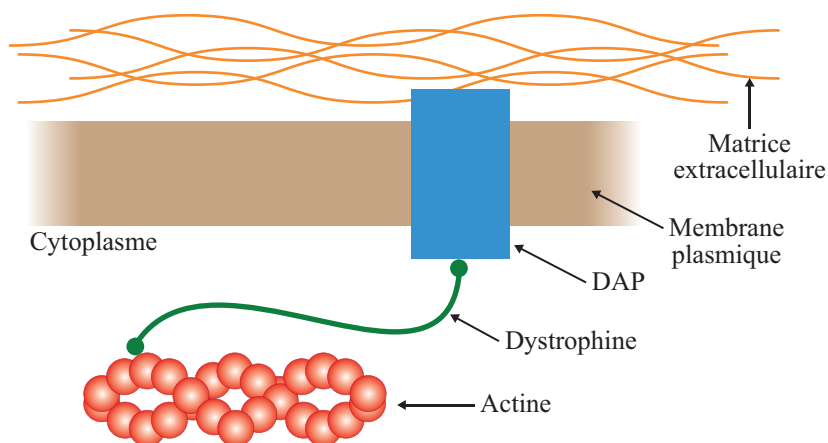


Figure 13.17 – Ancrage des cellules musculaires dans leur environnement

7 Pancréas - Greffe



15 min

Corrigé
p. 460

Lycée Honoré de Balzac, Mitry Mory

On procède aux expériences ci-après :

- *Expérience 1* : un chien ayant subi une ablation du pancréas montre rapidement les symptômes du diabète : une augmentation importante de la faim, un amaigrissement rapide, une hyperglycémie élevée, une baisse importante du glycogène hépatique.
- *Expérience 2* : ce chien subit ensuite une greffe d'un fragment de pancréas riche en îlots de Langerhans au niveau du cou. Les troubles qu'il présentait disparaissent en quelques heures.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- *Expérience 3* : chez ce même chien, l'injection d'une très petite quantité de solution glucosée à 4 g.L^{-1} dans l'artère qui irrigue le pancréas greffé entraîne une hypoglycémie générale temporaire.

- 1 Interprétez les résultats des expériences 1 et 2 en vue de montrer le rôle global du pancréas, son mode d'action. Vous préciserez son organe-cible.
- 2 Montrez que les résultats de l'expérience 3 mettent en évidence un des mécanismes de régulation de la glycémie.
- 3 En vous aidant de vos connaissances, faites un schéma du mécanisme de régulation mis en jeu au cours de l'expérience 3 (vous n'oublierez pas d'indiquer le principal organe effecteur de cette régulation ainsi que l'hormone mise en jeu).

8 Foie - Insuline - Récepteur



15 min

Corrigé
p. 461

Lycée Saint-Louis, Lorient

On étudie la production hépatique de glucose chez huit chiens soumis à une perfusion d'insuline ($0,14 \text{ U.k}^{-1}.\text{h}^{-1}$). Ces animaux ont préalablement subi une intervention chirurgicale au cours de laquelle la veine porte hépatique est directement reliée à la veine cave inférieure (voir figure 13.18) : le sang n'arrive plus que par l'artère hépatique et repart par les veines sus-hépatiques.

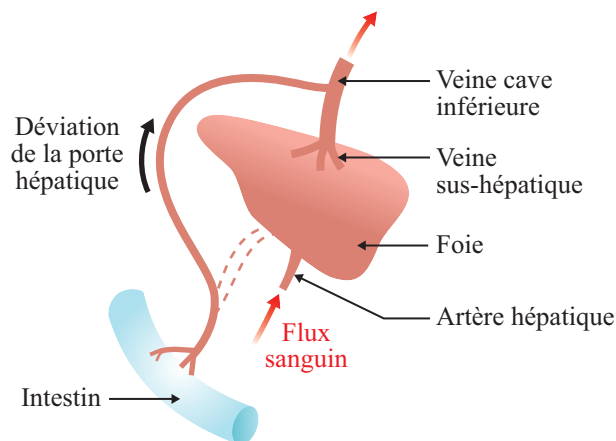


Figure 13.18 – Modification chirurgicale de la circulation hépatique

On mesure la glycémie dans l'artère et dans une veine sus-hépatique ; on peut par ailleurs estimer le débit sanguin traversant le foie : il est alors possible de calculer la quantité de glucose entrant ou sortant du foie. Les résultats présentés correspondent aux valeurs moyennes obtenues sur les huit animaux.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

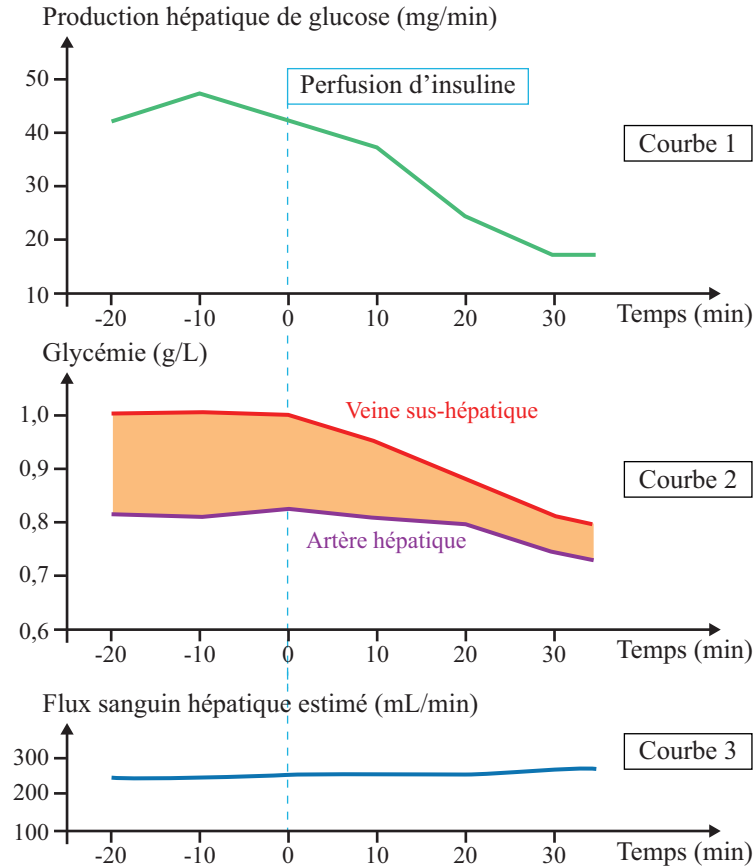


Figure 13.19 – Production hépatique de glucose, glycémie et flux sanguin hépatique

- 1 Utilisez les courbes 2 et 3 pour expliquer l'évolution de la production hépatique de glucose (courbe 1).
- 2 En utilisant vos connaissances sur l'action de l'insuline sur le foie, expliquez l'effet qu'a eu la perfusion d'insuline lors de cette expérience.

9 Production d'ATP – Respiration



20 min

Corrigé
p. 462

Lycée Balzac, Caen

Des observations de tissus variés, dans des conditions physiologiques différentes, montrent que plus une cellule est active, plus elle possède de mitochondries et plus les crêtes des membranes internes de ces dernières sont développées.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

À l'aide des deux expériences suivantes, précisez le rôle et le fonctionnement des sphères pédonculées constituant les ATP synthétases, petites structures caractéristiques des membranes mitochondriales internes.

Document A

La fragmentation de mitochondries par des ultrasons conduit à la formation spontanée de vésicules mitochondriales à partir des membranes internes. Ces vésicules, garnies de sphères pédonculées, et placées dans des conditions de pH déterminées, en présence d'ADP et de phosphate inorganique, produisent de l'ATP par phosphorylation de l'ADP.

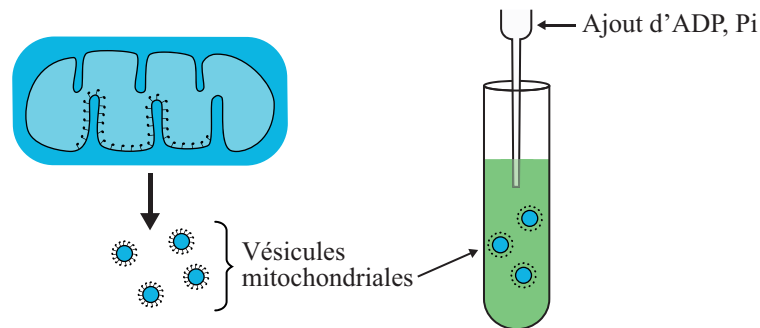


Figure 13.20 – Protocole de l'expérience

Document B

Si l'on met les vésicules obtenues en présence de protéase (enzymes catalysant l'hydrolyse des protéines), les sphères se séparent des pédoncules qui restent attachés à la membrane interne. On constate alors que, placées dans les mêmes conditions que dans la première expérience, les sphères isolées sont toujours capables de phosphoryler l'ADP en ATP, alors que les vésicules portant les pédoncules en sont incapables.

Document C

On fait varier le pH du milieu extérieur des vésicules mitochondriales entières, on fournit de l'ADP et du Pi, et on mesure la quantité d'ATP synthétisé.

pH intravésiculaire	Variations expérimentales du pH du tube à essai	Phosphorylation (augmentation de la concentration d'ATP)
6	4	Non
6	6	Non
6	9	Oui

Tableau 13.3 – Suivi de la phosphorylation de l'ADP grâce aux vésicules selon les conditions de pH

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

10 Créatine



20 min

Corrigé
p. 462

Nouveau programme

La créatine est une molécule naturellement présente dans le cytoplasme des cellules musculaires. Il est également possible de s'en procurer pour en consommer, pratique associée au dopage. La prise de la créatine permet en effet d'augmenter ses capacités musculaires.

À partir des documents suivants et de vos connaissances, précisez le rôle biologique de la créatine et son utilisation en tant que produit dopant, ainsi que les risques associés.

Document 1

Tout comme l'ATP, la créatine présente un état lié à un groupement phosphorylé (phosphocréatine), qui peut libérer un P_i selon la réaction suivante :



Document 2

Des cellules musculaires sont mises en présence de phosphocréatine dont le phosphate a été marqué radioactivement. Les quantités de phosphocréatine radioactive et d'ATP radioactif sont ensuite suivis au cours du temps.

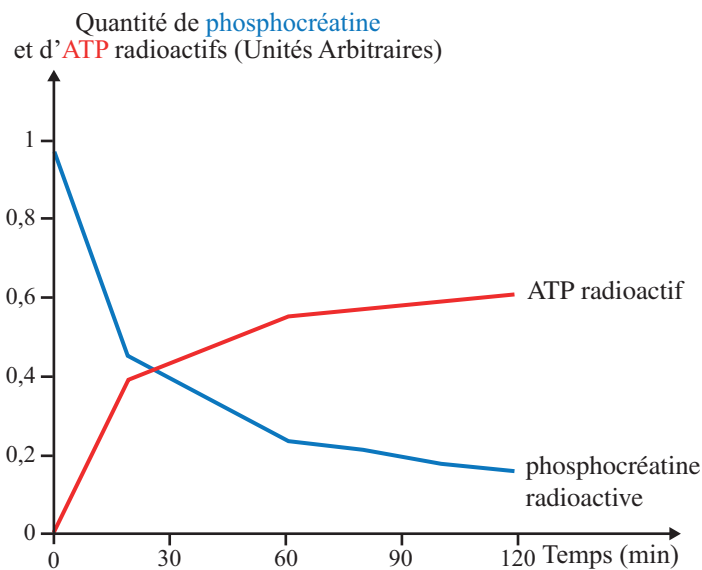


Figure 13.21 – Suivi des quantités de phosphocréatinine radioactive et d'ATP radioactif au cours du temps

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Document 3

Des individus ont consommé 20 grammes de créatine par jour pendant 5 jours et le taux d'ATP dans leur quadriceps a été mesuré avant, pendant, et après un exercice musculaire.

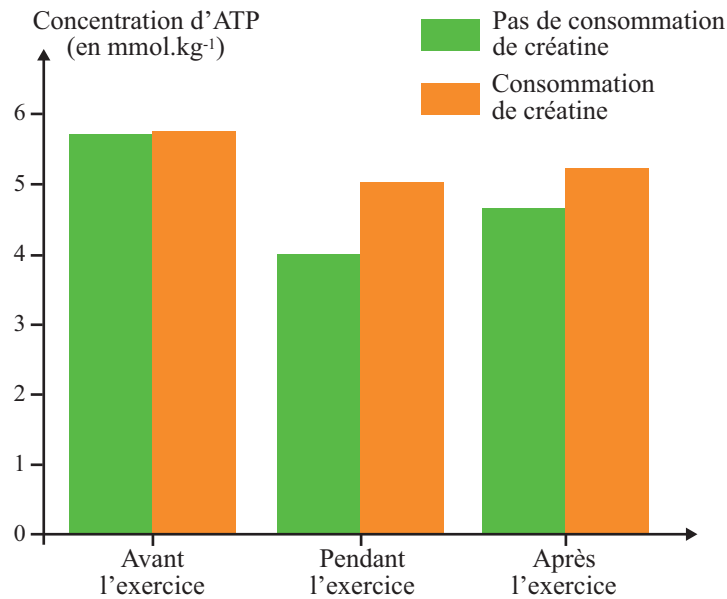


Figure 13.22 – Quantité d'ATP dans le quadriceps d'individus ayant consommé ou non de la créatine, avant, pendant et juste après un effort physique

Document 4

« Certains effets secondaires tels que les crampes musculaires, troubles hépatiques, troubles rénaux, hypertension artérielle et pathologies cardiovasculaires (...).

L'excès de créatine consommé sous forme de suppléments alimentaires, en particulier à forte dose, est métabolisé en différents métabolites dont certains sont de nature à être cancérigène (...). Ce risque cancérigène reste à ce jour mal défini, car il doit être apprécié à long terme. Sa gravité justifie la plus grande prudence. »

Source : Institut de Recherche du Bien-être de la Médecine et du Sport santé (IRBMS)- 08-2019

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

11 Production d'ATP – Respiration



25 min

Corrigé
p. 463

Lycée La Rochefoucauld, Paris

La respiration cellulaire correspond à la dégradation complète de composés organiques comme le glucose. Cette dégradation correspond à l'oxydation complète du carbone organique qui est minéralisé sous forme de CO_2 . La respiration comporte plusieurs étapes qui se déroulent dans différents compartiments cellulaires.

Analysez les expériences des documents pour identifier les différentes étapes de la respiration cellulaire. Vous signalerez à quelles étapes se fait la production d'ATP.

Document A

Des mitochondries sont isolées par centrifugation. Elles sont ensuite introduites dans un appareil de mesure contenant une solution tampon riche en O_2 et en ions phosphate. On mesure l'évolution du taux d' O_2 dans l'appareil après injection de glucose puis de pyruvate.

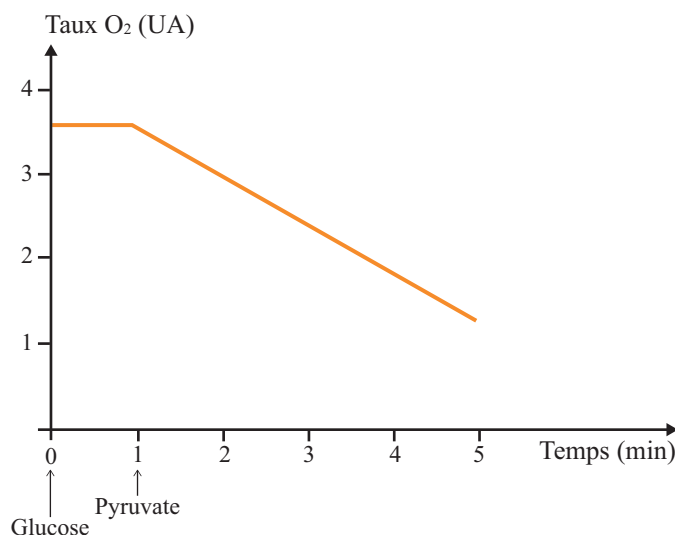


Figure 13.23 – Résultat des mesures du taux d' O_2 dans la suspension de mitochondries

Document B

On étudie la production de molécules par les cellules animales au cours de la respiration. On cultive des cellules animales sur un matériel très oxygéné contenant du glucose radioactif marqué au ^{14}C . On désigne ce glucose par la lettre G. Des prélèvements effectués aux temps t_0 , t_1 , t_2 , t_3 , t_4 permettent de noter l'apparition de nouvelles substances radioactives :

- du pyruvate (désigné par la lettre P) ;
- du dioxyde de carbone.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Milieu externe	Milieu cellulaire		Temps
	Hyaloplasme	Mitochondries	
G^{++++}			t_0
G^{++}	G^{+++}		t_1
	P^{+++}	P^{++}	t_2
CO_2^+		P^{+++}	t_3
CO_2^{++}			t_4

Tableau 13.4 – Localisation et abondance des molécules dans le milieu extérieur et dans deux compartiments cellulaires en fonction du temps

12 Insuline - organes cibles



25 min

Corrigé
p. 464

Lycée des Pontonniers, Strasbourg

À l'aide des documents ci-après et de vos connaissances, vous préciserez les différents rôles de l'insuline puis vous expliquerez quand et comment sa sécrétion est déclenchée.

