

INTERROS des LYCÉES



SVT

Term S

SPÉCIFIQUE ET SPÉCIALITÉ

NOUVEAU

✓ **Interros, exos** et **QCM** progressifs et minutés

✓ **Sujets** de type **Bac**

✓ Tous les **corrigés** détaillés

✓ Résumés de **cours** et conseils de **méthode**



Nathan

INTERROS des LYCÉES

Collection dirigée
par Éric Maurette

SVT

Term S

SPÉCIFIQUE ET SPÉCIALITÉ

Nathalie Bouchés-Noris

Anne Florimond

Agrégées de SVT

Le papier de cet ouvrage est composé de fibres naturelles,
renouvelables et fabriquées à partir de bois provenant de
forêts gérées de manière responsable.

 **Nathan**

Les auteurs ont cherché à rendre le contenu de ce manuel accessible à tous les élèves, en particulier ceux qui ont des difficultés à apprendre. Ils ont donc veillé à ce que le langage soit simple et clair, et à ce que les exercices soient variés et adaptés à différents niveaux de difficulté.

Ce manuel est destiné à être utilisé en complément de la leçon. Il ne remplace pas la leçon, mais il permet de mieux comprendre les notions abordées et de s'entraîner à les appliquer. Les exercices sont classés par ordre de difficulté, de la plus simple à la plus complexe.

Les auteurs ont également veillé à ce que le manuel soit agréable à lire. Ils ont donc utilisé des illustrations et des schémas pour rendre le contenu plus vivant et plus facile à comprendre. Ils ont également veillé à ce que le manuel soit bien organisé et facile à consulter.

Les auteurs ont enfin veillé à ce que le manuel soit fiable. Ils ont donc vérifié soigneusement les données et les résultats présentés, et ils ont veillé à ce que le manuel soit conforme aux programmes officiels.

Les auteurs ont enfin veillé à ce que le manuel soit utile. Ils ont donc veillé à ce que le manuel contienne des exercices et des problèmes qui permettent de mieux comprendre les notions abordées et de s'entraîner à les appliquer.

Les auteurs ont enfin veillé à ce que le manuel soit agréable à lire. Ils ont donc utilisé des illustrations et des schémas pour rendre le contenu plus vivant et plus facile à comprendre.

Les auteurs ont enfin veillé à ce que le manuel soit fiable. Ils ont donc vérifié soigneusement les données et les résultats présentés, et ils ont veillé à ce que le manuel soit conforme aux programmes officiels.

En classe de Terminale S, le rythme de classe est très soutenu et le professeur a généralement peu de temps pour proposer une quantité suffisante d'exercices à ses élèves. Il est donc nécessaire de s'entraîner par soi-même.

Cet ouvrage couvre les trois thèmes fédérateurs du nouveau programme de SVT (entré en vigueur en septembre 2012), scindés en différents chapitres couvrant intégralement le programme de Terminale S, qu'il s'agisse de l'enseignement spécifique (chapitres 1 à 15) ou de l'enseignement de spécialité (chapitres 16 à 18).

L'ouvrage comporte des résumés de cours qui reprennent les principales notions et définitions tout en les intégrant dans une démarche cohérente articulée autour de problématiques successives. Sans prétendre se substituer au cours dispensé par le professeur, ces résumés de cours aideront le lecteur à alimenter des réponses à la question de synthèse contenue dans la première partie de la nouvelle épreuve écrite du baccalauréat : « Maîtrise des connaissances acquises ».

On trouvera d'autre part un grand nombre d'exercices, à difficulté progressive. Pour chaque chapitre, les tout premiers exercices proposés correspondent à des tests simples de vérification des connaissances (questions à choix multiples, questions à réponse ouverte courte, affirmations à discuter...). Au-delà de leur utilité pour une vérification immédiate des connaissances, on les mettra à profit pour se familiariser avec l'évaluation sous la forme de QCM, qui est en vigueur dans l'épreuve écrite du baccalauréat depuis 2013.

Ensuite viennent les exercices avec support documentaire, dont la diversité permet de couvrir les notions essentielles et de mettre en œuvre les principales compétences exigibles d'un élève de Terminale S. Pour chaque chapitre, un certain nombre d'exercices répondent bien à la typologie de la seconde partie de la nouvelle épreuve écrite du baccalauréat : « Pratique du raisonnement scientifique ». En particulier, on rencontrera des QCM portant sur document ainsi que des situations où il conviendra, à partir d'un corpus documentaire, d'exposer une démarche et d'élaborer une argumentation.

Pour chaque exercice est indiqué d'une part son degré de difficulté, et d'autre part son référencement par rapport au cours du chapitre correspondant, ce qui permet de faire des exercices au fur et à mesure de l'avancement du cours du professeur sans en attendre la fin.

Nous tenons à signaler que les indications de temps accompagnant les énoncés correspondent à un temps de réflexion et de rédaction « au brouillon » lors de la phase d'entraînement : ils ne correspondent pas au temps réel qu'accorderait le professeur à ses élèves le jour de l'évaluation.

Nous souhaitons à nos lecteurs une année constructive en Terminale S et nous espérons que la lecture de cet ouvrage vous offrira un cadre d'apprentissage complétant efficacement celui de votre professeur.

Les auteures

Nathalie BOUCHÈS-NORIS et Anne FLORIMOND

Professeurs agrégées au lycée Richelieu, Rueil-Malmaison et membres du groupe de travail sur les nouveaux programmes de SVT pour l'académie de Versailles.

Remerciements

Les auteures et l'équipe de Prepamath Édition tiennent à remercier Valérie Laupénie et Aude Amilhat pour leur relecture attentive.

Coordination éditoriale : François Déliac

Conception couverture : Marc & Yvette

Graphisme : Elise Launay

Illustration : Patrick Doan

Table des matières

Chap	1	Le brassage génétique et sa contribution à la diversité génétique	1
		• Cours	1
		• Interros	17
		• Corrigés	24
Chap	2	Diversité génétique et diversification des êtres vivants	37
		• Cours	37
		• Interros	44
		• Corrigés	53
Chap	3	De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité	59
		• Cours	59
		• Interros	64
		• Corrigés	72
Chap	4	Un regard sur l'évolution de l'Homme	77
		• Cours	77
		• Interros	87
		• Corrigés	95
Chap	5	Évolution et vie fixée chez les plantes	101
		• Cours	101
		• Interros	112
		• Corrigés	119
Chap	6	La caractérisation du domaine continental	125
		• Cours	125
		• Interros	136
		• Corrigés	143
Chap	7	La convergence lithosphérique : contexte de formation des chaînes de montagnes	149
		• Cours	149
		• Interros	155
		• Corrigés	163

Chap	8	Le magmatisme en zone de subduction : une production de nouveaux matériaux continentaux	171
		• Cours	171
		• Interros	220
		• Corrigés	241
Chap	9	La disparition des reliefs	189
		• Cours	189
		• Interros	195
		• Corrigés	201
Chap	10	Géothermie et propriétés thermiques de la Terre	205
		• Cours	205
		• Interros	209
		• Corrigés	214
Chap	11	La plante domestiquée	217
		• Cours	217
		• Interros	221
		• Corrigés	229
Chap	12	Les mécanismes des réponses immunitaires innées et adaptatives	235
		• Cours	235
		• Interros	246
		• Corrigés	256
Chap	13	Le phénotype immunitaire au cours de la vie	265
		• Cours	265
		• Interros	269
		• Corrigés	274
Chap	14	Le réflexe myotatique : un exemple de commande du mouvement	279
		• Cours	279
		• Interros	291
		• Corrigés	305

Chap	15	La commande volontaire du mouvement	317
		• Cours	317
		• Interros	323
		• Corrigés	327
Chap	16	Energie et cellule vivante (spécialité)	333
		• Cours	333
		• Interros	346
		• Corrigés	365
Chap	17	Atmosphère, hydrosphère, climats : du passé à l'avenir (spécialité)	379
		• Cours	379
		• Interros	394
		• Corrigés	408
Chap	18	Glycémie et diabète (spécialité)	419
		• Cours	419
		• Interros	435
		• Corrigés	452
Chap	19	Baccalaureat Blanc	467
		• Sujet	467
		• Corrigé	477

Tous les conseils qui suivent sont ceux utilisés 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 en savoir plus sur le sujet, nous vous conseillons le livre *Comment travailler plus efficacement*, de E. Matrullo et E. Maurette, aux Éditions Prépamath.