Document 1

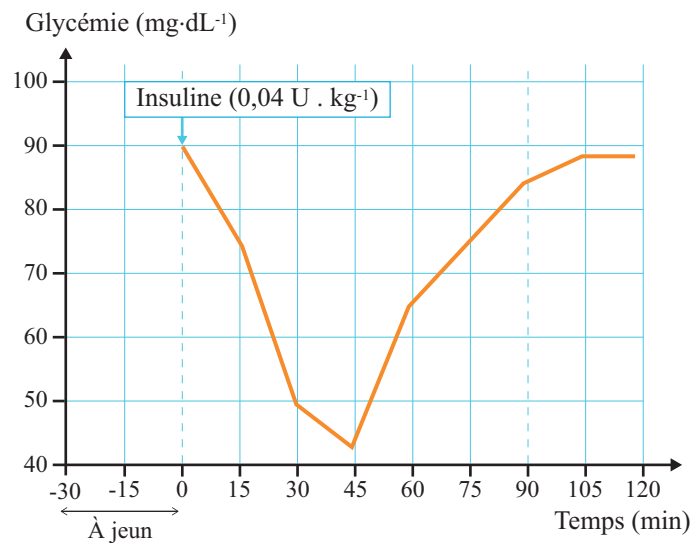


Figure 13.24 – Variation de la glycémie à la suite d'une injection intraveineuse d'insuline

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

Document 2

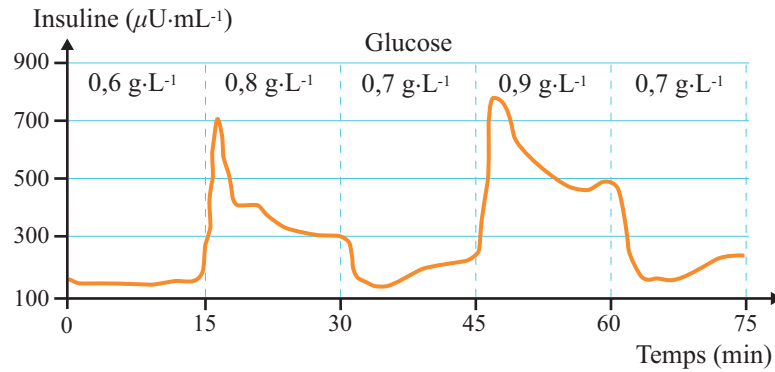


Figure 13.25 – Libération d'insuline par un pancréas isolé en fonction de la concentration en glucose

- Information **a** : une injection d'insuline provoque chez le chien normal à jeun, une chute rapide du bilan hépatique qui passe, en moins d'une heure, de 42 mg de glucose par minute à une valeur à peu près nulle. Chez un chien témoin également à jeun, le bilan hépatique ne se modifie pas significativement pendant cette période de temps.

Bilan hépatique (en mg de glucose par min)

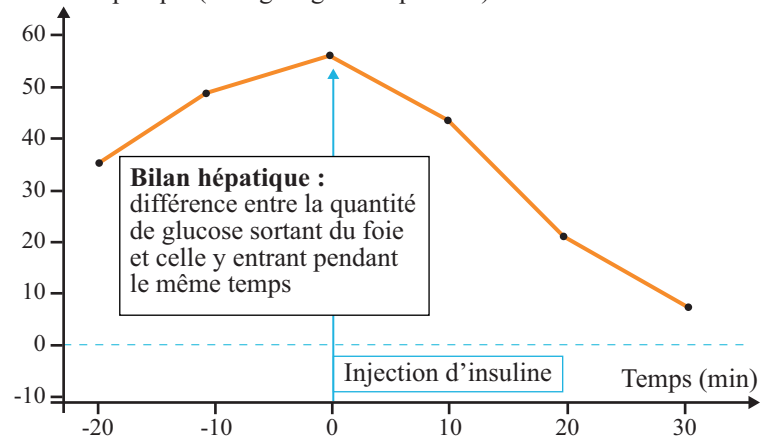


Figure 13.26 – Bilan hépatique chez le chien

- Information **b** : du tissu musculaire est maintenu en vie dans un milieu de culture convenable ; on dose le prélèvement de glucose effectué par ce tissu dans le milieu ainsi que sa teneur en glycogène au bout de 10 minutes.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Glucose prélevé dans le milieu (mg de glucose/g de muscle/ 10 min)		Teneur du muscle en glycogène au bout de 10 minutes (en mg/g de muscle)	
Milieu sans insuline	Milieu avec insuline	Milieu sans insuline	Milieu avec insuline
1,43	1,88	2,45	2,85

Tableau 13.5 – Comportement du muscle dans un milieu avec ou sans insuline

- Information **[c]** : on sait qu'une alimentation trop riche en glucides fait « engraisser ». Par ailleurs, chez un animal soumis à un diabète expérimental (par destruction des cellules sécrétrices d'insuline), on constate que la formation des lipides dans le tissu adipeux est réduite de près de 90%.
- Information **[d]** : des tissus vivants sont placés dans un milieu de culture contenant du glucose marqué (contenant du ^{14}C radioactif). On constate que ces tissus consomment du dioxygène et libèrent du dioxyde de carbone radioactif ($^{14}\text{CO}_2$), et que cette libération de $^{14}\text{CO}_2$ est nettement augmentée si on ajoute de l'insuline dans le milieu de culture.

13 Fermentation



30 min

Corrigé
p. 466

Lycée Teilhard de Chardin, Saint Maur des Fossés

Les fibres musculaires sont des cellules contractiles, qui consomment de l'ATP lors de la contraction. Parmi les fibres musculaires squelettiques, on distingue les fibres musculaires de type I, qui interviennent dans des efforts musculaires de longue durée, et les fibres musculaires de type II, qui interviennent dans des efforts intenses de courte durée.

À partir des informations extraites des documents, mises en relation avec les connaissances, expliquez à de futurs professeurs d'éducation physique et sportive comment la structure et le métabolisme de chaque type de fibre permettent la contraction musculaire dans chaque type d'effort. Vous étayerez votre exposé de schémas.

Document A

La myoglobine est une protéine musculaire qui fixe le dioxygène. Le métabolisme d'oxydation du glucose consomme du dioxygène. Les lipides fournissent des acides gras. Le glycogène est une molécule de mise en réserve du glucose. Le glucose et l' O_2 sont véhiculés par le sang.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

Type de fibres / Caractéristiques	Fibres de type I	Fibres de type II
Couleur	rouge	blanche
Myoglobine	++++	+
Vitesse de contraction	+	++++
Résistance à la fatigue	++++	+
Mitochondries	++++	+
Irrigation sanguine	++++	+
Métabolisme de dégradation du glucose en présence d'O ₂	++++	+
Métabolisme de dégradation du glucose en absence d'O ₂	+	++++
Contenu en lipides	+++	+
Contenu en glycogène	+	+++

+ indique l'importance de chaque caractéristique

Tableau 13.6 – Caractéristiques structurales et métaboliques des 2 types de fibres musculaires

Document B : la production d'ATP par les cellules musculaires

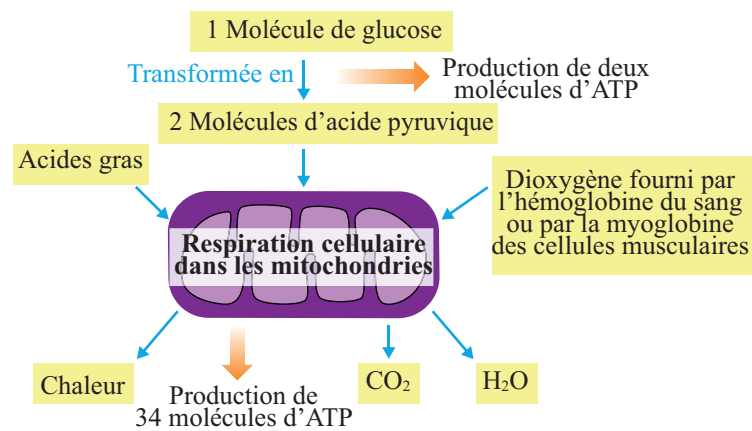


Figure 13.27 – Production d'ATP dans les cellules musculaires de type I

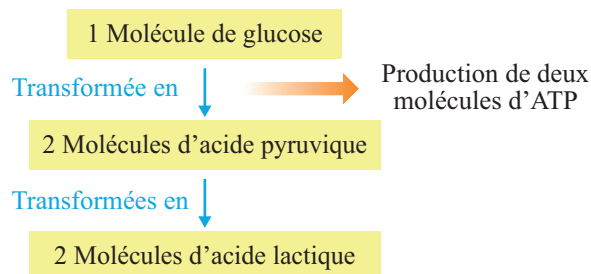


Figure 13.28 – Production d'ATP dans les cellules musculaires de type II

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Document C

La contraction musculaire est une activité qui consomme de l'ATP. L'ATP est une molécule énergétique qui libère de l'énergie lors de son hydrolyse.

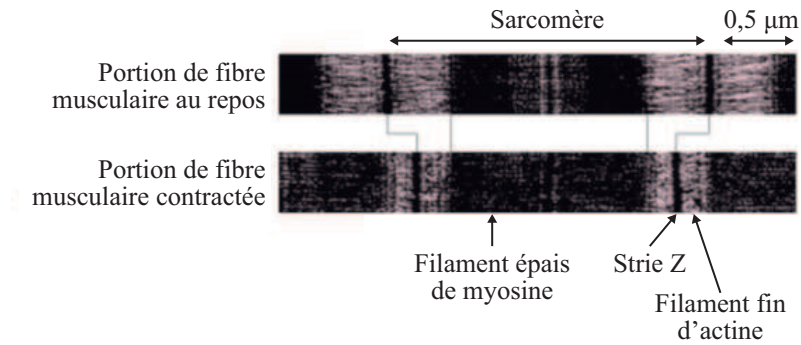


Figure 13.29 – Électronographie d'une fibre musculaire dans deux états différents

On observe le même phénomène, que l'on réalise l'électronographie avec des fibres de type I ou avec des fibres de type II. Lors de ce phénomène, il y a glissement des filaments d'actine le long des filaments de myosine.

14 Diabète - Causes - Conséquences



20 min

Corrigé
p. 466

Lycée Lacordaire, Marseille

À partir des documents et à l'aide de vos connaissances, proposez une explication quant à l'origine et aux conséquences des deux types de diabète.

Document 1 : les caractéristiques du diabète de type 1

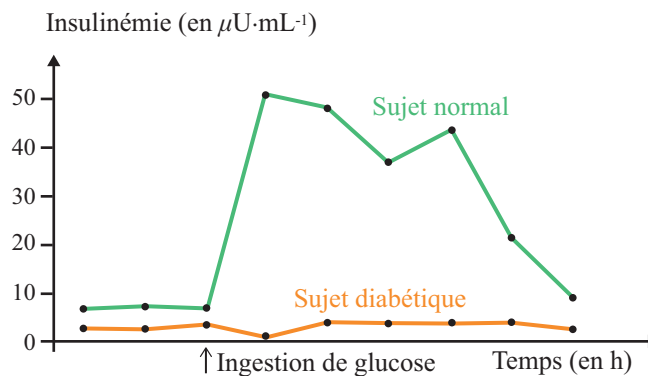


Figure 13.30 – Insulinémie après injection de glucose

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

Document 2 : caractéristiques du diabète de type 2

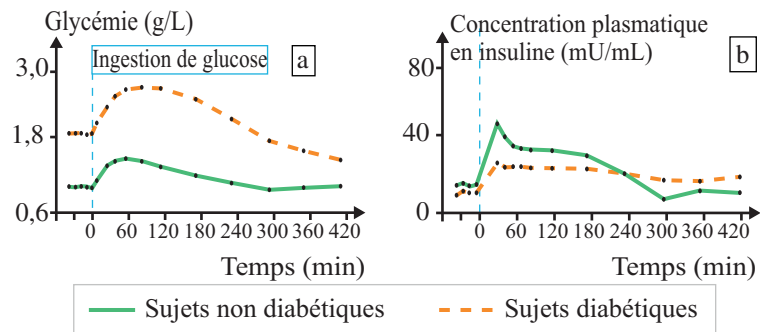


Figure 13.31 – Glycémie et concentration plasmatique en insuline, après ingestion de glucose

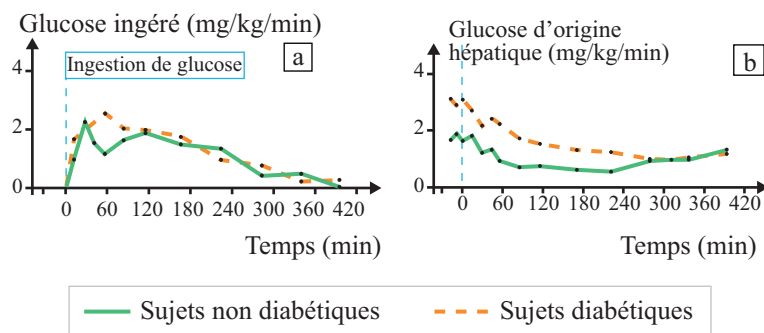


Figure 13.32 – Origine du glucose sanguin après ingestion

Document 3 : conséquences des diabètes

Complications communes aux deux types de diabètes :

- **Hypertension artérielle.**

« Quand on vous donne à choisir entre une vie suspendue à une machine tous les deux jours, rythmée par plusieurs injections quotidiennes d'insuline et une double transplantation rein/pancréas qui permettra d'échapper à ces contraintes plusieurs années, le choix a été, en ce qui me concerne, rapidement fait. Souffrant d'un diabète insulino-dépendant depuis l'âge de 14 ans - soit pendant 26 ans - traitée à l'insuline au rythme de quatre injections par jour, ces dernières années, j'ai été confrontée, à l'âge de 40 ans à une vive accélération de l'insuffisance rénale qui perdurait depuis plusieurs années. »

Témoignages : Équilibre, n°198, juin 1996

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- *Macroangiopathies (atteintes des gros vaisseaux).*
Artères des membres inférieurs, insuffisance coronarienne (c'est-à-dire des vaisseaux qui irriguent le muscle cardiaque).
- *Microangiopathies (atteintes des petits vaisseaux).*
Rétinopathie, néphropathie (atteinte des reins entraînant souvent des insuffisances rénales nécessitant des dialyses régulières).
- *Complications nerveuses.*

15 Diabète - type 2



30 min

Corrigé
p. 467

Lycée Charlemagne, Paris

On a suivi l'évolution du diabète de type 2 (non insulino-dépendant) pendant plusieurs années (12 ans) chez un individu non traité. On a étudié en particulier l'évolution de son insulïnémie et de sa glycémie à jeun et deux heures après le début d'un test d'hyperglycémie provoquée.

Les résultats sont donnés sous forme de graphiques ci-dessous (figures 13.33 et 13.34).

Tirez de ces graphiques les informations montrant que, chez le sujet étudié, le phénotype « diabète de type 2 » a évolué au cours du temps vers un phénotype diabétique sévère et déterminez le moment de ce changement.

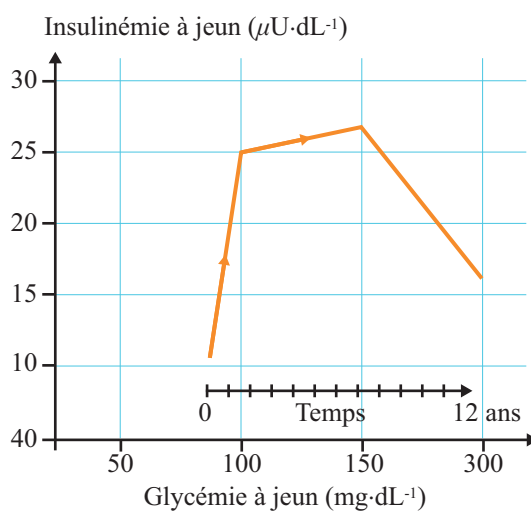


Figure 13.33 – Insulïnémie et glycémie à jeun

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

Insulinémie à jeun ($\mu\text{U}\cdot\text{dL}^{-1}$) 2 heures après le début d'un test d'hyperglycémie provoquée

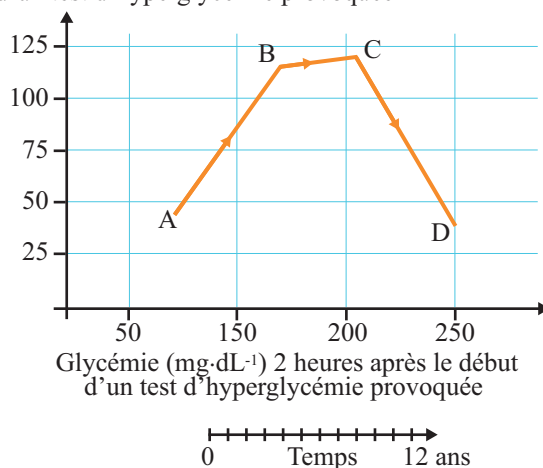


Figure 13.34 – Insulinémie et glycémie après un test d'hyperglycémie provoquée

16 Production d'ATP - Respiration



35 min

Corrigé
p. 468

Lycée Balzac, Caen

On introduit dans un oxymètre (appareil pouvant mesurer une concentration en dioxygène) 2 mL de solution tampon. Dans ce milieu on injecte successivement :

- 0,2 mL d'une solution enrichie en mitochondries ;
- 0,2 mL de succinate (intermédiaire des décarboxylations oxydatives de la matrice) ;
- 0,06 mL d'ADP à 6,5 mM ;
- 0,12 mL d'ADP à 6,5 mM.

- 1 À partir des résultats expérimentaux (voir figure 13.35 page suivante), expliquez la faible consommation de dioxygène lorsque les mitochondries sont injectées et l'augmentation de la consommation de dioxygène lorsque le succinate est ajouté.
- 2 À partir de l'évolution de la consommation de dioxygène lorsque l'ADP est ajouté, montrez que l'utilisation du succinate par les mitochondries est couplée à la production d'ATP.
- 3 Schématisez sur une mitochondrie l'utilisation du succinate, de l'ADP et la consommation de O_2 de façon à mettre en évidence le processus de fabrication de l'ATP.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

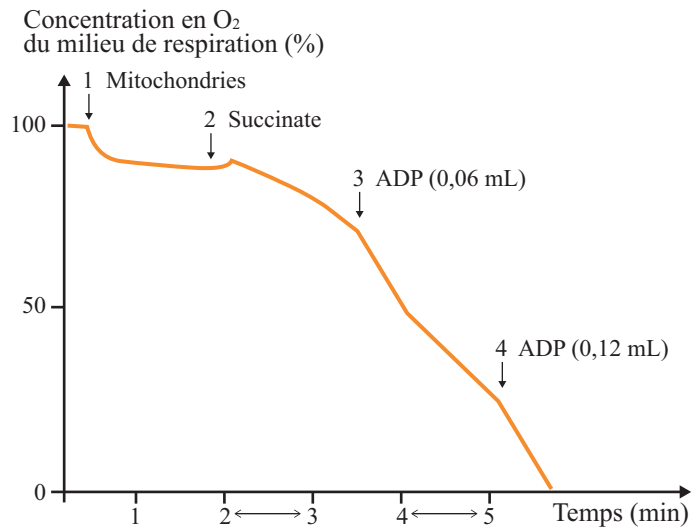


Figure 13.35 – Résultats obtenus pour la concentration en dioxygène au cours du temps

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

1 QCM Vérification de connaissances

→ Énoncé
p. 440

- 1 Réponse **C**. 2 Réponse **D**.

2 Vérification des connaissances

→ Énoncé
p. 440

- 1 L'actine.
2 Le diabète de type 1.
3 Le pyruvate.

3 Diabète - Type 1 / type 2

→ Énoncé
p. 440

Lycée Voltaire, Paris

- 1 On sait que le diabète de type 2 est associé à une obésité. Les individus « obèses diabétiques » correspondent donc à ce type. En parallèle, on sait que les diabétiques de type 1 possèdent moins de cellules productrices d'insuline, comme c'est le cas pour les « diabétiques non obèses » sur le graphique.
- 2 On observe que les individus obèses non diabétiques présentent une augmentation plus rapide de la concentration en insuline plasmatique comparés aux individus obèses diabétiques ($250 \mu\text{g/mL}$ atteints en une heure pour les individus obèses non diabétiques alors qu'il faut plus de deux heures pour atteindre $225 \mu\text{g/mL}$ pour les individus obèses diabétiques). Or, on sait que les diabétiques de type 2 peuvent, à long terme, présenter une déficience en insuline. C'est probablement le début de ce processus pour ces patients, qui évoluera probablement vers une déficience plus critique dans le futur.

4 Production d'ATP – Respiration

→ Énoncé
p. 441

Lycée Richelieu, Rueil Malmaison

- 1 L'expérience 1 nous indique que les animaux ayant consommé des glucides marqués au (^{14}C) rejettent du $^{14}\text{CO}_2$. Des transformations chimiques ont donc eu lieu, pendant lesquelles les glucides ont perdu leur ^{14}C , qui a permis la formation de $^{14}\text{CO}_2$. Ces réactions chimiques appartiennent à la respiration, qui consiste donc bien en une perte des atomes de carbones (décarboxylation) complète du glucose.
- 2 Au cours de la deuxième expérience, du $^{18}\text{O}_2$ s'est transformé en H_2^{18}O . Pour équilibrer la réaction chimique, il faut inclure des protons, mais aussi des électrons. Cette réaction consiste donc en une réduction du O_2 , qui est ainsi un accepteur d'électrons. De plus, on sait que ces électrons et protons proviennent du NADH, H^+ au niveau de la chaîne respiratoire des mitochondries.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

5 Hormone – Cellule-cible

Énoncé
p. 441

Lycée Riquet, Saint-Orens

- 1 Sur le document, on observe des taches qui correspondent au glucagon au niveau de la membrane de la cellule hépatique. En effet le glucagon est une hormone qui agit en se fixant à ses récepteurs spécifiques, présentés par la membrane de ses cellules-cibles.
- 2 Le fait de dégrader rapidement le glucagon permet d'affiner la réponse hormonale. En effet, en cas d'hypoglycémie, du glucagon est libéré par les cellules pancréatiques avant de permettre la libération de glucose par les hépatocytes. Toutefois, si le glucagon n'est pas dégradé, la durée du signal devient trop longue, risquant une trop forte libération de glucose, voire une hyperglycémie.

6 Myopathie

Énoncé
p. 442

Nouveau programme

La myopathie de Duchenne est une maladie génétique dont on souhaite comprendre le mécanisme.

D'après le document 1, on apprend que les patients montrent une certaine faiblesse musculaire aussi bien au niveau des bras et des jambes, qu'au niveau des poumons ou du cœur. Au niveau cellulaire, cette pathologie touche donc les cellules musculaires.

De plus, dans ce document, il est indiqué que les patients possèdent une mutation au niveau du gène de la dystrophine, induisant l'absence de cette protéine. Ceci suggère donc que cette molécule est nécessaire pour le fonctionnement des cellules musculaires et que sans elles, les patients souffrent de faiblesse musculaire.

D'après le document 2, la dystrophine est une protéine qui exerce un lien physique entre le cytosquelette d'actine et l'environnement de la cellule (la matrice extracellulaire).

On peut donc émettre l'hypothèse que chez les patients, l'absence de cette molécule empêche tout ancrage des cellules musculaires dans la matrice extracellulaire, et donc la formation de tissus musculaires solides. Ceci conduirait donc à la faiblesse musculaire dont souffrent les patients.

7 Pancréas - Greffe

Énoncé
p. 443

Lycée Honoré de Balzac, Mitry Mory

MÉTHODE

Il faut finement analyser l'expérience avant de vouloir appliquer les notions du cours. Bien que le pancréas puisse exercer un rôle hypoglycémiant et un rôle hyperglycémiant, un seul axe vous est demandé ici.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

- 1 L'étude de l'expérience 1 montre qu'une ablation du pancréas conduit à une hyperglycémie et à une baisse du taux de glycogène dans les cellules du foie. Ainsi, le pancréas a un rôle hypoglycémiant, en agissant probablement sur les cellules du foie en activant la mise en réserve du glycogène.
L'expérience 2 confirme ce rôle puisque qu'une greffe d'un fragment de pancréas engendre une disparition des symptômes. De plus, cette expérience prouve que le pancréas agit à distance, *via* la circulation sanguine et donc *via* la voie hormonale.
- 2 L'expérience 3 montre qu'une augmentation de la glycémie à proximité du pancréas conduit à une hypoglycémie générale temporaire. Le pancréas est donc un organe régulateur de la glycémie qui permet une réduction de la glycémie lors d'une hyperglycémie.
- 3 En plus du foie, l'insuline active les cellules musculaires et les cellules adipeuses. Le schéma correspond à la partie gauche de la figure 13.13 page 437.

8 Foie - Insuline - Récepteur

Énoncé
p. 444

Lycée Saint-Louis, Lorient

MÉTHODE

Il faut comprendre le but de la chirurgie réalisée avant toute analyse des courbes. Elle permet simplement d'éviter que les nutriments absorbés par les intestins lors de la digestion ne passent par le foie, organe mettant justement en réserve le glucose. Ceci permet ainsi de s'assurer que le taux de glucose est stable dans le sang au cours du temps avant toute injection d'insuline.

- 1 D'après la courbe 2, on observe que la glycémie à la sortie du foie (dans la veine) est plus forte qu'en entrée (dans l'artère). Le foie est donc capable de libérer du glucose dans le sang. Après injection d'insuline, on observe que la glycémie dans la veine sus-hépatique diminue rapidement et fortement (passage de 1 à 0,8 g.L⁻¹ en 30 minutes), alors celle de l'artère hépatique varie plus tardivement et moins (passage de 0,8 à 0,7 g.L⁻¹). À la sortie du foie, il y a donc une plus forte diminution de la glycémie qu'en entrée. Ceci n'est pas lié à une modification du flux sanguin hépatique, qui est stable tout au long de l'expérience (courbe 3). On en conclut donc que suite à l'injection d'insuline, le foie libère moins de glucose.
- 2 On sait que l'insuline favorise la mise en réserve du glucose en activant la glycogénogenèse par les cellules du foie, et en inhibant leur production de glucose par glycogénolyse et néoglucogenèse. Ceci explique donc la plus faible libération de glucose par le foie après injection d'insuline.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

9 Production d'ATP – Respiration

Énoncé
p. 445

Lycée Balzac, Caen

On souhaite ici comprendre le rôle et le fonctionnement des sphères pédonculées, structures présentes dans la membrane interne des mitochondries.

Le document A nous apprend qu'il est possible de former des vésicules de membrane interne des mitochondries présentant des sphères pédonculées. Dans des conditions de pH déterminées et en présence d'ADP et de P_i , ces vésicules sont capables de régénérer de l'ATP. Ainsi, les vésicules possèdent l'attrail moléculaire suffisant pour permettre la formation d'ATP à partir d'ADP et de P_i .

Selon le document B, si on sépare les deux parties des sphères pédonculées (sphère et pédoncule), seules les sphères pédonculées sont capables de régénérer l'ATP. C'est donc cette partie qui permet la synthèse d'ATP.

⚠ ATTENTION

Il faut ici se rappeler qu'il existe une relation entre le pH et la concentration en ions H^+ : plus le pH est bas, plus la concentration en H^+ est élevée.

Dans le document C, des vésicules de membrane interne sont placées dans du milieu dont nous faisons varier le pH. Si le pH du milieu est plus faible ou égal à celui du milieu intravésiculaire, aucune synthèse d'ATP n'est visible. C'est le contraire si la concentration en H^+ est plus élevée dans le milieu intravésiculaire que dans le milieu du tube à essai. Or, selon la figure du document A, le milieu intravésiculaire correspond au milieu intramembranaire des mitochondries.

Ainsi, ces documents suggèrent qu'une différence de concentration en ions H^+ de part et d'autre de la membrane interne (plus élevée dans le milieu intramembranaire des mitochondries) est nécessaire pour la régénération de l'ATP par les sphères pédonculées.

10 Créatine

Énoncé
p. 447

Nouveau programme

On souhaite comprendre pourquoi la créatine est utilisée comme produit dopant.

Le premier document nous apprend que cette molécule est présente sous deux états, un état phosphorylé et un état non phosphorylé. Le passage du premier état au deuxième entraîne la libération d'un P_i . Nous pouvons émettre l'hypothèse que la créatine est une molécule énergétique et que la libération du P_i permet une création d'énergie que la cellule peut utiliser. Aussi, la créatine pourrait être capable de transférer son P_i à un ADP, et ainsi permettre la régénération d'ATP.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Pour valider une des deux hypothèses, une expérience a été réalisée au cours de laquelle des cellules musculaires ont été mises en présence de phosphocréatine avec un groupement phosphate radiomarké. Le suivi de la phosphocréatine marquée montre que cette molécule est consommée par les cellules au cours du temps. Sa quantité passe en effet d'une unité à 0,2 unités en deux heures. En parallèle, on observe l'apparition progressive d'ATP marqué, atteignant 0,6 unité après deux heures. Ceci suggère que des molécules d'ADP ont pu acquérir des groupements Pi radioactifs provenant des molécules de phosphocréatine. La créatine jouerait ainsi un rôle dans la régénération de l'ATP en lui transférant un groupement Pi.

Pour étudier son utilisation en tant que produit dopant, des individus ont consommé ou non de la créatine pendant 5 jours, et la quantité d'ATP dans leur quadriceps est quantifiée avant, pendant et juste après un effort. Avant l'exercice, aucune différence n'est visible entre les deux groupes (environ $5,5 \text{ mmol.kg}^{-1}$ d'ATP). L'exercice induit une forte diminution de cette quantité chez le groupe contrôle (passage à 4 mmol.kg^{-1} d'ATP pendant l'exercice et $4,5 \text{ mmol.kg}^{-1}$ d'ATP après). Cette diminution est limitée chez les individus ayant consommé de la créatine (5 mmol.kg^{-1} d'ATP pendant l'exercice et $5,2 \text{ mmol.kg}^{-1}$ d'ATP juste après).

La prise de créatine ne modifie donc pas la concentration en ATP dans la cellule initialement, mais elle permet ainsi une régénération efficace d'ATP pendant les efforts selon la réaction chimique suivante :



Ceci explique donc son utilisation en tant que produit dopant. Toutefois, d'après le document 4, la prise de créatine est associée à des risques d'effets secondaires, comme des atteintes musculaires, hépatiques, rénaux et cardiovasculaires. De plus, bien que le risque de cancer ne soit pas totalement avéré, une grande prudence est conseillée ici.

Ainsi la prise de créatine permet une régénération plus efficace de l'ATP lors d'un effort musculaire, mais sa prise est associée à des risques d'effets secondaires graves pour la santé.

11 Production d'ATP – Respiration

Énoncé
p. 449

Lycée La Rochefoucauld, Paris

Le but de cet exercice est de comprendre où ont lieu les premières étapes de la respiration cellulaire.

Le premier document montre l'évolution du taux d' O_2 dans un appareil contenant des mitochondries. On observe que suite à l'ajout de glucose, le taux de dioxygène reste stable (3,5 UA). Or, l'ajout de pyruvate conduit à une diminution du taux d' O_2 (passage à de 4,5 à 1,4 UA en 4 minutes). Les mitochondries sont donc capables de consommer de l' O_2 (et donc de respirer) seulement en présence de pyruvate.

CORRIGÉS

Dans le document 2, des cellules animales sont mises en présence de glucose radioactif et on suit la présence et la localisation de molécules radioactives (glucose, CO_2 et pyruvate).

On remarque qu'entre le t_0 et le t_1 , le taux de glucose extracellulaire a diminué au profit du hyaloplasme : le glucose est donc entré dans la cellule.

Entre le t_1 et le t_2 , le glucose marqué disparaît, alors que du pyruvate marqué apparaît dans le hyaloplasme et dans les mitochondries. Le glucose étant initialement dans le hyaloplasme, on peut donc suggérer que c'est ici que se déroule la transformation de glucose en pyruvate, qui est ensuite importé dans les mitochondries.

En effet, au t_3 , le pyruvate n'est présent que dans les mitochondries. De plus, du CO_2 marqué apparaît dans le milieu extracellulaire. Au t_4 , il n'y a même plus de pyruvate visible dans les mitochondries, alors que la quantité de CO_2 extracellulaire a augmentée. Le pyruvate a donc subi une décarboxylation, participant à la synthèse de CO_2 .

On peut donc conclure que les premières étapes de la respiration consistent en une entrée du glucose dans le hyaloplasme où il est transformé en pyruvate. Cette molécule est importée dans la mitochondrie où, probablement grâce à une consommation d' O_2 , elle est dégradée, ce qui permet la formation de CO_2 . Enfin, ce gaz est rejeté par les cellules.

12 Insuline - organes cibles

→ Énoncé
p. 450

Lycée des Pontonniers, Strasbourg

MÉTHODE

En présence d'un nombre aussi important de documents, prenez le temps de les analyser un par un et de noter les conclusions de chacun. Vous pourrez ensuite répondre aux questions posées par l'énoncé en utilisant pour chaque point les documents intéressants.

On souhaite comprendre les rôles de l'insuline et expliquer où et comment elle est sécrétée.

D'après le document 2, on observe qu'un pancréas isolé soumis à une glycémie faible ($0,6 \text{ g.L}^{-1}$) libère peu d'insuline (un peu plus de $100 \mu\text{U.mL}^{-1}$). En revanche, en le soumettant à des concentrations en glucose plus élevées, on observe des pics correspondant à une libération rapide et brève d'une grande quantité d'insuline, avant une diminution et un plateau. Plus la glycémie est élevée, plus le pic et le plateau sont élevés. Un retour à une glycémie plus faible est associé à une libération d'insuline plus faible.

Ainsi, le pancréas est capable de capter une hyperglycémie et de réagir en synthétisant rapidement de grandes quantités d'insuline. Un retour à une valeur consigne arrêtera la production de cette hormone.

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

On peut donc se demander quelle est l'action de l'insuline une fois sécrétée. D'après le document 1, une injection intraveineuse d'insuline conduit à une rapide diminution de la glycémie (passage de 90 mg.dL^{-1} à 42 mg.dL^{-1} en 45 minutes). Cette diminution est transitoire puisque la glycémie est à nouveau normale après 105 minutes.

Ainsi, l'insuline est une hormone hypoglycémiante. Quelles sont ses cellules-cibles et comment peut-elle agir pour diminuer la glycémie ?

L'information **a** s'intéresse au bilan hépatique. Il correspond à la différence entre la quantité de glucose à la sortie du foie et la quantité de glucose à l'entrée. Cette valeur donne donc une idée de la libération de glucose par le foie. Selon l'information a et le graphique, l'injection d'insuline chez un chien induit une chute rapide du bilan hépatique (passage de 42 mg de glucose par minute à 0 en moins d'une heure selon le texte, de 55 à 10 en 30 minutes selon le graphique). L'insuline agit donc sur le foie en inhibant sa libération de glucose dans le sang.