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 TP vus le matin en classe (feed-back mental).
- Après avoir relu votre cours le soir, essayez de retrouver par écrit les principaux paragraphes sans regarder votre leçon (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 TP). 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 « feedback ».

Miser sur la qualité

De nombreux témoignages démontrent que pour obtenir de bons résultats, il est préférable de faire un nombre limité d'exercices, mais plus approfondis, que d'en survoler une grande quantité de piètre qualité. Une tendance très répandue consiste à abattre une grande quantité d'exercices, à la chaîne, mais superficiellement, en espérant que le jour du contrôle, l'on aura déjà vu ce type d'exercice et que l'on saura s'en souvenir. Cette méthode est absolument inefficace.

Ainsi :

- À la fin d'un TP ou d'un exercice, 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 résolution.

- 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.

Méthode des « couches successives »

Cette méthode, très utile pour les étudiants préparant des examens, 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 schémas 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 explications.

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 étudiés, avant de les réviser en détail. Ainsi, vous aurez développé une compréhension synthétique et claire.
- De même, avant d'aborder un problème volumineux (tel qu'un contrôle écrit), il est préférable de survoler l'ensemble du problème avant de l'attaquer.

Rapidité

Pour acquérir de la rapidité, 3 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 une problématique, 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 de la méthode de résolution. Si les seuls moments où vous vous pressez sont les devoirs 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. Vous serez alors à même de voir quels sont les exercices qui vous semblent les plus faciles, pour commencer par ceux-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 habitué 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 et rédigez une conclusion qui répond 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.

Le brassage génétique et sa contribution à la diversité génétique

Plan du chapitre

1. Introduction
2. La méiose et ses conséquences génétiques
3. La fécondation, autre source de diversification génétique

Introduction

Dans le monde vivant, au sein de chaque espèce, une grande diversité de phénotypes est observable. Les mutations contribuent pour une part à cette diversité en créant de nouveaux allèles. D'autre part, si l'on se situe chez les organismes pluricellulaires, la reproduction sexuée comporte des événements fondamentaux impliqués dans la transmission des chromosomes et des allèles, donc impliqués dans l'obtention d'une diversité de génotypes. Il est possible de cerner ces événements en parcourant le cycle de développement d'une espèce, par exemple l'Homme.

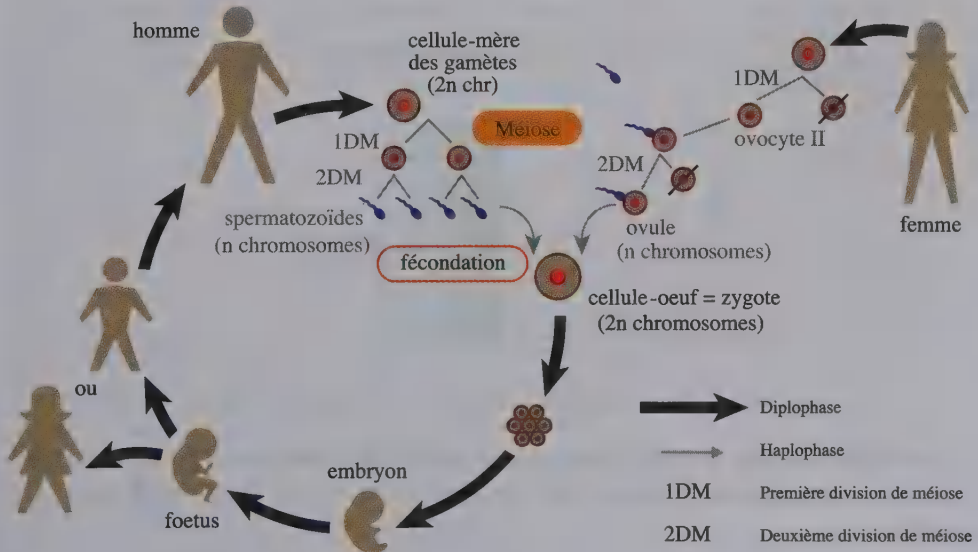


Figure 1.1 – Place de la reproduction sexuée dans le cycle de développement de l'Homme

Les cellules somatiques sont, chez l'Homme, diploïdes : elles possèdent leur jeu de chromosomes en deux exemplaires. Pour traduire cet état diploïde, on écrit qu'il y a $2n$ chromosomes.

Les gamètes (spermatozoïdes et ovules), qui sont les cellules sexuelles produites dans les gonades (testicules et ovaires) à partir de cellules germinales, sont haploïdes : ils ne possèdent que $n = 23$ chromosomes. Dans les gonades se déroule la méiose, ensemble de deux divisions cellulaires particulières conduisant à la production des gamètes. La formule chromosomique des ovules nés par méiose au sein des ovaires est $n = 22 + X$; celle des spermatozoïdes est $n = 22 + X$ ou $n = 22 + Y$. La rencontre des gamètes au moment de la fécondation permet la formation d'une cellule-œuf à nouveau diploïde.

? PROBLÉMATIQUE

Comment la méiose et la fécondation, événements-clés de la reproduction sexuée, contribuent-elles chacune à la diversité génétique des individus ?

2 La méiose et ses conséquences génétiques

2.1 La méiose : une production de cellules haploïdes

La méiose permet la réduction de moitié du nombre de chromosomes (passage de $2n$ à n) grâce à un ensemble de deux divisions cellulaires successives (que nous noterons respectivement 1DM pour « première division de méiose » et 2DM pour « deuxième division de méiose » sur les schémas) sans phase S intercalaire. La méiose est précédée d'une phase de réplication de l'ADN.