Selon l'information **b**, du tissu musculaire prélève davantage de glucose dans le milieu s'il est en présence d'insuline que sans (1,88 mg prélevés contre 1,43). De plus, ce prélèvement est associé à une présence augmentée de glycogène (2,45 mg de glycogène avec insuline contre 2,45 sans). Ainsi, l'insuline peut agir sur les muscles, en conduisant au prélèvement de davantage de glucose sanguin, permettant sa mise en réserve en glycogène.

L'information **c** nous apprend qu'une alimentation trop riche en glucides fait « engraisser ». Ceci laisse donc présager que le glucose et les sucres peuvent être transformés en matière grasse. De plus, un animal diabétique sans cellules productrices d'insuline présente une diminution de formation de lipides de 90% par le tissu adipeux. Ainsi, l'insuline peut aussi cibler le tissu adipeux, activant la mise en réserve de glucose sous forme de matière grasse.

Enfin, l'information **d** montre que chez des cellules isolées, la respiration cellulaire (passage de carbone marqué du glucose au CO_2) est augmentée en présence d'insuline. Cette dernière cible donc toutes les cellules, en favorisant la respiration cellulaire.

En conclusion, l'insuline est libérée dans le sang par le pancréas dans le cas d'une hyperglycémie. Cette hormone permet de diminuer la glycémie en inhibant la libération de glucose dans le sang par les cellules hépatiques, en activant le prélèvement de glucose par les cellules musculaire et sa mise en réserve en glycogène. Elle favorise aussi la formation de matière grasse par le tissu adipeux, et la respiration cellulaire par les cellules.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

13 Fermentation

Énoncé
p. 452

Lycée Teilhard de Chardin, Saint Maur des Fossés

MÉTHODE

On vous demande de conseiller des futurs professeurs d'éducation physique et sportive. Il faut donc faire attention à bien décrire les processus biologiques en intégrant systématiquement les performances sportives correspondantes.

Deux types de fibres musculaires existent dans les muscles. Dans les deux cas, comme présenté par le document C, la contraction de ces cellules est liée au glissement de molécules d'actine le long de filaments de myosines. Ces deux molécules appartiennent à une unité appelée le sarcomère, qui diminue donc de taille lors d'une contraction. Ceci nécessite de l'énergie, sous forme d'ATP, une molécule qui en libère de l'énergie lors de son hydrolyse.

D'après le document A, le premier type de fibres est rouge, probablement dû à la présence de myoglobine, une protéine permettant la fixation du dioxygène. Ces fibres présentent une forte irrigation et la présence de nombreuses mitochondries, ce qui est lié à un métabolisme dépendant du dioxygène *via* la respiration, en plus de l'utilisation d'acides gras, fournissant une grande quantité d'énergie sous forme d'ATP. Ceci est validé par le document B. Les fibres 1 dépendent donc du sang pour l'apport de glucose (ne possédant que peu de glycogène) et de dioxygène. En termes d'efforts physique, les fibres 1 ont une faible vitesse de contraction, mais sont résistantes à la fatigue. Les fibres 1 sont donc spécialisées dans les efforts longs, au cours desquels une production d'énergie continue est nécessaire, notamment *via* la respiration.

Au contraire, le deuxième type de fibres possède peu de myoglobine, de mitochondries, de lipides et est peu irrigué. Ces cellules ne dépendent donc probablement que peu de la respiration cellulaire. Au contraire, d'après le document B, les fibres de type 2 effectuent la fermentation lactique. La source d'énergie de ces cellules est donc l'ATP formé lors de la glycolyse, probablement initiée par la dégradation de glycogène en glucose. Ces fibres sont ainsi peu résistantes à la fatigue, mais elles ont toutefois une vitesse de contraction importante. Les fibres de type 2 sont donc spécialisées dans les efforts courts et intenses.

14 Diabète - Causes - Conséquences

Énoncé
p. 454

Lycée Lacordaire, Marseille

On souhaite comprendre l'origine et les conséquences des diabètes 1 et 2.

Selon le document 1, chez un sujet sain, l'ingestion de glucose conduit à une augmentation de l'insulinémie rapide (passage de 7 à plus de $50\mu\text{U.mL}^{-1}$).

PRODUIRE LE MOUVEMENT • CHAP. 13

Ceci n'est pas le cas pour un sujet diabétique de type 1, chez qui l'insulinémie reste faible. Aucun contrôle permettant la diminution de la glycémie n'est donc possible ici, ce qui est la conséquence d'une destruction des cellules β de Langerhans.

D'après le document 2, chez un sujet atteint de diabète de type 2, de l'insuline est produite, en plus faible quantité mais présente plus longtemps que chez le contrôle sain. Néanmoins, la glycémie du patient est de base deux fois plus élevée que le contrôle, et elle subit une augmentation plus forte et plus longue après ingestion de glucose.

Selon la deuxième partie du document, le glucose ingéré est davantage présent chez le patient que chez le contrôle surtout une heure après ingestion. Ceci est accompagné d'une plus forte quantité de glucose d'origine hépatique chez les malades.

Ainsi, chez les patients de type 2, de l'insuline est produite mais ne semble pas être capable de réguler la glycémie en activant le prélèvement du glucose sanguin par les cellules, et la diminution de la libération de glucose dans le sang par les cellules du foie.

Comme le montre le tableau, les deux diabètes sont associés à des symptômes assez graves au niveau des vaisseaux sanguins du cœur, des rétines ou des reins, une hypertension artérielle et des complications nerveuses. Le témoignage indique que les symptômes sont si graves qu'une double transplantation rein/pancréas est une approche thérapeutique possible pour certains patients.

15 Diabète - type 2

Lycée Charlemagne, Paris

Énoncé
p. 456

MÉTHODE

Ces graphiques présentent une méthode d'analyse particulière : ils sont en trois dimensions. Chaque point correspond au relevé de la glycémie en fonction de l'insulinémie. La donnée temporelle est lue par le tracé. On sait que la durée totale du suivi est de 12 ans. Grâce aux flèches, on peut diviser les 12 ans en 3 parties de 4 ans pour le premier graphique, et en 4 parties de 3 ans pour le second.

On étudie le suivi de l'insulinémie et de la glycémie d'un patient pendant 12 ans.

Le suivi de ces deux données à jeun et deux heures après le début d'un test d'hyperglycémie provoquée montrent tout d'abord une augmentation de la concentration en insuline pendant les six premières années (segment A-B) d'un facteur d'environ 2,5 sans grande variation de la glycémie. Ceci laisse donc présager que l'insuline agit de moins en moins, et que de plus en plus d'insuline est nécessaire pour maintenir la glycémie.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Puis, la croissance de la concentration en insuline s'estompe, alors que la glycémie augmente d'un facteur 1,5 à jeun et de 30% après le début d'un test d'hyperglycémie provoquée, entre les années 6 et 9 (segment B-C). Ainsi, le système semble s'essouffler, et la déficience en insuline commence.

Le système s'emballe pendant les dernières années (segment C-D), avec une insuline qui diminue presque de moitié à jeun et de près de 70% après le début d'un test d'hyperglycémie provoquée, alors que la glycémie a augmenté de 25 à 30%.

Ainsi, la phase sévère est déjà enclenchée dans le dernier segment. L'évolution vers un phénotype diabétique sévère a donc lieu pendant les années 6 à 9 (segment B-C) au cours desquelles l'insuline est de moins en moins produite et efficace.

16 Production d'ATP - Respiration

→ Énoncé
p. 457

Lycée Balzac, Caen

- 1 La faible diminution d'O₂ après l'ajout des mitochondries est liée à une faible respiration réalisée par ces organites. Toutefois, ne possédant pas les substrats nécessaires pour davantage de respiration, la diminution du taux de dioxygène est brève.
L'augmentation du taux d'O₂ après ajout du succinate est probablement due à l'injection par elle-même : la solution contenait probablement de l'O₂, conduisant à cette augmentation qui est un artefact.
- 2 L'ajout de succinate puis d'ADP conduit à une diminution de la concentration en O₂. D'après l'énoncé, le succinate est un intermédiaire des décarboxylations oxydatives de la matrice, c'est-à-dire du cycle de Krebs. Ce dernier permet la régénération du NADH, H⁺, nécessaire au fonctionnement de la chaîne respiratoire. L'utilisation du succinate dans le cycle de Krebs est donc couplée à la production d'ATP par la chaîne respiratoire.
- 3 L'ensemble des informations nous permet de comprendre les relations fonctionnelles entre le succinate, l'ADP et la consommation de l'O₂.

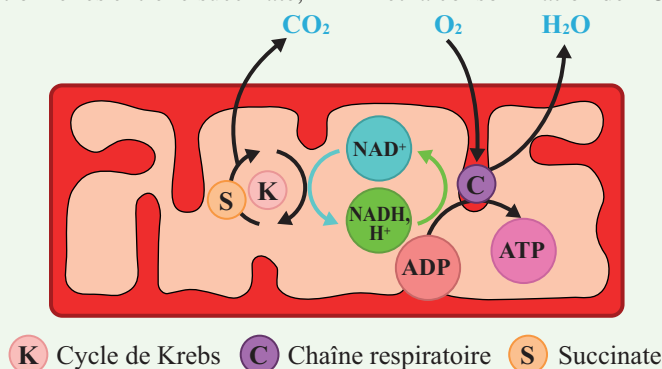


Figure 13.36 – Relations fonctionnelles entre le succinate, l'ADP et la consommation de O₂

Comportements et stress

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Les différents types de stress
3. L'adaptabilité de l'organisme face à un agent stressueur
4. L'organisme débordé dans ses capacités d'adaptation

1 Introduction

Dans notre vie courante, de nombreuses situations peuvent être source de stress : on sent son cœur s'emballer, on a des sueurs froides, la bouche sèche. *Les agents stressueurs* sont perçus par l'organisme, qui est capable d'amener une réponse pour y réagir de manière rapide et appropriée et ainsi maintenir *l'homéostasie*, c'est-à-dire l'équilibre interne.

? PROBLÉMATIQUE

Comment l'organisme s'adapte-t-il face aux perturbations de l'environnement ?

2 Les différents types de stress

Définition 1 : stress biologique

Ensemble de manifestations adaptatives qui s'opèrent en réponse à la perception d'un agent stressueur.

Définition 2 : agent stressueur

Perturbation de l'environnement qui conduit à un stress biologique.

Le stress biologique fait intervenir les systèmes nerveux, endocrinien (c'est-à-dire hormonal) et immunitaire. Suite à un retour aux conditions normales de l'environnement, l'organisme est capable de revenir à son fonctionnement initial.

Définition 3 : résilience

Capacité pour une espèce, un organisme ou une cellule de retrouver une activité naturelle suite à une perturbation.

Le stress biologique est alors qualifié de *stress aigu* de par sa courte durée.

Dans le cas où la perturbation se maintient, l'organisme entre en état de *stress chronique*. Ceci peut engendrer des modifications structurales et fonctionnelles du cerveau à long terme pouvant nécessiter la prise de médicaments.

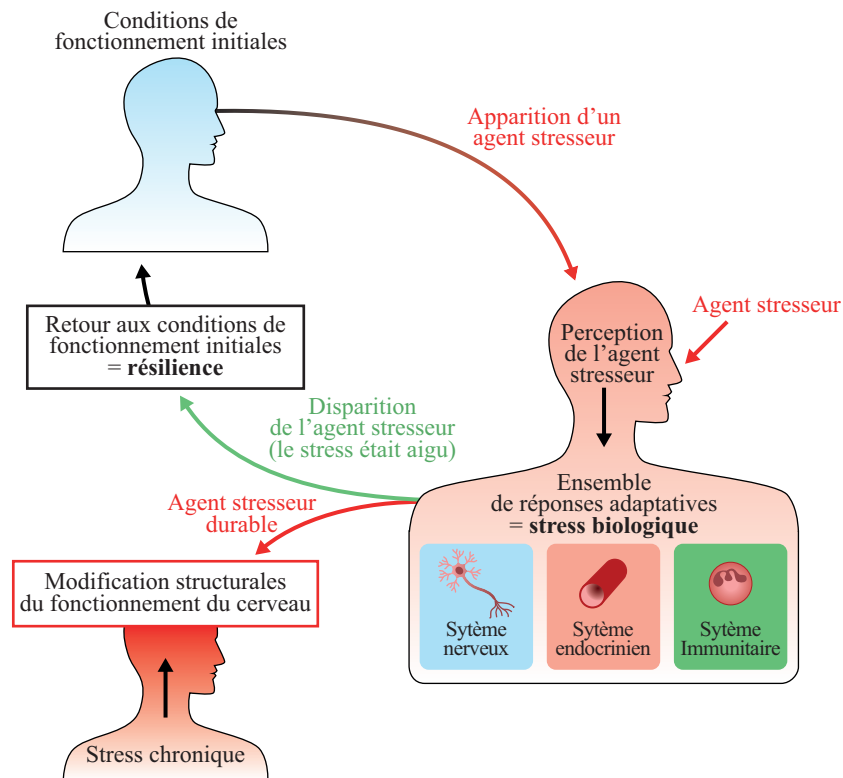


Figure 14.1 – Stress aigu, stress chronique et leurs conséquences sur l'organisme humain

3 L'adaptabilité de l'organisme face à un agent stressueur

PROBLÉMATIQUE

Comment les systèmes nerveux, endocrinien et immunitaire interagissent-ils lors d'un stress aigu ?

Deux principales voies sont activées lors de la perception d'un agent stresser. La première permet une réponse rapide grâce à la libération d'adrénaline ; la seconde est à plus long terme suite à l'action du cortisol.

3.1 La libération d'adrénaline, une réponse quasiment immédiate

Suite à la perception d'un agent stresser, une zone du cerveau impliquée dans les émotions est stimulée : l'amygdale qui appartient au système limbique. L'activation de telles zones entraîne la transmission d'un message nerveux, à travers un nerf sympathique, jusqu'aux glandes surrénales (c'est-à-dire situées au-dessus des reins). Ces glandes appartiennent au système endocrinien : elles libèrent des hormones dans la circulation sanguine indispensables au bon fonctionnement de l'organisme comme l'adrénaline et le cortisol. Les glandes surrénales sont composées d'une partie médullaire et d'une partie corticale.

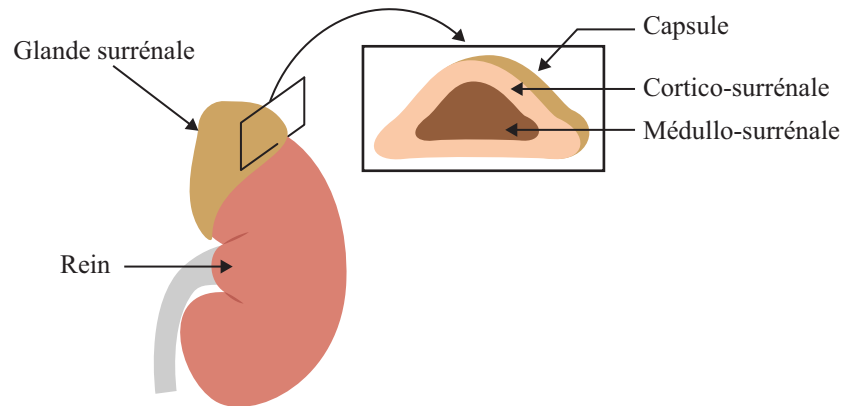


Figure 14.2 – Organisation des glandes surrénales

La partie médullo-surrénale sécrète de l'adrénaline, hormone pouvant agir sur différentes cellules cibles. Elle prépare le corps à réagir rapidement et participe notamment à l'augmentation du rythme cardiaque et de la fréquence respiratoire, ainsi qu'à la libération de glucose dans le sang par le foie. Ainsi, des nutriments (dioxygène, glucose) peuvent être acheminés rapidement au niveau des cellules de l'organisme et particulièrement des cellules musculaires, ce qui permet leur fonctionnement efficace en cas de besoin.

Ainsi, pour réagir à court terme au stress, le corps mobilise une voie nerveuse et endocrinienne. Cette phase constitue la *phase d'alarme*.

Voir schéma page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

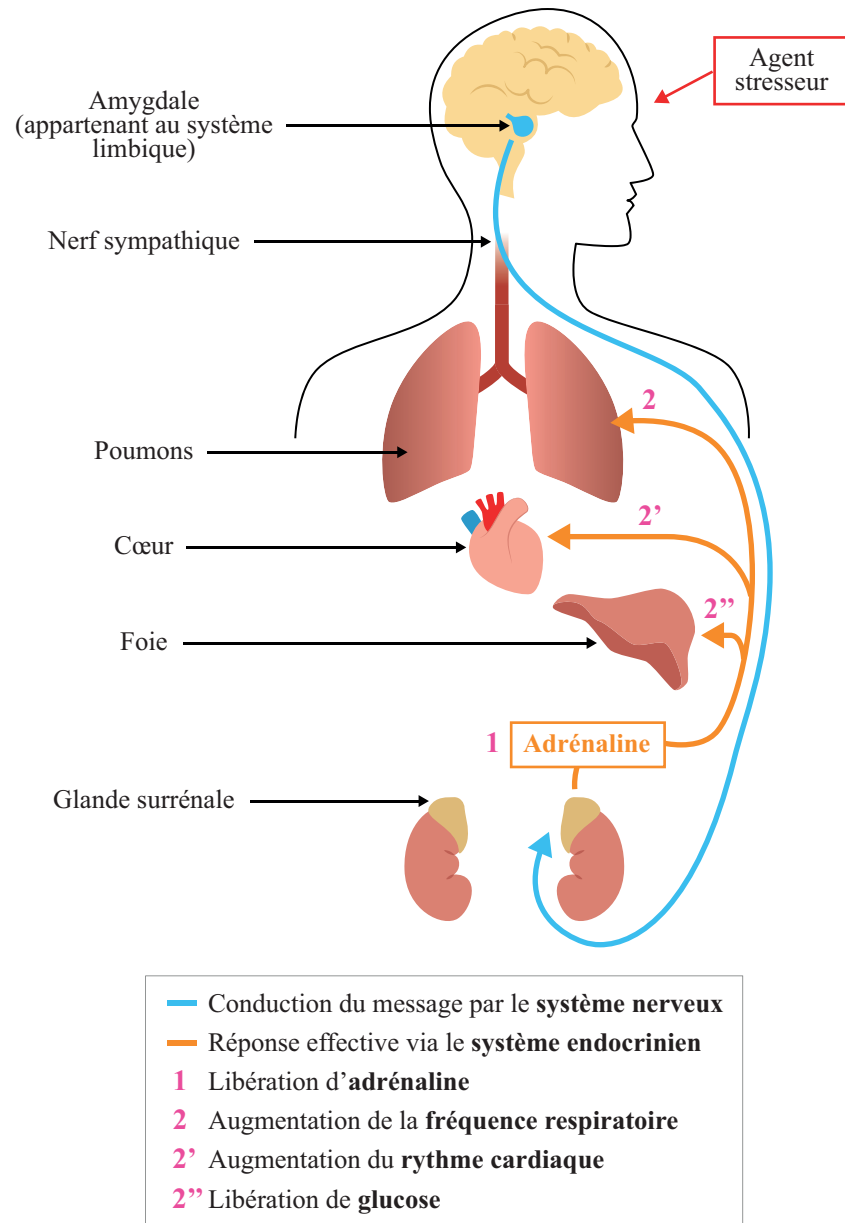


Figure 14.3 – De la libération d'adrénaline à la préparation de l'organisme à l'action lors d'un stress aigu

COMPORTEMENTS ET STRESS • CHAP. 14

3.2 La libération de cortisol, une réponse à plus long terme

Lors de la perception d'un agent stresseur, le système limbique n'est pas la seule zone stimulée. Le *complexe hypothalamo-hypophysaire* (jouant entre autres un rôle dans le fonctionnement des appareils reproducteurs) est également sollicité. Suite à une stimulation, l'hypothalamus libère une neurohormone qui agit sur l'hypophyse : la CRH (Corticotropin Releasing Hormon). L'hypophyse libère alors dans le sang de l'ACTH (Adreno CorticoTropic Hormon) dont les cellules cibles sont les cellules des glandes surrénales (partie cortico-surrénale). Cette stimulation se traduit par une libération de *cortisol* dans le sang, qui a trois rôles :

- il stimule la production d'adrénaline et de glucose, préparant le corps à réagir ;
- il inhibe la prise alimentaire, la croissance ou encore le système immunitaire, afin de mobiliser l'énergie disponible sur le stress biologique ;
- il inhibe la production d'ACTH par l'hypophyse, permettant de limiter la libération de cette hormone (pour éviter une réponse trop intense, ce qui serait néfaste pour l'organisme). Cette action constitue un *rétrocontrôle négatif* et favorise le rétablissement de conditions de fonctionnement durable (phase de *résilience*) : voir figure 14.4 page suivante.

Définition 4 : rétrocontrôle négatif

Rétroaction dans laquelle l'augmentation de la valeur de la variable à réguler est compensée par une inhibition de la structure responsable de sa libération afin de stabiliser le système.

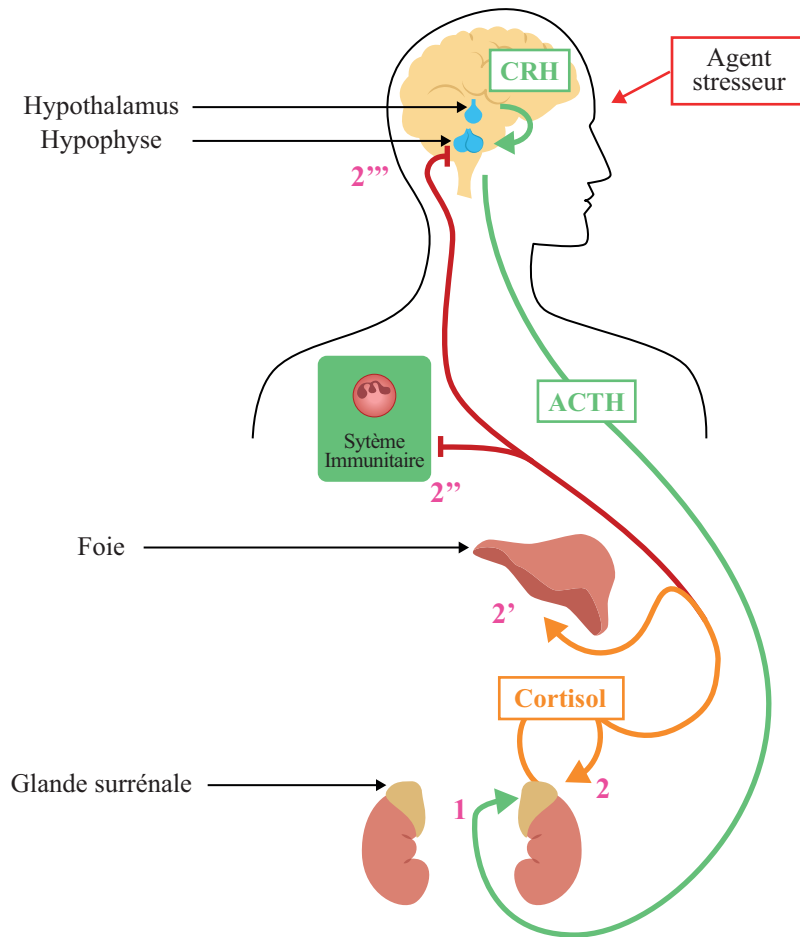
À RETENIR

La perception d'un agent stresseur stimule l'activation de deux voies faisant intervenir l'adrénaline et le cortisol. La première, activée par le système limbique, permet à l'organisme d'être prêt à agir à cause de la mobilisation de glucose et des augmentations du rythme respiratoire et de la fréquence cardiaque. La seconde, mise en place par l'axe hypothalamo-hypophysaire, engendre une réponse à plus long terme en focalisant l'organisme sur le stress biologique grâce à une inhibition de certaines grandes fonctions comme la prise alimentaire ou le système immunitaire.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



- Conduction du message par le **système endocrinien**
- Conduction d'un message activateur par le **système endocrinien**
- Conduction d'un message inhibiteur par le **système endocrinien**
- 1** Libération de **cortisol**
- 2** Stimulation de la production d'**adrénaline**
- 2'** Libération de **glucose**
- 2''** **Inhibition** du système immunitaire
- 2'''** **Rétro-contrôle négatif** sur l'hypophyse

Figure 14.4 – Libération et rôles du cortisol lors d'un stress biologique

COMPORTEMENTS ET STRESS • CHAP. 14

4 L'organisme débordé dans ses capacités d'adaptation

Les boucles de régulation vues précédemment se réalisent à court terme. Cependant, dans certains cas, les agents stressseurs restent présents à long terme.

? PROBLÉMATIQUE

Quelles conséquences engendrent des agents stressseurs sur le long terme ?

4.1 Conséquences fonctionnelles et structurales d'un stress chronique

Dans le cas où l'agent stressseur est trop intense ou reste présent à long terme, l'organisme, constamment mis sous pression, est débordé. On parle alors de *stress chronique*. Les boucles de régulation vues précédemment sont continuellement actives, interdisant toute résilience. Des modifications structurales du cerveau peuvent se produire comme au niveau du système limbique ou du cortex pré-frontal, qui est impliqué dans diverses fonctions cognitives telles que le langage, le travail ou encore le raisonnement. Ceci entraîne des troubles de l'attention, de la mémoire ou des compétences cognitives de l'individu. Il est à noter que chaque individu répond différemment aux agents stressseurs en fonction de divers facteurs, aussi bien psychologiques, génétiques que sociaux ou émotionnels. Afin d'éviter ces effets néfastes pour l'organisme, il est possible de favoriser la résilience.

Voir exercices 7 et 8.

4.2 Aider l'organisme à rétablir sa résilience

Deux stratégies sont possibles pour accroître la résilience. Tout d'abord, des pratiques simples peuvent s'avérer utiles pour mieux gérer son stress, comme prioriser son sommeil, réaliser des exercices de respiration ou de détente musculaire.

De plus, dans certains cas graves et sous prescription médicale, la prise de médicaments est possible. Par exemple, les *benzodiazépines* sont des anxiolytiques, c'est-à-dire soulageant l'anxiété, et myorelaxants, par définition réduisant le tonus musculaire. Pour ce faire, ces derniers facilitent l'action du GABA (Acide Gamma-AminoButyrique), un neurotransmetteur inhibiteur du système nerveux. Le système nerveux jouant un rôle central dans le stress biologique, les benzodiazépines permettent ainsi de diminuer les libérations d'adrénaline et de cortisol, favorisant la résilience. Toutefois, leur utilisation est rigoureusement contrôlée car leur usage à long terme provoque une dépendance et une accoutumance.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Définition 5 : accoutumance

Habituation du corps à un traitement, nécessitant une augmentation des doses pour maintenir son effet.

De plus, les benzodiazépines peuvent générer des effets secondaires, comme la survenue de troubles de l'attention.

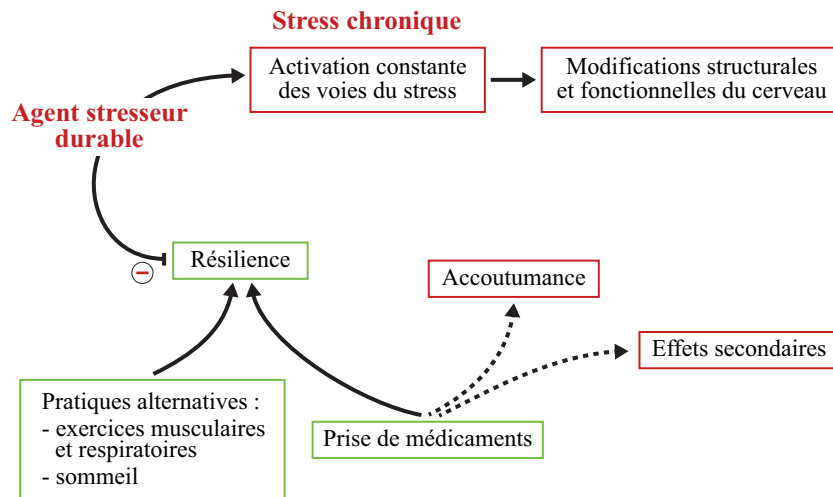


Figure 14.5 – Le stress chronique et sa gestion

Voir exercices 4, 5 et 6.

À RETENIR

Un agent stressant intense ou prolongé engendre un stress chronique : l'organisme est débordé et les voies d'activation mises en place persistent dans le temps. Des troubles de l'attention ou de la mémoire peuvent alors survenir, en raison de modifications structurales au niveau du système limbique et du cortex préfrontal. Il existe des moyens permettant de faciliter la résilience. Des exercices de gestion du stress peuvent être utilisés. De plus, il est possible d'avoir recours à la prise de benzodiazépines, qui limitent l'activation du système nerveux. Toutefois, il faut garder à l'esprit que ces médicaments présentent des effets secondaires comme des troubles de l'attention, une dépendance et une accoutumance.

COMPORTEMENTS ET STRESS • CHAP. 14

1 QCM Vérification de connaissances

5 min

Corrigé
p. 483

Pour chacune des questions suivantes, plusieurs propositions de réponses sont faites dont une seule est correcte. Laquelle ?

- 1 Un agent stressor est :
 - a une modification de l'environnement engendrant un stress biologique ;
 - b la réponse de l'organisme causée par un stress biologique ;
 - c l'adrénaline, qui permet au stress biologique d'avoir lieu.
- 2 Le cortisol joue un rôle important dans le stress biologique parce que :
 - a il permet l'activation du système limbique et régule donc les émotions ;
 - b sa libération dans le sang engendre des effets au niveau de divers organes, préparant l'organisme à réagir rapidement et lui permettant de se focaliser sur le stress ;
 - c il permet la libération de glucose par les glandes surrénales, ce qui permet d'apporter efficacement des nutriments aux muscles.

2 V/F Vérification des connaissances

5 min

Corrigé
p. 483

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les :

- 1 L'augmentation de la fréquence cardiaque :
 - a permet d'optimiser l'acheminement des nutriments au niveau des cellules, et notamment des cellules musculaires ;
 - b est permise par la libération d'adrénaline ;
 - c est directement liée à l'activation du système limbique ;
 - d permet la libération de glucose dans le sang.
- 2 Les glandes surrénales :
 - a sont à l'origine d'une activation du système nerveux, suite à leur activation par le système endocrinien ;
 - b sont localisées à proximité des reins ;
 - c libèrent de l'adrénaline et du glucose dans le sang ;
 - d libèrent de l'adrénaline et du cortisol dans le sang.

3 Vérification des connaissances



5 min

Corrigé
p. 483

Qui suis-je ?

- 1 Action par laquelle une molécule, une hormone par exemple, inhibe le fonctionnement de la glande qui l'a produite, empêchant un emballement du système.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 2 Capacité de l'organisme à revenir à son mode de fonctionnement initial, après la survenue d'un stress biologique par exemple.
- 3 Molécule synthétisée par un neurone, libérée dans le sang et agissant à distance sur des cellules cibles.

4 Benzodiazépines



15 min

Corrigé
p. 483

Nouveau programme

L'Agence Nationale de sécurité du médicament (ANSM) a dressé le tableau de la consommation en France des benzodiazépines, médicaments prescrits contre l'anxiété ou les troubles du sommeil.

« Mais la consommation reste forte. Car près de 13,4% de la population française a été au moins une fois en contact avec une benzodiazépine en 2015. Dans 82% des cas, c'est un médecin généraliste qui initie le traitement. Et 15% des nouveaux utilisateurs n'ont pas respecté la durée des recommandations, parmi lesquels environ 2% de plus d'un an. (...) »

Le rapport pointe également le problème posé par ces molécules à haut risque de dépendance et d'effets secondaires (...) environ 23% des effets indésirables graves déclarés avec les benzodiazépines sont des affections du système nerveux (sommolence, comas, convulsions voire, plus rarement, amnésies). Outre le risque de dépendance physique et psychique, il faut avoir en mémoire que la consommation de benzodiazépines multiplie également par 8 le risque d'accidents de la route. »

Source : Science et Avenir, 04-2017.

À partir des données de ce document concernant les risques de la prise de benzodiazépines et la consommation de la population Française, proposez un slogan publicitaire visant à faire prendre à la communauté Française les risques de la prise des benzodiazépines.

5 Benzodiazépines



15 min

Corrigé
p. 484

Nouveau programme

En utilisant des méthodes d'imageries appelées tomographie par émission de positons, il est possible d'observer des zones de fixation de neurotransmetteurs à leurs récepteurs au sein des cerveaux de différents individus. L'expérience a été menée pour un sujet contrôle, un sujet soumis à un stress chronique, et à un sujet soumis à un stress chronique et traité avec des benzodiazépines. Le signal rend compte de la fixation de molécules de GABA à leurs récepteurs.

COMPORTEMENTS ET STRESS • CHAP. 14

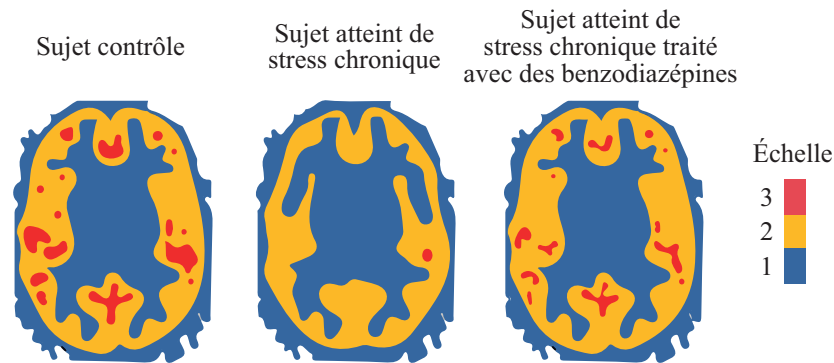


Figure 14.6 – Images de tomographie par émission de positons mettant en évidence la fixation de molécules de GABA à leurs récepteurs chez un sujet contrôle, un sujet soumis au stress chronique et un sujet soumis au stress chronique et traité avec des benzodiazépines. La force du signal est proportionnelle à la quantité de molécules de GABA fixées (« 1 » étant le signal minimum, et « 3 », le maximum)

À partir de l'analyse du document et de vos connaissances sur le GABA, expliquez son action dans la gestion du stress biologique.

6 À vous les chercheurs !



15 min

Corrigé
p. 485

Nouveau programme

Mettez-vous à la place d'un chercheur étudiant le stress. Écrivez un protocole d'étude de l'effet de deux techniques alternatives visant à réduire le stress chez des étudiants en période d'examens.