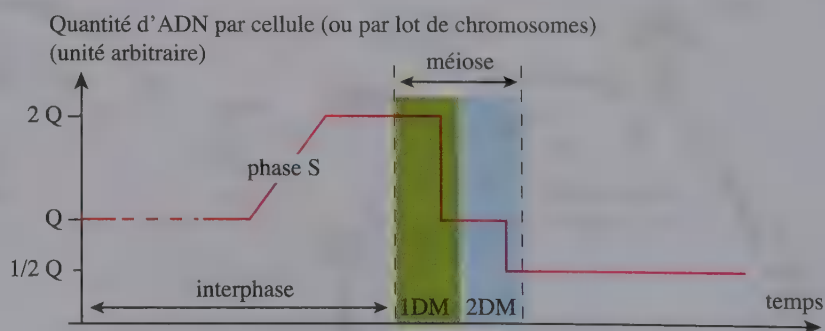
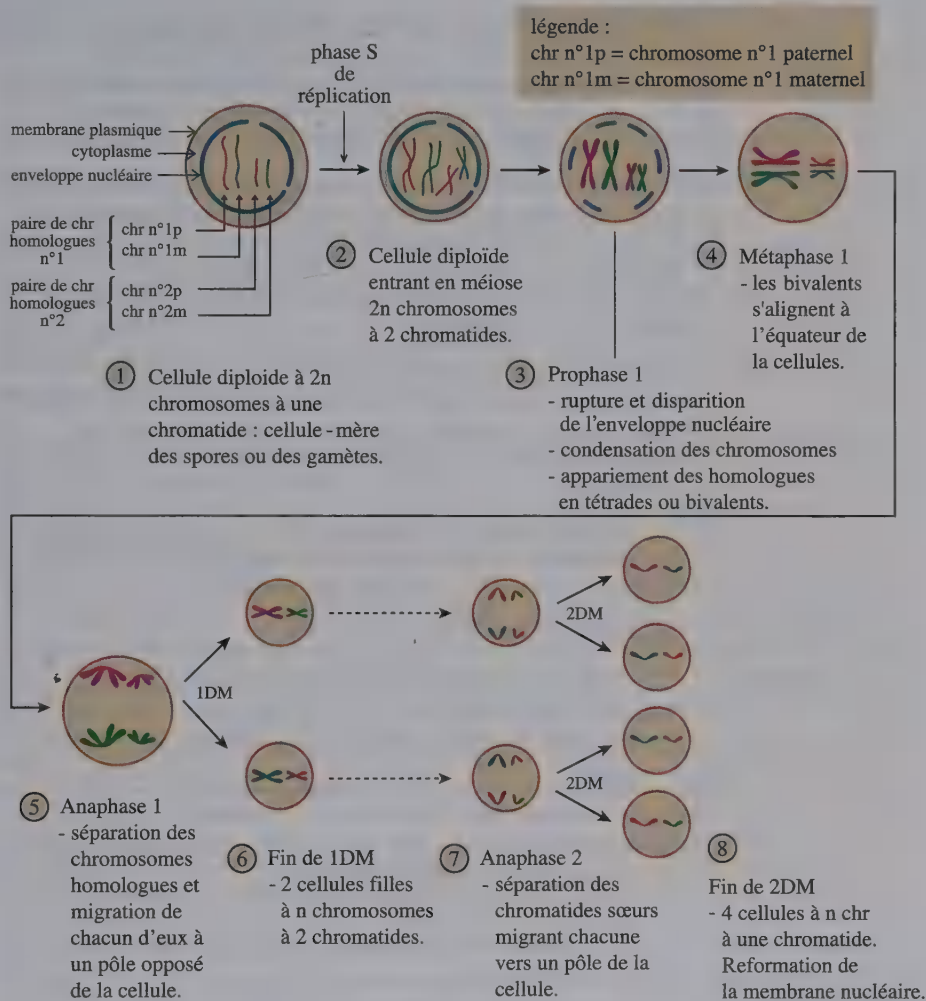


Figure 1.2 – Évolution de la quantité d'ADN durant la méiose

Les figures ci-après présentent sous forme d'un tableau et de schémas pour une cellule à $2n = 4$ chromosome le déroulement de la première et de la deuxième division de méiose.



<i>Prophase 1</i>	Condensation des chromosomes. Les chromosomes sont à deux chromatides. Il y a appariement des chromosomes homologues, formant des bivalents (un bivalent est constitué de deux chromosomes homologues étroitement appariés). On peut observer des enchevêtrements entre les chromosomes homologues appariés.
<i>Métaphase 1</i>	Rangement des chromosomes homologues appariés au niveau du plan équatorial. Les centromères sont de part et d'autre du plan équatorial, les deux chromosomes homologues se font face, chacun fixé sur une fibre du fuseau de division, chacun avec ses deux chromatides.
<i>Anaphase 1</i>	Les deux chromosomes homologues de chaque paire se séparent et migrent vers des pôles opposés de la cellule. Cette étape assure la réduction du nombre de chromosomes qui caractérise la méiose. Chaque chromosome est toujours à deux chromatides.
<i>Télophase 1</i>	Décondensation des chromosomes. Division cytoplasmique (cytotéière) et individualisation des deux cellules contenant chacune n chromosomes à deux chromatides.
<i>Prophase 2</i>	Condensation des chromosomes.
<i>Métaphase 2</i>	Placement des chromosomes au niveau du plan équatorial.
<i>Anaphase 2</i>	Les deux chromatides de chaque chromosome se séparent (clivage du centromère) et migrent vers des pôles opposés de la cellule.
<i>Télophase 2</i>	Décondensation des chromosomes. Cytodière et individualisation des quatre cellules-filles contenant chacune n chromosomes à une seule chromatide.

La première division est dite réductionnelle car elle assure le passage d'une cellule à $2n$ chromosomes à deux cellules à n chromosomes. La deuxième division est dite équationnelle car elle forme quatre cellules à n chromosomes à partir de deux cellules à n chromosomes.

➔ À RETENIR

La méiose est précédée d'une seule phase de réplication de l'ADN et se compose de deux divisions cellulaires successives. La première division assure le passage de $2n$ chromosomes à n chromosomes. La deuxième division forme quatre cellules à n chromosomes à partir de deux cellules à n chromosomes.

Chaque cellule issue de la méiose ne possède plus qu'un seul exemplaire de chaque chromosome. L'étape fondamentale assurant la réduction du nombre de chromosomes est l'anaphase 1.

Voir exercices 1, 5 et 6.

2.2 Les brassages génétiques au cours de la méiose

2.2.1 La méiose assure un brassage interchromosomique

a) Etude d'un exemple mettant en évidence le brassage interchromosomique

Chez la drosophile, un gène porté par la paire de chromosomes n°3 régit la couleur du corps. Un allèle (noté e^+) de ce gène détermine la couleur grise, un autre allèle (noté e) de ce gène détermine la couleur noire (ebony). Un autre gène, porté par la paire de chromosomes n°2, intervient dans le développement de l'aile. Un allèle (noté v^+) de ce gène assure le développement d'ailes de longueur normale, un autre allèle (noté v) de ce gène détermine des ailes vestigiales. Les deux gènes étant portés par des paires différentes de chromosomes, on dit qu'ils sont indépendants.

Le tableau ci-après présente des résultats de croisements qui vont être exploités afin de mettre en évidence un brassage allélique.

<i>Premier croisement</i>
<i>On croise une drosophile de race pure (*) à ailes longues et à corps gris donc de phénotype $[v^+, e^+]$ avec une drosophile à ailes vestigiales et corps ébène $[v, e]$, de race pure (*).</i>
<i>(*) : Des individus de race pure sont homozygotes pour le ou les gènes étudiés.</i>
<i>On obtient en F1 100% d'individus de phénotype $[v^+, e^+]$.</i>
<i>Deuxième croisement</i>
<i>On croise ensuite un individu de la F1 avec un individu homozygote récessif pour les deux gènes, c'est-à-dire avec un individu de phénotype $[v, e]$.</i>
<i>Les résultats du croisement sont les suivants :</i>
<i>On obtient en F2 25% $[v^+, e^+]$; 25% $[v, e]$; 25% $[v, e^+]$; 25% $[v^+, e]$.</i>

Le tableau ci-après présente le raisonnement à pratiquer lors de l'exploitation des résultats de croisements.

Voir tableau page suivante.

Exploitation des résultats du premier croisement

Les parents étant de race pure, ils produisent chacun par méiose une seule sorte de gamètes :

- le parent de phénotype $[v^+, e^+]$ a pour génotype $v^+/v^+, e^+/e^+$: il produit 100% de gamètes de génotype v^+, e^+ ;
- le parent de phénotype $[v, e]$ a pour génotype $v/v, e/e$: il produit 100% de gamètes de génotype v, e .

Tous les descendants obtenus en génération F1 ont donc pour génotype $v^+/v, e^+/e$. Par comparaison de leur génotype à leur phénotype macroscopique qui est $[v^+, e^+]$, on conclut* que :

- pour le gène de la longueur des ailes, l'allèle v^+ domine l'allèle v
- pour le gène de la couleur du corps, l'allèle e^+ domine l'allèle e .

(*) : le raisonnement est fondé sur le fait que l'allèle dominant est celui qui s'exprime dans le phénotype macroscopique.

Exploitation des résultats du deuxième croisement

Le deuxième croisement s'écrit : $v^+/v, e^+/e \times v/v, e/e$. Ce croisement d'un individu double hétérozygote avec un individu homozygote double récessif est un test-cross.

- Intérêt de ce croisement : l'individu double récessif ne produit qu'une seule catégorie de gamètes, ne contenant que des allèles récessifs (v et e). Les phénotypes des descendants F2 vont donc directement « révéler » les génotypes des gamètes produits par les hybrides F1. On démontrera ainsi (en comparant les génotypes des gamètes obtenus au génotype de l'individu F1) qu'il y a eu brassage des allèles lors de la méiose.
- Démonstration de l'intervention d'un brassage allélique lors de la méiose chez l'individu F1 : d'après l'analyse des phénotypes de F2, la drosophile F1 a produit lors de la méiose 4 catégories de gamètes, en quantité identique : des gamètes de génotype v^+, e^+ ; des gamètes de génotype v^+, e ; des gamètes de génotype v, e^+ et des gamètes de génotype v, e . On met ainsi en évidence qu'à partir d'un unique génotype parental $v^+/v, e^+/e$ il y a mise en place de 4 sortes de combinaisons alléliques dans les gamètes : il y a donc bien eu brassage allélique lors de la méiose chez l'individu F1. L'individu F1 a produit des gamètes parentaux (dont le génotype est semblable à celui des gamètes à l'origine de l'individu) mais aussi des gamètes recombinés (dont le génotype est original par rapport à celui des gamètes à l'origine de l'individu).
- Identification du type de brassage mis en jeu : chez la drosophile F1, l'obtention de quatre sortes de gamètes en quantités identiques indique que durant la méiose, l'allèle v^+ a la même probabilité de rester associé avec l'allèle e^+ que de former une nouvelle association avec l'allèle e . Cela ne peut s'expliquer que par le positionnement aléatoire des chromosomes homologues des deux paires concernées de part et d'autre du plan équatorial en métaphase 1 : il y a deux dispositions possibles et équiprobables. On parle de brassage interchromosomique.

b) Modalités du brassage interchromosomique

Lors de la métaphase 1 de méiose, la disposition aléatoire des deux chromosomes homologues de chaque paire de part et d'autre du plan équatorial et le comportement indépendant des différentes paires entre elles engendrent un brassage interchromosomique.

cellule - mère
des gamètes

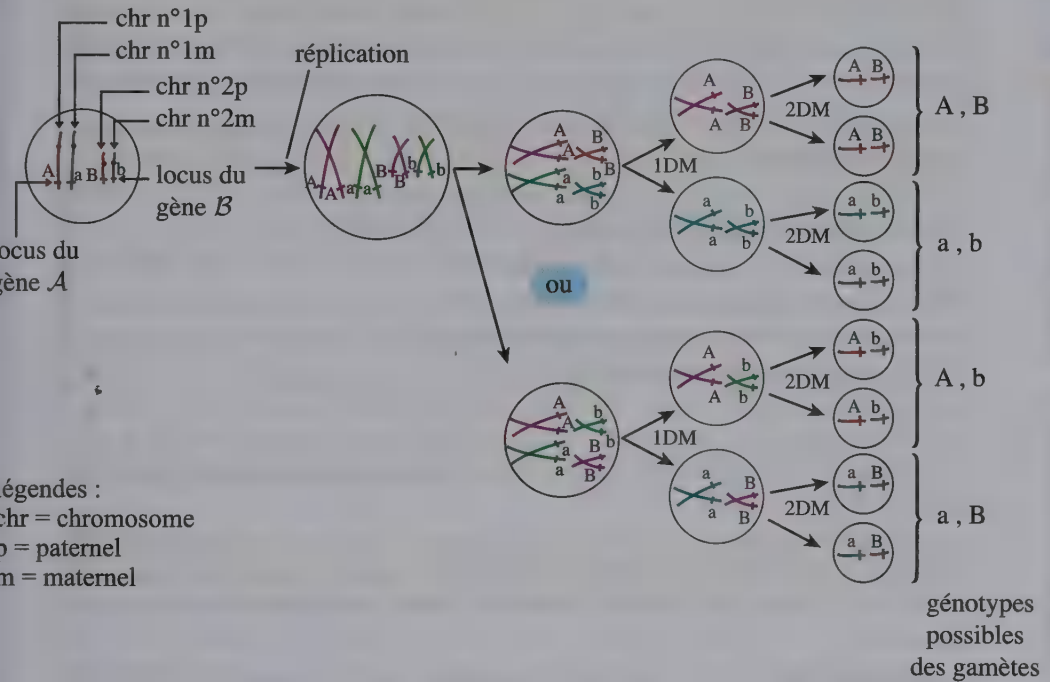


Figure 1.3 – Comportement des chromosomes en métaphase 1 responsable du brassage interchromosomique chez un sujet hétérozygote pour deux gènes indépendants

Ce brassage interchromosomique préparé en métaphase 1 est effectif en anaphase 1 au moment de la séparation et de la migration des chromosomes homologues de chaque paire.

Le brassage interchromosomique est d'autant plus important que le nombre de chromosomes est grand dans l'espèce considérée. Ainsi, pour une cellule diploïde hétérozygote à n paires de chromosomes, on obtient en vertu du seul brassage interchromosomique 2^n cellules haploïdes possibles.

2.2.2 La méiose assure également un brassage intrachromosomique

a) Etude d'un exemple mettant en évidence le brassage intrachromosomique

Chez la drosophile, un gène (entre autres gènes) noté O régit la couleur de l'œil. Un

allèle (noté o^+) de ce gène détermine la couleur rouge de l'œil, un autre allèle (noté o) de ce gène détermine la couleur marron de l'œil. Un autre gène, noté A , intervient dans la forme de l'aile. Un allèle (noté a^+) de ce gène détermine des ailes de forme normale, un autre allèle (noté a) de ce gène détermine des ailes échancrées. Les deux gènes sont portés sur la même paire de chromosomes : on dit qu'ils sont liés.

Le tableau ci-après présente des résultats de croisements qui vont être exploités afin de mettre en évidence un autre type de brassage allélique.

Premier croisement

On croise une drosophile de race pure à ailes normales et à œil rouge (donc de phénotype $[a^+, o^+]$) avec une drosophile à ailes échancrées et œil marron, de race pure $[a, o]$. On obtient en F1 100% d'individus de phénotype $[a^+, o^+]$.

Deuxième croisement

On réalise le test-cross F1 X double homozygote récessif.

Les résultats en F'2 sont les suivants :

410 drosophiles à œil rouge et ailes normales ;

111 drosophiles à œil rouge et ailes échancrées ;

109 drosophiles à œil marron et ailes normales ;

400 drosophiles à œil marron et ailes échancrées.

Le tableau ci-après présente le raisonnement à pratiquer lors de l'exploitation des résultats.