Vous pourrez choisir d'étudier l'effet d'une pratique sportive hebdomadaire et d'écoute de musique relaxante une demi heure par soir. Votre analyse sera basée sur l'étude d'individus en période d'examens, répartis en différents groupes (il faut penser à inclure un groupe contrôle que vous définirez). Enfin, il est nécessaire de mesurer le stress, possiblement grâce à un système de notation que vous décrirez (chaque individu notant quotidiennement son propre stress).

7 Organismes modèles



25 min

Corrigé
p. 485

Nouveau programme

Les tilapias sont des poissons qui ressemblent à des carpes, originaires d'Afrique, du Proche Orient et du Moyen Orient. Pouvant mesurer entre 5 et 50 cm, les tilapias ont été domestiqués par l'être humain, à visée alimentaire dans un premier temps, puis en aquariophilie ensuite.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Leur cycle d'élevage est donc aujourd'hui relativement bien connu, et leurs grandes capacités de reproduction en font une espèce invasive dans différentes régions comme aux États-Unis.

La réponse au stress des tilapias a été étudiée en laboratoire. Au cours d'une première expérience, des tilapias ont été soumis à un stress de confinement de deux heures et les taux de cortisol et de glucose sanguins ont ensuite été quantifiés.

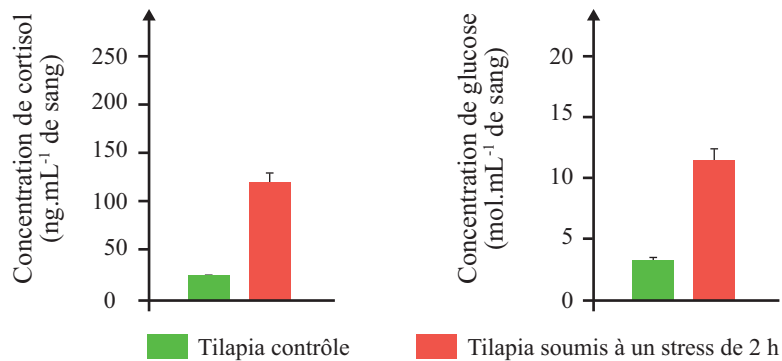


Figure 14.7 – Taux de cortisol et de glucose sanguins pour des tilapias soumis, ou non, à un stress de deux heures

Dans un second temps des tilapias ont subi à un stress court en étant sortis temporairement de l'eau. La présence de cortisol dans leur corps a ensuite été suivie pendant une heure.

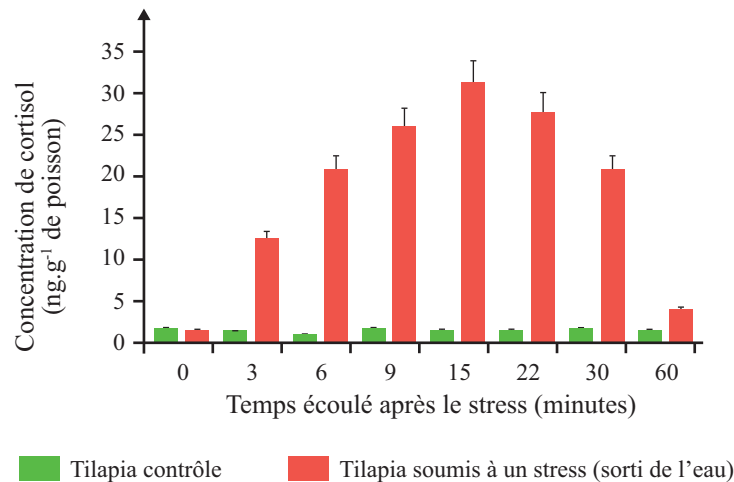


Figure 14.8 – Suivi du taux de cortisol de tilapias subissant ou non à un stress court

COMPORTEMENTS ET STRESS • CHAP. 14

Enfin, des tilapias ont subi un stress long de 7, 14 ou 21 jours (aquarium mis en mouvement). Le taux de cortisol sanguin a été une fois de plus quantifié.

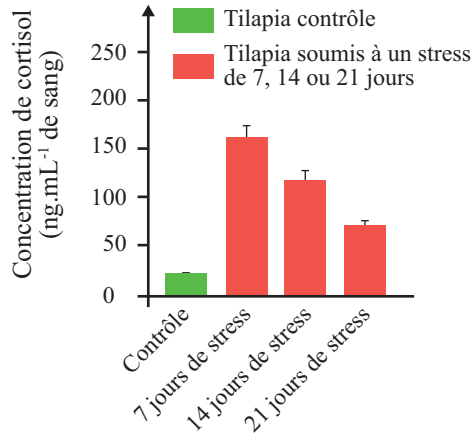


Figure 14.9 – Suivi du taux de cortisol de tilapias soumis à des agents stressseurs longs

À partir des différents documents et de vos connaissances, expliquez en quoi les tilapias se révèlent être des organismes modèles pertinents dans l'étude de la réponse physiologique face au stress.

8 Stress et cheveux blancs



25 min

Corrigé
p. 486

Nouveau programme



Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

« Se faire des cheveux blancs » est une expression bien connue qui implique qu'une personne inquiète aura plus de chance d'avoir des cheveux blancs. Dans la revue *Nature*, des chercheurs viennent de montrer le lien entre stress et cheveux blancs.

Dans chaque expérience présentée, les souris sont stressées chroniquement par confinement. Dans une première expérience, pour chaque souris, le pourcentage de surface de peau présentant des poils blancs est calculé, et le nombre de mélanocytes (cellules responsables de la couleur du poil) est étudié.

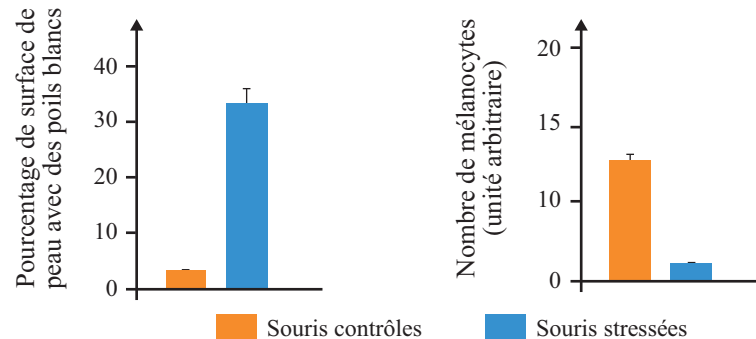


Figure 14.10 – Surface présentant des poils blancs et nombre de mélanocytes dans la peau de souris stressées ou non

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

Afin d'étudier plus en détail ce mécanisme, les chercheurs ont ensuite quantifié la concentration sanguine de noradrénaline, une molécule qui, comme l'adrénaline, joue un rôle dans le stress. Ils ont également quantifié le pourcentage de surface de peau présentant des poils blancs chez des souris stressées, mutantes pour le gène de la noradrénaline, n'exprimant donc pas cette molécule.

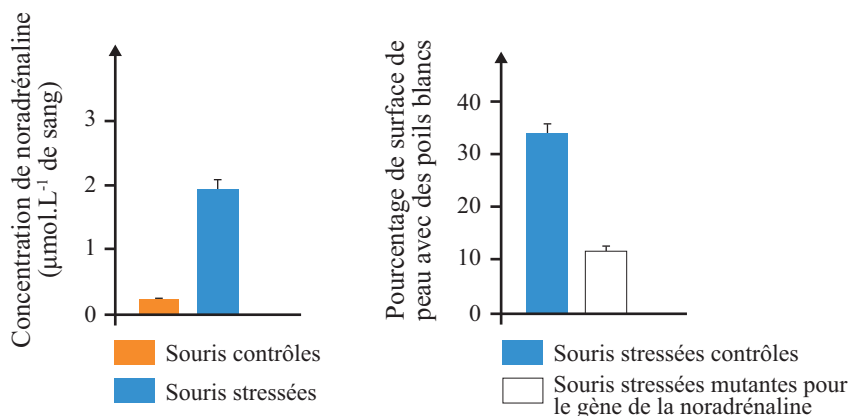


Figure 14.11 – Résultats de l'expérience

La noradrénaline peut être synthétisée à partir des glandes surrénales. Elle peut également être libérée au niveau des synapses de certains neurones en tant que neurotransmetteur. Des souris ayant subi une ablation des glandes surrénales et des souris mutantes ne présentant pas de neurones fonctionnels innervant les zones de poussées des poils ont été soumises au même stress, et une fois de plus, la survenue de poils blancs est étudiée.

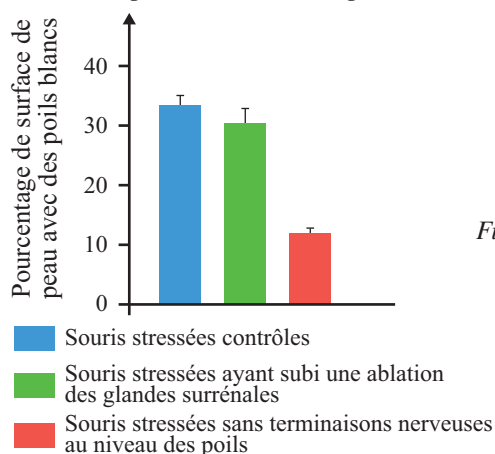


Figure 14.12 – Résultats de l'expérience

À partir de l'analyse des différents documents, émettez une hypothèse sur le rôle de la noradrénaline dans l'apparition de cheveux blancs dans le cadre d'un stress chronique.

COMPORTEMENTS ET STRESS • CHAP. 14

1 QCM Vérification de connaissances

Énoncé
p. 477

- 1 Réponse **a**.
- 2 Réponse **b**.

2 V/F Vérification des connaissances

Énoncé
p. 477

- 1 Affirmations inexacts : **c** et **d**.
c : suite à l'activation du système limbique, il doit y avoir libération d'adrénaline par les glandes surrénales pour augmenter la fréquence cardiaque. L'augmentation de la fréquence cardiaque est donc indirectement liée à l'activation du système limbique.
d : l'adrénaline permet d'augmenter la libération de glucose dans le sang par les cellules du foie. L'augmentation de la fréquence cardiaque, quant à elle, permet un transport de glucose plus efficace jusqu'au niveau des cellules.
- 2 Affirmations inexacts : **a** et **c**.
a : les glandes surrénales font certes, le lien entre système nerveux et système endocrinien, mais c'est dû au fait que suite à leur activation par le système nerveux, elles libèrent des hormones dans le sang.
c : les glandes surrénales libèrent de l'adrénaline et du cortisol, et non du glucose. Toutefois, ces deux hormones permettent la libération de glucose dans le sang par les cellules du foie.

3 Vérification des connaissances

Énoncé
p. 477

- 1 Le rétrocontrôle négatif.
- 2 La capacité de résilience.
- 3 Une neuro-hormone.

4 Benzodiazépines

Énoncé
p. 478

Nouveau programme

⚠ ATTENTION

Bien que le but de l'exercice soit l'écriture d'un slogan publicitaire, il faut préalablement analyser les données de l'article pour répondre au mieux à la consigne.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Dans un premier temps, on souhaite comprendre les effets secondaires de la prise de benzodiazépines. Le document décrit des risques de dépendance physique et psychique. De plus, selon l'article, un peu moins d'un quart des effets secondaires graves sont des atteintes du système nerveux (sommolence, convulsions, voire même des risques de comas et d'amnésie). Ces atteintes sont à mettre en relation avec un risque d'accidents de la route multiplié par huit lors de la prise de ces médicaments.

L'article nous apprend également que la consommation des benzodiazépines est importante en France puisqu'en 2015, plus d'une personne sur dix a été en contact avec ce médicament. L'article fait également part de comportements à risques. En effet, une part non négligeable des nouveaux utilisateurs (15%) n'ont pas respecté les durées proposées de traitement, dont 2% allant jusqu'à plus d'un an après l'arrêt programmé du traitement.

La prise de benzodiazépines n'est donc pas sans effets secondaires, elle doit être rigoureusement régulée.

Un slogan pourrait ainsi être : « les benzodiazépines, du pied, ça peut me retirer une épine, mais les ordres de mon docteur, je dois respecter sans peur ».

5 Benzodiazépines

Énoncé
p. 478

Nouveau programme

Le GABA est un neurotransmetteur inhibiteur agissant au sein du cerveau. Il joue donc un rôle important dans la réduction de l'hyperactivité neuronale associée au stress.

Chez le sujet contrôle, on remarque de nombreuses zones du cerveau présentant un signal important (signal de 3), mettant donc en évidence des zones où une forte proportion de molécules de GABA se fixent à leur récepteur.

Toutefois, chez l'individu en état de stress chronique, on remarque une quasi absence de zones de fort signal, au profit de signaux intermédiaires ou faibles (signaux de 2 ou 1). Chez cet individu, on a donc une plus faible quantité de molécules de GABA fixées à leurs récepteurs. On peut donc émettre l'hypothèse que chez une personne chroniquement stressée, on a moins de signaux inhibiteurs, et donc une hyperactivité neuronale.

Enfin, chez le sujet chroniquement stressé et traité avec des benzodiazépines, on remarque une réapparition partielle des zones de fort signal, et donc de fixation du GABA à son récepteur. On peut ainsi supposer que les benzodiazépines aident les molécules de GABA à se fixer à leur récepteur, réduisant l'hyperactivité neuronale, et donc le stress chronique.

COMPORTEMENTS ET STRESS • CHAP. 14

6 À vous les chercheurs !

Énoncé
p. 479

Nouveau programme

Lors de l'écriture d'un protocole, plusieurs points majeurs sont à définir, en commençant les différents groupes. On a deux groupes tests, le premier montrant l'effet d'une pratique sportive hebdomadaire, et la seconde, d'une écoute de musique relaxante quotidienne. Il faut également ajouter un groupe contrôle, avec des individus en période d'examens, mais ne réalisant aucune des deux activités d'intérêt.

Il faut ensuite pouvoir quantifier le stress chez ces individus, afin de pouvoir comparer les différents groupes. Il est possible par exemple d'avoir recours à un système de notation. Une possibilité serait que chaque individu donne un score sur 5 par jour, 0 étant une absence de ressenti de stress, et 5, la note maximale, soit un stress intense. Ce système a deux avantages : tout d'abord il n'est pas invasif pour les individus, et il permet un suivi du stress au cours du temps, pendant la période de test déterminée.

7 Organismes modèles

Énoncé
p. 479

Nouveau programme

MÉTHODE

Un organisme modèle est une espèce étudiée en laboratoire afin de tenter de comprendre un processus particulier, en supposant que ce processus est également présent chez d'autres organismes d'intérêt comme l'être humain. Il faut donc donner les arguments qui montrent que :

- les tilapias ont une réponse au stress similaire à celle de l'être humain ;
- ces poissons présentent des avantages quant à leur élevage en laboratoire.

Le tilapia présente de nombreux avantages pour son étude en laboratoire. Tout d'abord, leur grande taille (entre 5 et 50 centimètres) se prête assez bien à leur étude. De plus, étant domestiqués depuis longtemps par l'être humain, leur cycle d'élevage est bien documenté, ce qui facilite ainsi leur utilisation. Enfin, ils semblent être capables de se reproduire rapidement et en grands nombres, rendant plus efficace leur élevage en laboratoire.

Des tilapias stressés deux heures par confinement présentent des taux élevés de cortisol et de glucose sanguins (125 ng.mL^{-1} de cortisol contre 25 pour le contrôle, et 12 mol.L^{-1} de glucose contre 4 pour le contrôle). On notera que dans les deux cas, les barres d'erreurs ne se recoupent pas, supposant des différences significatives entre les tilapias contrôles et les stressés. Ceci montre donc que, suite au stress de confinement, les tilapias répondent en libérant du cortisol et du glucose dans le sang. Cette libération peut être interprétée comme une réponse physiologique à un stress biologique, ce qui semble appuyer le choix d'utiliser le tilapia comme organisme modèle.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Suite à un stress court (sortie de l'eau), des tilapias présentent une forte augmentation de la présence de cortisol au court du temps, entre 0 et 15 minutes (passage de 3 ng de cortisol par gramme de masse de poisson à plus de 30 ng). Le cortisol aurait donc été synthétisé pendant ce laps de temps, en réponse à la sortie de l'eau. La concentration de cortisol diminue ensuite jusqu'à atteindre 5 ng de cortisol par gramme de poisson au bout d'une heure. On peut donc supposer que la réponse diminue d'intensité et a quasiment totalement disparue au bout d'une heure. Chez le poisson contrôle, la concentration en cortisol reste constante, ce qui était attendu. Ainsi, le tilapia présente une réponse rapide à sa sortie de l'eau, ce qui est associé à un stress aigu. La réponse totale semble durer une heure (15 minutes pour atteindre son paroxysme). La présence d'un stress aigu, comme chez l'être humain, et la rapidité de la réponse sont donc deux grands avantages à son étude en laboratoire.

Enfin, des tilapias soumis à un stress long (aquarium mis en mouvement) de 7, 14 et 21 jours présentent un taux de cortisol sanguin élevés par rapport à des tilapias contrôles (respectivement 170, 120 et 70 ng.mL⁻¹ de sang, contre 25 pour le contrôle), ce qui était attendu d'après les documents précédents. On remarquera toutefois que plus le stress est long, moins la concentration en cortisol est importante (170 ng.mL⁻¹ de sang pour un stress de 7 jours contre 70 pour un stress de 21 jours, les barres d'erreurs ne se recoupant pas). On peut donc supposer que l'on aurait une réponse à long terme différente, avec un essoufflement du système. Cette réponse pourrait ainsi être associée à un stress chronique, en analogie avec ce qu'on a chez l'être humain.