Exploitation des résultats du premier croisement

Les parents étant de race pure, ils produisent chacun par méiose une seule sorte de gamètes :

- le parent de phénotype $[a^+, o^+]$ a pour génotype a^+o^+/a^+o^+ : il produit 100% de gamètes de génotype a^+o^+ ;
- le parent de phénotype $[a, o]$ a pour génotype ao/ao : il produit 100% de gamètes de génotype ao .

Tous les descendants obtenus en génération F1 ont donc pour génotype a^+o^+/ao . Par comparaison de leur génotype à leur phénotype macroscopique qui est $[a^+, o^+]$ on conclut que :

- pour le gène de la forme des ailes, l'allèle a^+ domine l'allèle a
- pour le gène de la couleur de l'œil, l'allèle o^+ domine l'allèle o .

Exploitation des résultats du deuxième croisement

Le deuxième croisement s'écrit : $a^+o^+/ao \times ao/ao$. Il s'agit d'un test-cross.

- Intérêt de ce croisement : l'individu double récessif ne produit qu'une seule catégorie de gamètes, ne contenant que des allèles récessifs (a et o). Les phénotypes des descendants vont donc directement « révéler » les génotypes des gamètes produits par les hybrides F1. On démontrera ainsi (en comparant les génotypes des gamètes obtenus au génotype de l'individu F1) qu'il y a eu brassage des allèles lors de la méiose.
- Démonstration de l'intervention d'un brassage allélique lors de la méiose chez l'individu F1 : d'après l'analyse des phénotypes de sa descendance, la drosophile F1 a produit lors de la méiose quatre catégories de gamètes, en quantités différentes : des gamètes de génotype a^+o^+ ; des gamètes de génotype a^+o ; des gamètes de génotype ao^+ ; des gamètes de génotype ao . On met ainsi en évidence qu'à partir d'un unique génotype parental a^+o^+/ao , il y a mise en place de 4 sortes de combinaisons alléliques dans les gamètes : il y a donc bien eu brassage allélique lors de la méiose chez l'individu F1.
- Identification du type de brassage mis en jeu : chez la drosophile F1, le seul brassage interchromosomique explique uniquement la production des gamètes parentaux de génotype a^+o^+ et ao . La production de gamètes recombinés de génotype a^+o et ao^+ prouve que les allèles de deux gènes peuvent être brassés au sein même de la paire de chromosomes sur laquelle ils se situent. On parle pour cette raison de brassage intrachromosomique.

b) Modalités du brassage intrachromosomique

Pour comprendre l'apparition de gamètes recombinés alors que les gènes étudiés sont liés, il est nécessaire de revenir sur le détail de la prophase 1 de méiose.

Lors de la prophase de première division de méiose, alors que les deux chromosomes homologues de chaque paire sont appariés et forment des bivalents, des enchevêtrements (chiasmata) sont observables entre les chromatides non-sœurs de chromosomes homologues. À l'occasion de ces enchevêtrements, il peut y avoir un échange réciproque des deux segments de chromatides situés au-delà du chiasma. On appelle crossing-over un tel échange.

Voir figure page suivante.

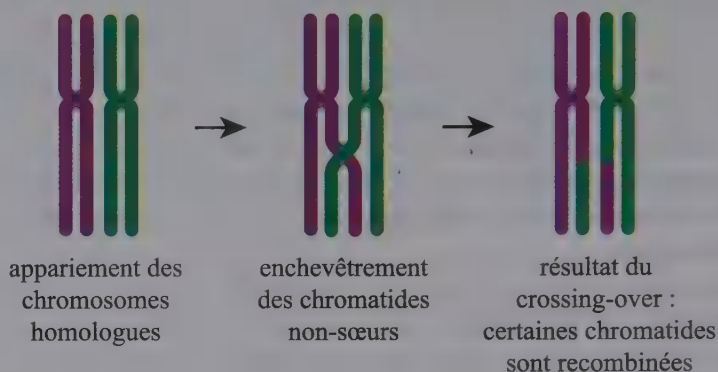


Figure 1.4 – Détail du comportement d'une paire de chromosomes en prophase 1

Le crossing-over qui survient en prophase 1 de méiose peut générer de nouvelles combinaisons d'allèles sur les chromatides : ce type de brassage génétique est un brassage intrachromosomique.

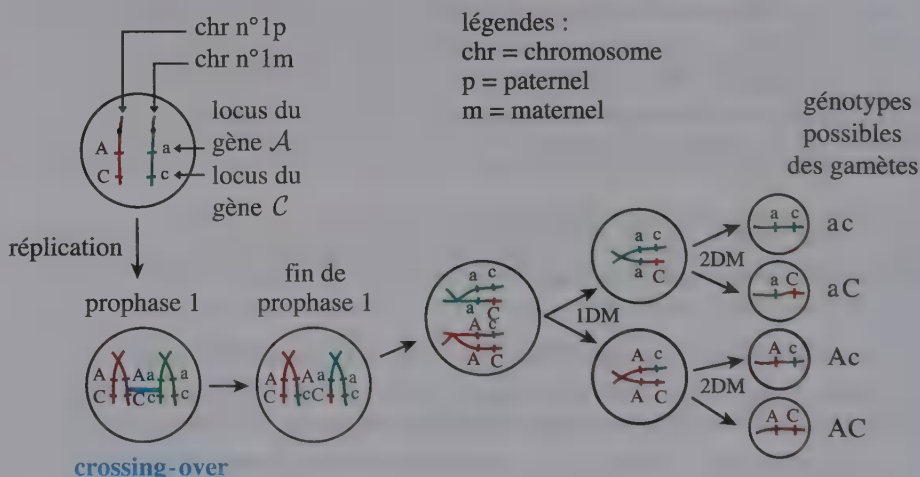


Figure 1.5 – Comportement des chromosomes en prophase 1 responsable du brassage intrachromosomique chez un sujet hétérozygote pour deux gènes liés

Le crossing-over est un événement banal, fréquent, dont la position est aléatoire.

Le brassage intrachromosomique est d'autant plus important que le degré d'hétérozygotie est élevé sur la paire de chromosomes considérée. Ainsi, en considérant une seule paire de chromosomes caractérisée par une hétérozygotie pour x gènes, on obtient en vertu du seul brassage intrachromosomique 2^x cellules haploïdes possibles.

➔ À RETENIR

La méiose est source de variété grâce à deux types de brassage allélique :

- le brassage interchromosomique qui est dû au comportement indépendant des chromosomes de chaque paire en première division de méiose,
- le brassage intrachromosomique qui est dû aux recombinaisons homologues causées par un crossing-over en prophase 1.

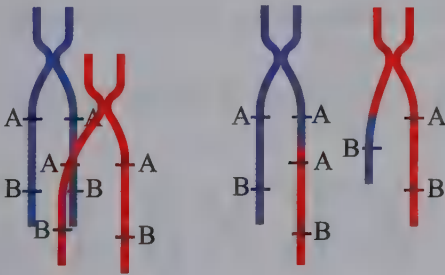
Concrètement, le brassage interchromosomique s'exerce sur des chromosomes préalablement remaniés par le brassage intrachromosomique. Par l'intermédiaire des deux brassages, une diversité potentiellement infinie de gamètes est produite.

Voir exercices 2 et 7 à 11.

2.3 Des anomalies de la méiose éventuellement source de diversification

2.3.1 Crossing-over inégal et duplications de gène

Lors de la prophase 1 de méiose, il arrive que les chromosomes homologues s'appairent de manière imparfaite. Dans ce cas, les échanges de matériel entre les chromosomes homologues appariés ne sont pas symétriques. Il s'ensuit un gain de matériel génétique pour l'un des deux chromosomes qui pourra ainsi porter deux exemplaires d'un gène. Un gamète peut alors hériter des deux duplicata, tout comme le zygote correspondant. Pour l'autre gamète, le gène est perdu et il est possible que le zygote correspondant ne soit pas viable.