Ainsi, le tilapia présente de nombreux avantages en tant qu'organisme modèle dans l'étude du stress. Tout d'abord, il peut s'élever relativement facilement en laboratoire (grande taille, cycle d'élevage connu et reproduction efficace). De plus, il présente des caractéristiques similaires au stress biologique qu'on retrouve chez l'être humain. Lors d'un stress, il est capable de synthétiser des hormones comme le cortisol et de libérer du glucose dans le sang. Ceci le prépare à la fuite. Enfin, il présente des réponses rapides associées à un stress aigu et à plus long terme, associées à un stress chronique.

8 Stress et cheveux blancs

→ Énoncé
p. 481

Nouveau programme



Dans cet exercice, nous souhaitons comprendre le rôle de la noradrénaline dans l'apparition des cheveux blancs dans le cadre d'un stress chronique.

Dans la première expérience, on observe que les souris stressées ont une présence importante de poils blancs avec 30% de surface de peau concernée, contre moins de 5% pour les souris contrôles (les barres d'erreurs ne se recoupant pas).

COMPORTEMENTS ET STRESS • CHAP. 14

Ceci est accompagné d'une diminution du nombre de mélanocytes, avec dix fois moins de mélanocytes pour les souris stressées que pour les souris contrôles. On peut émettre l'hypothèse qu'un stress chronique réduit les mélanocytes en tuant ces cellules, engendrant une perte de couleur des poils de souris.

Dans la seconde expérience, on remarque qu'un stress chronique est associé à une concentration sanguine de noradrénaline élevée (environ $2 \mu\text{mol.L}^{-1}$ de sang pour les souris stressées, contre moins de $0.25 \mu\text{mol.L}^{-1}$ pour les contrôles non stressées). On peut donc supposer qu'une souris stressée synthétise davantage de noradrénaline qui pourrait entraîner la mort des mélanocytes. Pour vérifier cette hypothèse, des souris mutantes n'exprimant pas la noradrénaline ont été également soumises au stress. La mutation est associée à une très faible proportion de surface de peau présentant des poils blancs (10% pour les souris mutantes stressées contre 35 pour les souris contrôles stressées), mettant en évidence le fait que, effectivement, la noradrénaline est impliquée dans l'apparition des poils blancs.

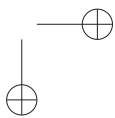
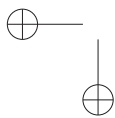
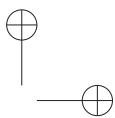
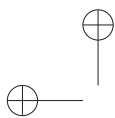
Dans une dernière expérience, on souhaite comprendre comment est synthétisée la noradrénaline. Pour ce faire, des souris ont subi une ablation des glandes surrénales. Après un stress de confinement, ces dernières présentent la même surface de peau avec des poils blancs que les souris contrôles stressées (environ 30%). On peut donc en déduire que l'ablation des glandes surrénales n'a pas empêché la survenue de poils blancs, et donc que la noradrénaline qui en est responsable n'est pas synthétisée dans ces glandes. Or, des souris mutantes ne présentant pas de neurones fonctionnels innervant les zones de poussée des poils et ayant subi un stress de confinement présentent une surface avec des poils blancs réduite par rapport aux souris contrôles (10% contre 30 pour les souris contrôles stressées). On peut donc en déduire que ces neurones sont nécessaires pour l'apparition des poils blancs, et on peut émettre l'hypothèse que c'est via la libération du neurotransmetteur noradrénaline.

Ainsi, on peut conclure qu'un stress entraînerait une surproduction de noradrénaline par les neurones localisés au niveau de la peau des souris, tuant les mélanocytes et entraînant la poussée de poils blancs. On peut émettre l'hypothèse qu'un mécanisme analogue se déroule chez l'être humain, faisant intervenir la noradrénaline libérée par les neurones innervant les cheveux.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre 15

Baccalauréat blanc

1 Le temps géologique



70 min

Corrigé
p. 493

Baccalauréat spécialité, sujet métropole, mars 2021

Un objet géologique comme le Grand Canyon du Colorado témoigne d'une histoire géologique que l'on peut reconstituer.

Question : Exposer les principes et les méthodes qui permettent de reconstituer la chronologie des événements enregistrés et des structures présentes dans un objet géologique.

Vous rédigerez un texte argumenté. Vous appuierez votre exposé éventuellement à partir du document proposé et/ou d'observations et/ou d'exemples judicieusement choisis.

Document : le Grand Canyon du Colorado, matérialisation du temps géologique

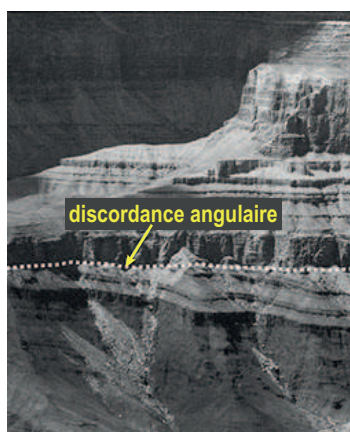


Figure 15.1 – Photo de la paroi du Grand Canyon montrant la discordance angulaire entre deux séries de roches sédimentaires.

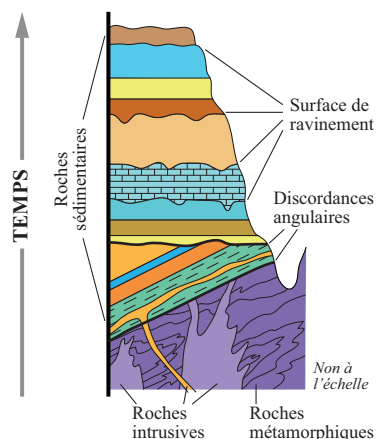


Figure 15.2 – Coupe schématique montrant la succession des roches visibles dans le Grand Canyon du Colorado.

Sources : d'après Pierre André Bourque, Introduction au chapitre « Le temps Géologique »,
http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html et Wikimedia Commons.

SUJET

Pour nous, le temps, notion abstraite, se matérialise le plus souvent par la trotteuse de l'horloge qui marque les secondes, les minutes ou les heures, le calendrier qui indique les jours, les mois, les années. En géologie, le temps est le plus souvent matérialisé par une séquence de roches, comme cet empilement de couches bien visibles sur les parois du Grand Canyon du Colorado : temps de dépôt d'une première succession de couches, métamorphisme de ces couches conduisant à la formation de roches métamorphiques, soulèvement et longue période d'érosion de ce massif concrétisée par une discordance, dépôt d'une seconde succession de couches sédimentaires, puis basculement et érosion, puis à nouveau succession de périodes de sédimentation entrecoupées de périodes d'érosion. Enfin, une période d'érosion récente est responsable du spectacle que nous offre aujourd'hui le Grand Canyon.

2 *Elysia chlorotica* et photosynthèse



70 min

Corrigé
p. 497

Elysia chlorotica est une espèce de mollusque aquatique vivant en eaux peu profondes. À la naissance, elle se nourrit d'une algue, *Vaucheria litorea*. À partir de ce moment, plus aucune prise de nourriture n'est nécessaire de sa vie.

À partir de l'étude des documents et de vos connaissances, présentez les modalités de l'interaction entre *Elysia chlorotica* et l'algue *Vaucheria litorea* et pourquoi une prise alimentaire additionnelle n'est pas nécessaire pour ce mollusque.

Document 1

a Le cycle de vie d'*Elysia chlorotica* est présenté ci-dessous.

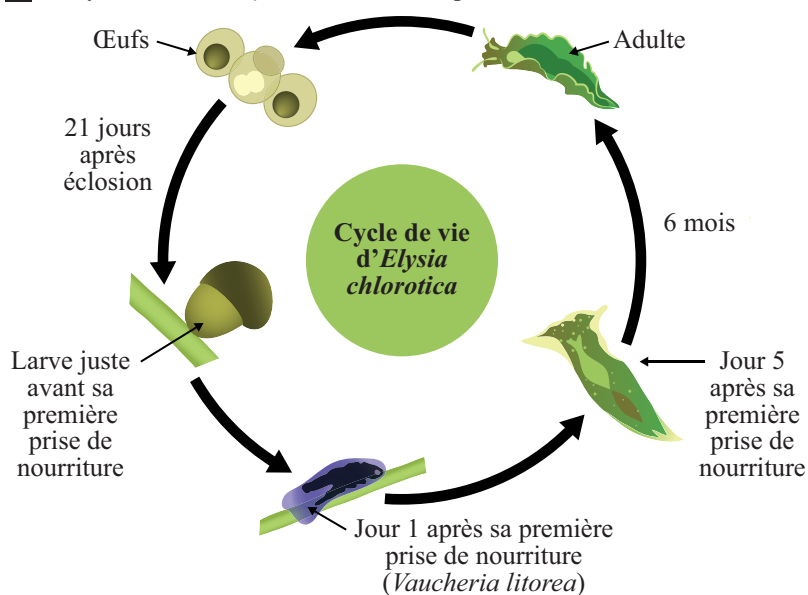


Figure 15.3 – Cycle de vie d'*Elysia chlorotica*

BACCALAURÉAT BLANC • CHAP. 15

b Des cellules intestinales d'une *Elysia chlorotica* adulte sont observées par microscopie. On précise qu'avant sa prise de nourriture, aucun chloroplaste n'est visible.

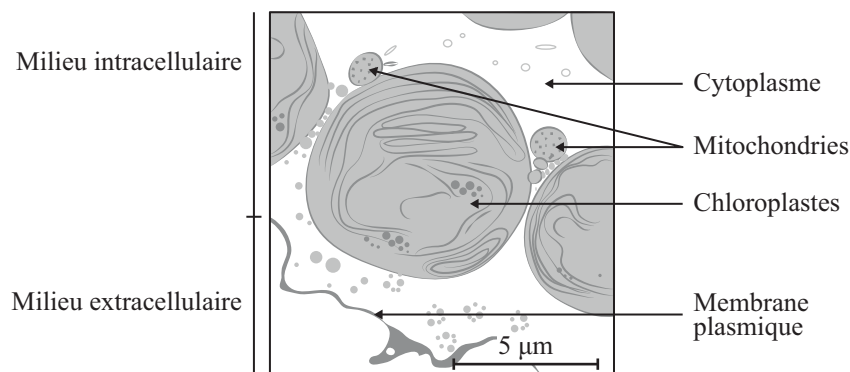


Figure 15.4 – Observation d'une cellule intestinale d'*Elysia chlorotica*

Document 2

a Des *Elysia chlorotica* adultes sont soumises à des luminosités d'intensités différentes et les échanges de dioxygène avec leur environnement sont quantifiés.

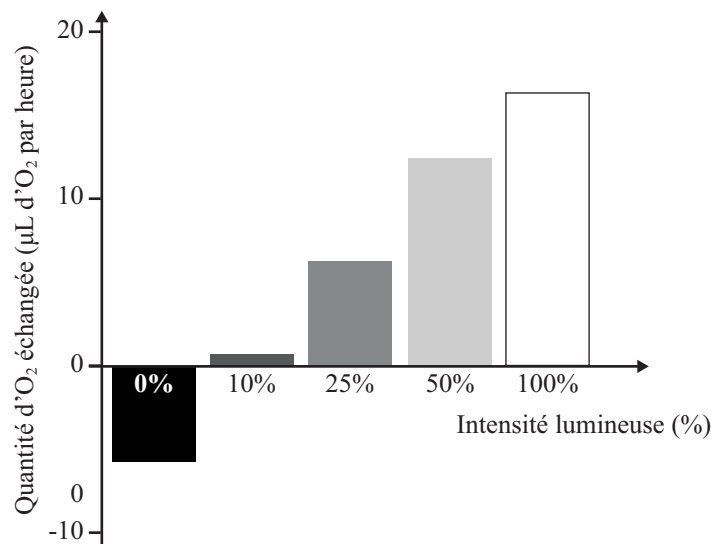


Figure 15.5 – Quantité d' O_2 échangée entre *Elysia chlorotica* avec son environnement, en présence de lumière d'intensités différentes. Une valeur négative (respectivement positive) montre une augmentation (respectivement une diminution) de la quantité d' O_2

b Des *Elysia chlorotica* d'âges différents sont mises à l'obscurité ou en présence de lumière et les échanges d'O₂ avec leur environnement sont quantifiés.

On précise qu'à partir de 6 mois, *Elysia chlorotica* est adulte et arrête sa croissance.

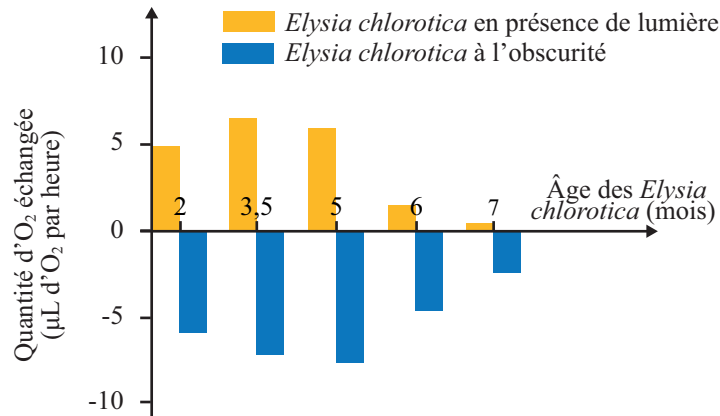


Figure 15.6 – Quantité d'O₂ échangée entre des *Elysia chlorotica* d'âges différents avec leur environnement, en présence ou en absence de lumière

Document 3

Le gène *psbO* est exprimé par les cellules végétales, et code une protéine impliquée dans la phase photochimique de la photosynthèse.

La quantité d'ARN messager du gène *psbO* est mesurée dans le cytoplasme de cellules intestinales d'*Elysia chlorotica* ou d'une espèce proche qui ne présente pas la même association avec l'algue *Vaucheria litorea*.

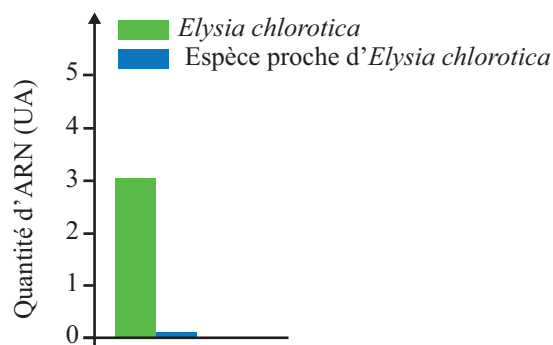


Figure 15.7 – Quantité d'ARN du gène étudié chez *Elysia chlorotica* et chez une espèce proche, ne présentant pas d'association avec l'algue *Vaucheria litorea*

Il a par ailleurs été vérifié que ce gène était bien présent dans le génome du noyau d'*Elysia chlorotica*, aussi bien juste après l'éclosion qu'à l'état adulte.

BACCALAURÉAT BLANC • CHAP. 15

1 Le temps géologique

Énoncé
p. 489

Baccalauréat spécialité, sujet métropole, mars 2021

MÉTHODE

Dans l'exercice 1, il vous est demandé de mobiliser et restituer vos connaissances dans un texte structuré et argumenté. Il est ainsi conseillé de rédiger une introduction, un développement avec plusieurs parties (une idée = un paragraphe) et une conclusion permettant d'apporter une réponse claire à la problématique. Pour réussir ce sujet, vous pouvez procéder en plusieurs étapes :

- *Comprendre le sujet* : lisez plusieurs fois le sujet pour en cerner les limites. Le mot « principe » permet de mettre en avant les différents modes de raisonnement permettant de dégager des conclusions sur les âges relatifs des structures géologiques. Après avoir énoncé un principe, on le met en œuvre dans l'analyse d'une situation (c'est un argument). Le mot « méthode » permet de renvoyer aux deux grands types de méthodes de datation appréhendées en cours : la datation absolue et la datation relative. Ainsi, vous pouvez en dégager un plan autour de ces deux grandes méthodes, au sein desquelles vous énoncerez les différents principes pouvant être utilisés ;
- *Lister les idées clés et les arguments associés* : le sujet propose ici un document. Dans un exercice de synthèse, il ne s'agit pas de l'exploiter dans le cadre de la résolution d'un problème spécifique mais de l'utiliser comme support argumentatif dans la construction de sa réponse. Ici le document présente des structures permettant d'illustrer des principes de datation relative et donne une indication d'âge obtenue par radiochronologie, permettant d'illustrer différents éléments en lien avec la datation absolue ;
- *Construire la réponse* : organisez votre devoir en structurant votre texte argumenté autour des deux grandes idées clés : « Les relations géométriques entre les éléments présents dans un objet géologique permettent de reconstituer la chronologie relative des structures présentes et des événements géologiques enregistrés au sein de l'objet » (datation relative) et « La datation par radiochronologie permet d'établir une chronologie absolue de structures ou d'événements géologiques » (datation absolue).

Introduction.

Au cours des temps géologiques, notre planète a été marquée par la succession d'événements géologiques enregistrés dans les formations géologiques actuelles, comme le grand canyon du Colorado. Différentes méthodes permettent de reconstituer la chronologie d'une région telle que l'exemple du

document : la datation relative et la datation absolue. *Nous verrons donc en quoi ces principes et méthodes permettent de reconstituer la chronologie des événements enregistrés et des structures présentes dans un objet géologique.* Pour répondre à cette question, nous verrons dans un premier temps en quoi les relations géométriques permettent de reconstituer la chronologie relative des structures présentes et des événements enregistrés au sein de l'objet, puis dans un second temps comment la datation par radiochronologie permet d'établir une chronologie absolue de ces structures ou ces événements.