Figures 1.6 – Duplication de gène par crossing-over inégal

Ultérieurement, au fil du temps, les duplicata évoluent indépendamment en fixant des mutations différentes. Ils représentent à terme, dans le génome des espèces actuelles, un ensemble de gènes apparentés, montrant d'importantes similitudes de séquence (gènes homologues), appartenant à une même famille multigénique. C'est ainsi que s'est constituée, par exemple, la famille multigénique des gènes codant pour les pigments rétiens (rhodopsine et opsines) chez les Primates à vision trichromatique.

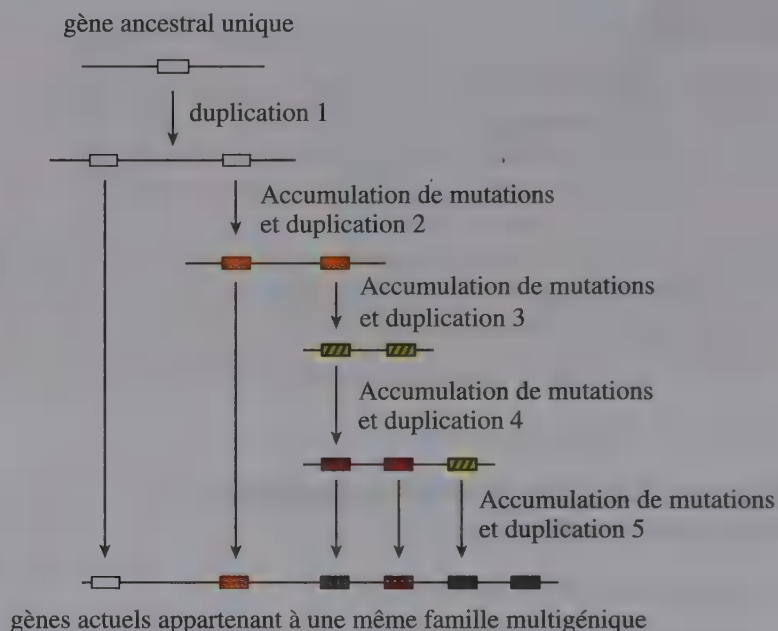


Figure 1.7 – Schéma du mode de constitution d'une famille multigénique

2.3.2 Mouvement anormal des chromosomes et anomalies de caryotypes

Chez l'Homme, il arrive parfois que des individus naissent avec 45 ou 47 chromosomes : un chromosome d'une paire est absent ou un chromosome d'une paire est présent en triple exemplaire. C'est le cas de la trisomie 21. Ces anomalies chromosomiques provoquent l'apparition de diverses malformations, la plupart du temps accompagnées d'un retard mental plus ou moins marqué.

Cet état est un exemple d'aneuploïdie (possession d'un nombre de chromosomes inférieur ou supérieur à celui caractérisant l'espèce).



Figure 1.8 – Caryotypes humains trisomique et normal

Pour expliquer l'apparition d'un caryotype du type trisomie 21, il faut nécessairement qu'un des deux gamètes, ovule ou spermatozoïde, contienne deux exemplaires du chromosome 21 au lieu d'un seul. Des perturbations de la répartition des chromosomes lors de la méiose peuvent conduire à ces anomalies du nombre de chromosomes.

Deux explications sont possibles :

Etape concernée	Anomalie
Anaphase 1	Les chromosomes homologues de la paire n°21 appariés en bivalents ne se sont pas séparés et ont migré vers un même pôle.
Anaphase 2	Les deux chromatides du chromosome n°21 ont migré vers un même pôle après clivage du centromère.

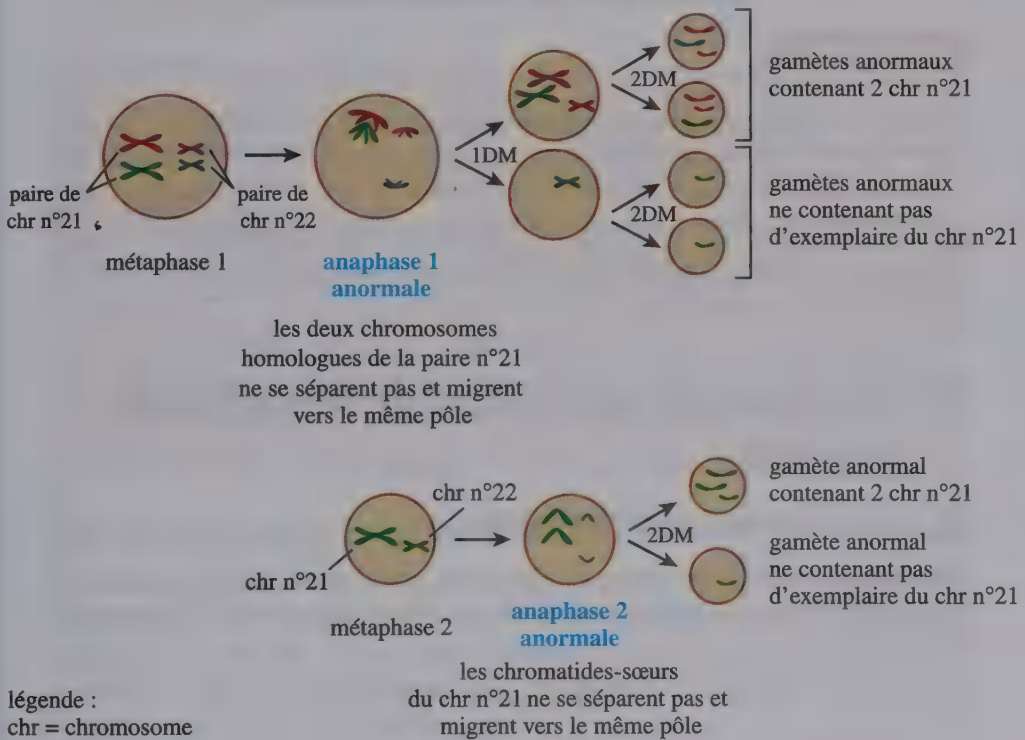


Figure 1.9 – Divisions de méiose anormale conduisant à des gamètes aneuploïdes

Dans les deux cas de figure, l'un des gamètes contient deux exemplaires du chromosome 21 et après fécondation donnera naissance à un individu trisomique.

Ainsi, des perturbations dans la distribution des chromosomes lors de l'anaphase 1 ou de l'anaphase 2 de méiose conduisent à des anomalies du nombre de chromosomes.

Remarque : les gamètes anormaux peuvent tout aussi bien être les spermatozoïdes

		caryotypes anormaux possibles pour l'ovule			
		chr n°21m	chr n°22m	chr n°21m	chr n°22m
caryotype haploïde du spermatozoïde	chr n°21p				
	chr n°22p				
		cellule - œuf trisomique pour le chr n°21		cellule - œuf monosomique pour le chr n°21	

Tableau 1.1 – Tableau de croisement représentant le résultat de la fécondation pour des gamètes aneuploïdes

➔ À RETENIR

Un mouvement anormal de chromosomes lors de la méiose produit une cellule contenant un nombre inhabituel de chromosomes. Un crossing-over inégal peut aboutir à une duplication de gènes. Ces anomalies sont souvent la source de troubles, mais elles peuvent parfois contribuer à la diversification du vivant.

Voir exercices 12 et 13.

La fécondation, autre source de diversification génétique

3.1 Le déroulement de la fécondation

La fécondation est définie comme le stade de la reproduction sexuée consistant en une fusion des gamètes mâle et femelle en une cellule unique nommée cellule-œuf (ou zygote).

Voir figure page suivante.

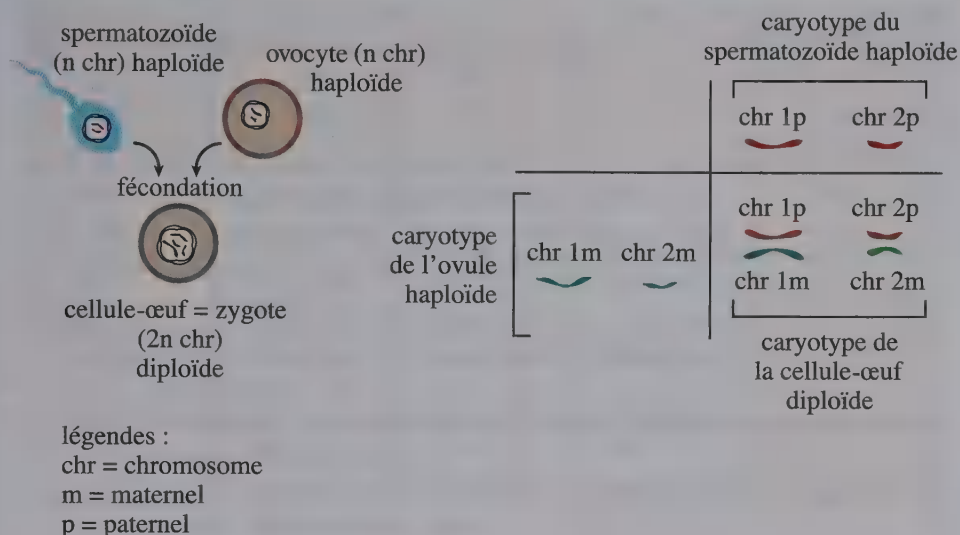


Figure 1.10 – Déroulement d'une fécondation mettant en évidence la fusion des matériels nucléaires

À RETENIR

La fécondation conduit à la réunion au sein d'un même noyau de deux lots complémentaires de n chromosomes : c'est la caryogamie. Ainsi, au moment de la fécondation, les paires de chromosomes homologues se reconstituent. Dans chaque paire, l'un des chromosomes est d'origine maternelle (apporté par le gamète femelle), l'autre est d'origine paternelle (apporté par le gamète mâle).

3.2 Les conséquences génétiques de la fécondation

Les gamètes se rencontrent aléatoirement au cours de la fécondation : chaque type de gamète mâle est susceptible de s'unir à chacun des différents types de gamètes femelles. Pour matérialiser cette équiprobabilité des rencontres des gamètes, on construit un tableau à double entrée appelé échiquier de croisements (ou tableau de rencontre des gamètes) dans lequel on reporte :

- en ligne (ou en colonne) les génotypes des gamètes femelles et leurs proportions ;
- en colonne (ou en ligne) les génotypes des gamètes mâles et leurs proportions ;
- à chaque intersection ligne-colonne, le génotype du zygote (par conséquent, le génotype du descendant).

On peut par exemple construire un échiquier de croisements dans le cas de deux sujets hétérozygotes pour deux gènes indépendants, fabriquant chacun 4 sortes de gamètes.

Gamètes mâles \ Gamètes femelles	v^+, e^+ 1/4	v^+, e 1/4	v, e^+ 1/4	v, e 1/4
v^+, e^+ 1/4	$v^+/v^+, e^+/e^+$ 1/16 [v^+, e^+]	$v^+/v^+, e^+/e$ 1/16 [v^+, e^+]	$v^+/v, e^+/e^+$ 1/16 [v^+, e^+]	$v^+/v, e^+/e$ 1/16 [v^+, e^+]
v^+, e 1/4	$v^+/v^+, e^+/e$ 1/16 [v^+, e^+]	$v^+/v^+, e/e$ 1/16 [v^+, e]	$v^+/v, e^+/e$ 1/16 [v^+, e^+]	$v^+/v, e/e$ 1/16 [v^+, e]
v, e^+ 1/4	$v^+/v, e^+/e^+$ 1/16 [v^+, e^+]	$v^+/v, e^+/e$ 1/16 [v^+, e^+]	$v/v, e^+/e^+$ 1/16 [v, e^+]	$v/v, e^+/e$ 1/16 [v, e^+]
v, e 1/4	$v^+/v, e^+/e$ 1/16 [v^+, e^+]	$v^+/v, e/e$ 1/16 [v^+, e]	$v/v, e^+/e$ 1/16 [v, e^+]	$v/v, e/e$ 1/16 [v, e]

Tableau 1.2 – Échiquier de rencontre des gamètes concernant deux individus hétérozygotes pour deux gènes indépendants (drosophiles de génotype $v^+/v, e^+/e$)

À l'aide de cette construction, on établit que :

- à partir d'un seul génotype $e^+/e, v^+/v$ commun aux deux parents, neuf génotypes sont susceptibles d'apparaître dans la descendance : le génotype parental $v^+/v, e^+/e$ mais aussi huit génotypes nouveaux, recombines : $v^+/v, e^+/e^+$; $v^+/v, e/e$; $v/v, e^+/e^+$; $v/v, e^+/e$; $v/v, e/e$; $v^+/v^+, e/e$; $v^+/v^+, e^+/e$; $v^+/v^+, e^+/e^+$
- à partir d'un seul phénotype [e^+, v^+] commun aux deux parents peuvent naître des individus présentant l'un des quatre phénotypes :
 $[e^+, v^+] =$ phénotype parental ;
 $[e, v^+] ; [e^+, v] ; [e, v] =$ phénotypes nouveaux.

➡ À RETENIR

Au moment de la fécondation, la réunion au hasard des gamètes génétiquement différents, produits lors de la méiose, engendre de nouvelles combinaisons alléliques dans la cellule-œuf, conduisant à des phénotypes nouveaux. On dit que la fécondation amplifie le brassage génétique.

Remarque : La diversité génétique potentielle des zygotes est immense : il y a 2^{2nx} zygotes possibles lors de la reproduction sexuée de deux individus en impliquant n paires de chromosomes hétérozygotes pour x gènes. Néanmoins, seule une fraction des zygotes produits est viable et se développe.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 24

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1** L'étape responsable du passage de la diploïdie à l'haploïdie est :
- a** la réplication de l'ADN qui précède la méiose
 - b** l'anaphase de première division de méiose
 - c** l'anaphase de deuxième division de méiose
- 2** Lors de l'anaphase 1 de méiose :
- a** les paires de chromosomes se séparent et migrent vers des pôles cellulaires opposés
 - b** les chromatides de chaque chromosome se séparent et migrent vers des pôles cellulaires opposés
 - c** les chromosomes homologues de chaque paire se séparent et migrent vers des pôles cellulaires opposés