1) La datation relative permet de dater des événements et/ou des structures les uns par rapport aux autres.

La chronologie relative peut se définir comme l'ensemble des techniques permettant d'ordonner des événements dans le temps sans pour autant leur donner un âge chiffré. Cette méthode repose sur l'application de principes logiques et sur l'identification de fossiles. Elle s'appuie sur la chronostratigraphie, qui correspond à l'étude de la succession des strates géologiques.

Le *principe de superposition* repose sur le fait que les strates géologiques se déposent les unes sur les autres. Une couche est donc plus récente que celles qu'elle recouvre et plus ancienne que celles qui la recouvrent. On peut voir, par exemple, dans le document que la couche 8 est plus récente que la couche 7, elle-même plus récente que la couche 6 etc jusqu'à la couche 1.

Le *principe de continuité* permet d'affirmer qu'une strate a le même âge sur toute son étendue. Ceci permet notamment de suivre une strate d'un point à un autre même si sa nature change ou qu'une couche est manquante. Ce principe est particulièrement utile si une couche a pu être datée précisément en un lieu mais que cette datation est impossible plus loin.

Le *principe de recoupement* permet de préciser que lorsqu'un élément recoupe ou provoque la transformation d'une structure géologique, il lui est forcément postérieur. Inversement, il est antérieur aux formations géologiques qu'il ne recoupe pas ou n'affecte pas. Ainsi, dans le grand canyon du Colorado par exemple, le pluton granitique recoupant les roches métamorphiques leur est postérieur. On peut également énoncer que les roches métamorphiques sont des roches sédimentaires métamorphisées lors d'une phase d'orogénèse : l'épisode métamorphique est donc postérieur à ces roches. La *discordance* correspond à une situation issue du dépôt d'une strate géologique sur une surface d'érosion ayant préalablement mis à nu plusieurs structures différentes. Elle est repérable en coupe par un changement de géométrie. Une discordance est plus récente que les structures qu'elle recoupe et plus ancienne que les dépôts qui la recouvrent. Ainsi, on peut par exemple observer sur le document que la série sédimentaire abcd est en discordance avec les roches métamorphiques, donc il y a eu entre temps soulèvement et longue période d'érosion. On peut aussi observer que la couche sédimentaire 1 est en discordance avec la série abcd, il y a donc eu basculement de cette série suivie d'une érosion

BACCALAURÉAT BLANC • CHAP. 15

avant son dépôt. La présence de surfaces d'érosion entre certaines de ces couches montre que la sédimentation n'a pas été continue. Par exemple, sur l'exemple du grand Canyon, il y a eu émergence et érosion entre les dépôts des couches 2 et 3.

La *biostratigraphie* désigne la répartition des fossiles dans les strates sédimentaires, donc de leur succession au cours des temps géologiques. On appelle *fossile stratigraphique* un fossile présentant une grande extension géographique et une durée d'existence brève à l'échelle des temps géologiques, et dont l'apparition et/ou la disparition sont précisément associées à des limites de couches sédimentaires. Ainsi, le *principe d'identité paléontologique* permet d'affirmer que deux strates contenant le même assemblage de fossiles stratigraphiques ont le même âge. La présence de fossiles stratigraphiques comme les Trilobites, les Fusulines et les Brachiopodes au sein de certaines roches sédimentaires du Colorado permettrait d'affirmer que des couches qui possèderaient ces mêmes fossiles seraient datées de la même période.

Ainsi, les principes utilisés dans le cadre de la datation relative ont permis d'établir une chronologie de certains événements géologiques ou de structures géologiques en les datant les uns par rapport aux autres. Cependant, ils ne permettent pas de donner un âge chiffré à ces structures ou événements, il faut donc faire appel à une autre méthode : la datation absolue.

2) La datation par radiochronologie permet d'établir une chronologie absolue de structures ou d'événements géologiques.

La *datation absolue* repose sur une méthode de datation quantitative permettant d'assigner à un événement un âge ou une durée. Pour cela, il est possible de s'appuyer sur la désintégration des éléments radioactifs contenus au sein de la lithosphère. En effet, lors d'une désintégration radioactive, un élément père radioactif se désintègre en éléments fils radiogéniques. Cette désintégration suit la loi fondamentale de la radioactivité. Chaque couple, constituant un radiochronomètre, est caractérisé par sa période, appelée demi-vie. Cette loi n'est valable que pour un système fermé qui n'établit pas d'échanges d'atomes avec son environnement, ce qui implique que :

- le nombre d'isotopes stables est constant ;
- les radioisotopes P, qui se désintègrent, deviennent tous des éléments radiogéniques F.

Différents radiochronomètres sont possibles, dont le choix est effectué selon la nature de l'objet étudié, la période de l'élément père et l'âge à déterminer (c'est en cela que la datation relative peut dès à présent nous donner un encadrement temporel). On pourra ainsi dater, selon le radiochronomètre considéré, l'âge de fermeture du système.

Par exemple, on peut voir sur la coupe que le granite contient de l'uranium ^{238}U ou ^{235}U radioactif (éléments pères) qui se transforment en ^{206}Pb ou ^{207}Pb (éléments fils). Dans ces roches, on observe souvent des cristaux de

zircons inclus dans les cristaux de biotite. Autour de ces cristaux de zircons, le mica est noirci, il est entouré d'une auréole de désintégration radioactive. Ces auréoles se forment à cause du rayonnement radioactif émis par l'uranium piégé dans la maille cristalline du zircon. Ainsi, lorsque l'on veut dater des roches formées, il y a plusieurs milliards d'années, qui ont subi des déformations ou un métamorphisme important, on peut utiliser ces roches à zircon, constituant un élément très résistant. On utilise conjointement les deux radiochronomètres $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ et $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ pour dater la formation d'une roche. Si le système n'a pas été perturbé, on mesure les valeurs de des rapports isotopiques d'un échantillon et on construit une courbe exprimant un rapport en fonction de l'autre. Tous les minéraux dont les mesures pour les deux radiochronomètres donneront les mêmes âges s'alignent sur la courbe « Concordia ». Si en revanche il n'y a pas de correspondance entre les deux âges les échantillons sont sur une droite qu'on appelle la « Discordia ». L'intersection supérieure de la discordia et de la concordia permet d'obtenir l'âge de la fermeture du système (cristallisation des zircons dans le magma) et l'intersection inférieure, date la réouverture du système, comme par exemple un épisode métamorphique.

Sur le document, on observe aussi que le basalte contient du rubidium ^{87}Rb radioactif qui se transforme en strontium ^{87}Sr . La quantité initiale d'atomes étant souvent impossible à estimer, on peut éliminer ce paramètre en mesurant plusieurs échantillons : on parle de méthode isochrone. En traçant $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ on obtient une droite dont le coefficient directeur nous permettra d'obtenir l'âge de la roche. Cette méthode de radiochronologie donne donc accès au temps écoulé depuis la fermeture du système d'un échantillon de roche, à travers cette méthode de droite isochrone. La période du couple Rb/Sr de 4,8 milliards d'années permet de dater des roches très anciennes.

D'autres systèmes, comme la méthode K / Ar, permettent de calculer des âges de manière directe.

Conclusion.

Nous avons donc pu voir que pour établir la chronologie de certains événements géologiques et l'âge de certaines structures géologiques, il était utile d'utiliser des principes et méthodes complémentaires. La datation relative repose sur des principes géométriques permettant de dater des structures les unes par rapport aux autres. Elle peut également s'appuyer sur le principe d'identité paléontologique utilisant la répartition des fossiles stratigraphiques. La datation absolue permet d'attribuer un âge à une structure géologique. Cette méthode s'appuie sur des principes de désintégration radioactive. Plusieurs radiochronomètres permettent ainsi d'avoir une estimation chiffrée. La combinaison de ces deux méthodes permet la construction de l'échelle des temps géologiques.

BACCALAURÉAT BLANC • CHAP. 15

2 *Elysia chlorotica* et photosynthèse

Énoncé
p. 490

MÉTHODE

Avant de commencer la rédaction, il est conseillé, comme pour l'exercice précédent, de bien lire l'ensemble du sujet dans un premier temps et de noter quelques notions clés au brouillon. L'objectif de cet exercice est de tirer le maximum d'informations des différents documents pour répondre à la question posée.

Elysia chlorotica est une espèce de mollusque que l'on peut trouver dans des eaux peu profondes. À la naissance, elle se nourrit d'une algue, *Vaucheria litorea*, puis n'a plus besoin d'aucune prise alimentaire de sa vie, ce qui est inhabituel dans le monde animal. Nous pouvons alors nous demander en quoi se nourrir de *Vaucheria litorea* une unique fois peut suffire à *Elysia chlorotica* pour le reste de sa vie ? Pour cela nous utiliserons les différents documents mis à notre disposition ainsi que nos connaissances.

Le document 1.a nous présente le cycle de vie d'*Elysia chlorotica*. Après son éclosion, on remarque que la larve est de couleur marron. Puis, après s'être nourrie de *Vaucheria litorea*, elle prend peu à peu la même couleur que l'algue, c'est-à-dire verte. On peut émettre l'hypothèse que la consommation d'algues a été à l'origine de ce changement de couleur, qui semble définitif car à l'état adulte, la couleur verte est toujours présente, alors qu'*Elysia chlorotica* ne s'est pas nourrie depuis 6 mois.

Dans le document 1.b, une observation au microscope d'une cellule intestinale d'*Elysia chlorotica* adulte nous montre des chloroplastes dans le cytoplasme. Or, *Elysia chlorotica* étant un animal, la présence de cet organe est inattendue. Avant la prise de nourriture, aucun chloroplaste n'étant visible, *Elysia chlorotica* a acquis cet organe lors de sa vie, probablement lors de la digestion d'*Vaucheria litorea*. Ces chloroplastes seraient donc passés des algues, au milieu intracellulaire des cellules intestinales d'*Elysia chlorotica*. Ceci pourrait expliquer l'apparition progressive de la couleur verte vue dans le document 1.a. On peut émettre l'hypothèse que l'acquisition de chloroplastes pourrait permettre à *Elysia chlorotica* de synthétiser de la matière organique en réalisant de la photosynthèse, et donc de ne plus avoir besoin de se nourrir au cours de sa vie.

Dans le document 2.a, des *Elysia chlorotica* ont été placés à l'obscurité, ou avec des éclairagements d'intensités différentes. On observe qu'à l'obscurité, la quantité de dioxygène diminue au cours de l'expérience d'environ $-5 \mu\text{L/h}$: *Elysia chlorotica* respire. En revanche, à mesure que l'intensité lumineuse augmente, la quantité d' O_2 dans le milieu croît ($1 \mu\text{L/h}$ pour une intensité de 10%, et $16 \mu\text{L/h}$ pour une intensité de 100%). En présence de lumière, *Elysia chlorotica* est donc capable de libérer du dioxygène, ce qui suggère que ce mollusque est capable de réaliser la photosynthèse. On notera qu'à la lumière, ce mollusque réalise toujours de la respiration. La quantité de dioxygène pro-

duite par photosynthèse est donc égale à la quantité de dioxygène échangée à laquelle on ajoute la quantité de dioxygène consommée par la respiration (correspondante à la quantité d'O₂ échangée à l'obscurité, en absence de photosynthèse). Par exemple, pour une intensité de 100%, il y aurait :
 $5 + 16 = 21 \mu\text{L/h}$ formés par photosynthèse.

Le document 2.b nous montre les échanges d'O₂ entre des *Elysia chlorotica* d'âges différents et son environnement en présence ou en absence de lumière. On observe qu'à l'obscurité, la quantité d'O₂ consommée par respiration augmente au cours des cinq premiers mois jusqu'à $7,5 \mu\text{L/h}$, puis diminue jusque $2,5 \mu\text{L/h}$ à l'âge de 7 mois. Or, à partir de six mois, *Elysia chlorotica* est adulte. On peut suggérer que cette chute est liée à la fin de la croissance, et donc à une quantité d'énergie diminuée. Grâce à la formule mise en place lors de l'analyse du document précédent, on peut quantifier la production d'O₂ par photosynthèse, et donc son efficacité. On observe qu'entre 2 et 5 mois, cette quantité est assez stable (autour de $12 \mu\text{L/h}$). Puis, après 6 mois, elle diminue jusqu'à atteindre $4 \mu\text{L/h}$ à 7 mois d'âge. On peut émettre l'hypothèse que les besoins énergétiques étant moins importants après l'arrêt de croissance, *Elysia chlorotica* a besoin de moins de matière organique.

Ces documents nous ont donc démontré qu'*Elysia chlorotica* était capable d'intégrer les chloroplastes de *Vaucheria litorea* lors de la digestion de cette dernière, lui conférant la capacité de réaliser la photosynthèse.

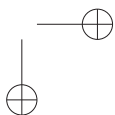
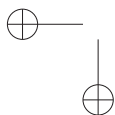
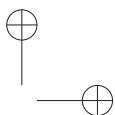
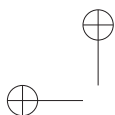
Dans le document 3, nous nous intéressons au gène *psbO* qui est exprimé par les cellules végétales et qui joue un rôle dans la photosynthèse. On observe que dans le cytoplasme d'*Elysia chlorotica*, une grande quantité d'ARN messagers de ce gène sont présents (3 unités arbitraires, contre 0,1 unité arbitraire pour un mollusque proche d'*Elysia chlorotica*). De plus, ce gène est présent dans le génome nucléaire d'*Elysia chlorotica*, aussi bien à l'état adulte, que juste après l'éclosion (avant même d'avoir consommé des algues). Ceci suggère donc qu'au cours de l'évolution, *Elysia chlorotica* a intégré dans son génome au moins un gène des chloroplastes des algues.

Ainsi, *Elysia chlorotica* intègre dans ses cellules intestinales des chloroplastes de l'algue *Vaucheria litorea*, lui permettant d'effectuer la photosynthèse. *Elysia chlorotica* n'a donc besoin que d'une prise de nourriture, avant de synthétiser sa propre matière organique. Cette association à long terme a même permis à des transferts de gènes de se réaliser entre les chloroplaste et le mollusque.

Annexe A

Liste des vidéos

Chapitre	Titre	Page
Chapitre 1	Exercice 12 : brassages génétiques	27
Chapitre 2	Cours : vidéo INSERM	43
Chapitre 2	Exercice 11 : transfert de gènes	57
Chapitre 3	Cours : vidéo de la spéciation	75
Chapitre 4	Exercice 12 : datation relative Vosges-Alsace	125
Chapitre 5	Cours : vidéo des cycles orogéniques	151
Chapitre 6	Cours : notions essentielles du cours	185
Chapitre 7	Cours : notions essentielles du cours	217
Chapitre 7	Cours : vidéo National Geographic Channel sur la photosynthèse	223
Chapitre 10	Cours : vidéo exemple de liens entre érosion et glaciation	317
Chapitre 12	Cours : vidéo étapes de la commande nerveuse du mouvement	377
Chapitre 12	Cours : vidéo réflexe myotatique	385
Chapitre 13	Cours : vidéo métabolisme cellulaire	428
Chapitre 14	Exercice 8 : stress et cheveux blancs	481



Annexe B

Index

Accoutumance, 476
Adaptation, 358
Agent stresser, 469
Albédo, 314
Allogamie, 226
Anaérobie, 432
Aneuploïdie, 16
Atténuation, 354
Autogamie, 226
Autotrophie au carbone, 46
Bilan radiatif, 314
Brassage interchromosomique, 8
Brassage intrachromosomique, 10
Calotte polaire, 285
Ceinture orogénique, 149
Cellule gliale, 386
Clone, 2
Co-dominance, 11
Coévolution, 226
Cycle de développement, 3
Cycles orogéniques (cycles de Wilson), 151
Cytosquelette, 426
Delta-O-18, 287
Diagramme pollinique, 281
Dominant, 11
Dérive génétique, 71
Effet de serre, 315
Endosymbiose, 45
Exigence climatique, 281
Famille multigénique, 15
Forçage orbital, 312
Forçage radiatif, 315
Glaciation, 285
Glycémie, 435
Gènes indépendants, 7
Gènes liés, 9
Génotype, 2
Mycorhize, 189
Méristème, 193
Neurotransmetteur, 384
Obduction, 144
Océanisation, 142
Ophiolite, 143
Organite semi-autonome, 46
Orogenèse, 148
Ostiole, 187
Paléo-palynologie, 281
Paléogéographie, 152
Paramètres Milanković, 310
Paramètres orbitaux, 310
Photolyse de l'eau, 220
Phytomère, 196
Phénotype étendu, 77
Plasticité, 391
Poil absorbant, 188
Pollinisation, 226
Population, 69
Potentiel d'action, 381
Principe d'actualisme, 279
Puits de carbone, 353
reproduction, 3
Rift, 140
Risque, 349
Récessif, 11
Réflexe myotatique, 377
Résilience, 359, 470

Rétro-action positive, 318	Sélection massale, 252
Rétrocontrôle négatif, 473	Sélection naturelle, 73
Services écosystémiques, 353	Thermomètre isotopique, 287
Sommation spatiale, 389	Thylakoïde, 219
Sommation temporelle, 389	Totipotence, 224
Spéciation, 75	Transfert horizontal, 41
Stress biologique, 469	Transmission culturelle, 78
Synapse, 380	Variétés, 253
Syndrome de domestication, 255	Vecteurs viraux, 44
Sève brute, 191	Vulnérabilité, 349
Sève élaborée, 191	Zone tampon (en écologie), 359