2 V/F Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 24

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

- 1** Lors d'un test-cross :
- a** on croise entre eux deux individus hétérozygotes afin de connaître les gamètes qu'ils produisent
 - b** il est possible de mettre en évidence un brassage intrachromosomique
 - c** il est possible de mettre en évidence le fait que la fécondation amplifie le brassage génétique
- 2** Chez un individu hétérozygote pour deux gènes liés représentés par deux couples d'allèles (a^+ , a) et (b^+ , b) :
- a** le génotype s'écrit a^+/b^+ , a/b
 - b** le génotype s'écrit a^+b^+/ab
 - c** il y a lors de la méiose production de gamètes parentaux et de gamètes recombinés
 - d** un crossing-over peut expliquer la diversité des gamètes obtenus
 - e** il y a production lors de la méiose de 4 sortes de gamètes
- 3** Chez un individu hétérozygote pour deux gènes indépendants représentés par deux couples d'allèles (a^+ , a) et (b^+ , b) :
- a** le génotype s'écrit a^+/b^+ , a/b
 - b** le génotype s'écrit a^+b^+/ab
 - c** il y a lors de la méiose production de gamètes parentaux et de gamètes recombinés en quantités différentes
 - d** un crossing-over peut expliquer la diversité des gamètes obtenus
 - e** il y a production lors de la méiose de 4 sortes de gamètes

3 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 24

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

- 1** Le crossing-over
- ☐ a est un événement rare
 - ☐ b est un événement responsable du brassage génétique
 - ☐ c peut parfois être inégal
- 2** La fécondation amplifie le brassage génique :
- ☐ a car elle réunit des cellules haploïdes
 - ☐ b car elle réunit au hasard des gamètes génétiquement différents
 - ☐ c car elle fait apparaître une diversité de génotypes possibles supérieure à la diversité des gamètes obtenus par méiose

Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 25

Qui suis-je ?

- ☐ a Une étape au cours de laquelle les chromosomes homologues s'enchêvêtrent et échangent des segments de chromatides.
- ☐ b Deux événements qui caractérisent la reproduction sexuée.
- ☐ c Une phase précédant la méiose (ou la mitose) et indispensable au partage du matériel génétique.
- ☐ d La cellule obtenue lors de la fécondation.

5 Méiose – Gamètes

★★

10 min

→ corrigé
p. 25

Lycée Eugène Delacroix, Maisons Alfort

La photographie ci-après présente le caryotype de la cellule émise par l'ovaire d'une femme au moment de l'ovulation. Sur quels arguments se fonde-t-on pour affirmer que cette cellule, appelée ovocyte, est le résultat de la première division de méiose ?

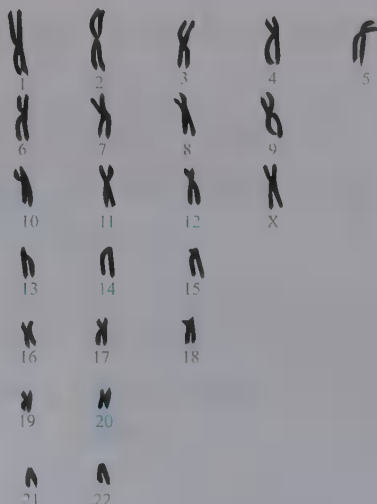


Figure 1.11
– Caryotype de
l'ovocyte humain

6 Méiose – Gamètes



10 min

corrigé
p. 25

Lycée Richelieu, Rueil-Matmaison

Le document représente deux étapes d'un phénomène fondamental dans la reproduction sexuée, chez une espèce diploïde dont le nombre chromosomique est $2n = 28$. La structure encadrée sur le document a a évolué pour donner les deux figures encadrées sur le document b.

En vous basant sur l'observation du document, identifiez la nature et le moment de la division cellulaire correspondant à chacune des étapes a et b.

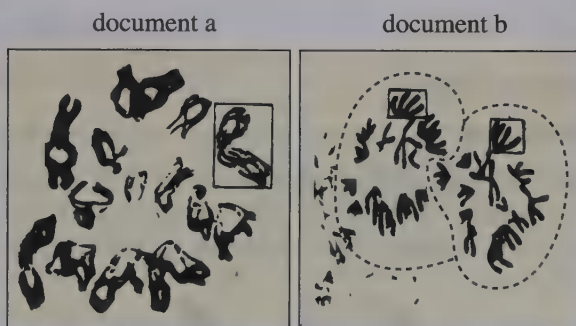


Figure 1.12 – Deux étapes observables dans une coupe de testicule chez un organisme diploïde

Remarque : les deux cellules visibles sur la photo b sont observées en « vue polaire ». Le plan équatorial correspond au plan de la photographie, les pôles cellulaires sont « en avant » et « en arrière » du plan de la photographie, donc non visibles.

7 Méiose – Etapes



10 min

corrigé
p. 26

Lycée Lakanal, Sceaux

Remettez dans l'ordre les images proposées. Justifiez vos réponses.

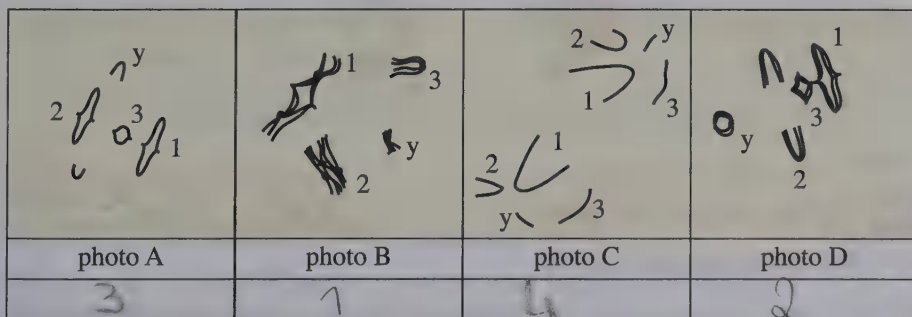


Figure 1.13 – Chromosomes de cellules des tubes séminifères d'un criquet

8 Nombre de gènes en cause



10 min

→ corrigé
p. 26

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.

9 Croisements- Gène(s)



10 min

→ corrigé
p. 27

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 ?

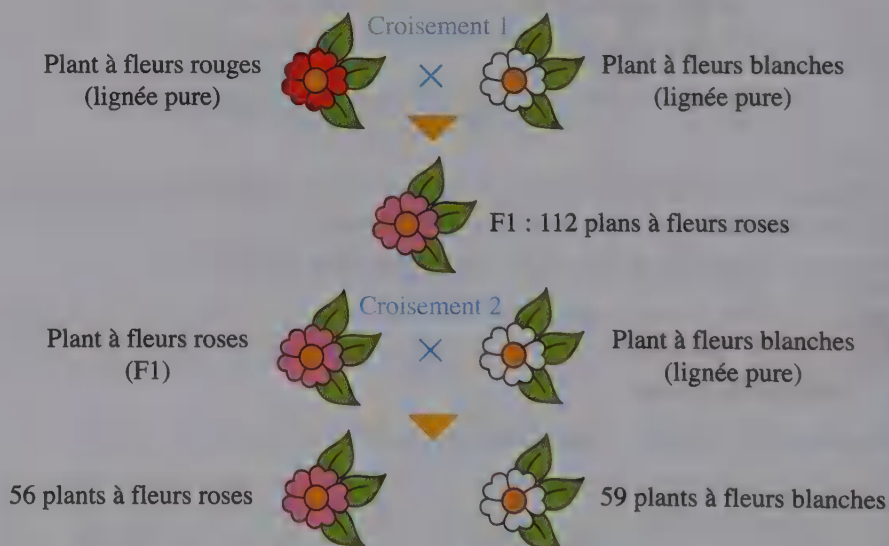


Figure 1.14 – Résultats de croisements chez les Belles de nuit

10 Liaison ou non des gènes



15 min

→ corrigé
p. 28

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.

11 Brassage génétique



30 min

→ corrigé
p. 30

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.

12 Brassage génétique



30 min

→ corrigé
p. 32

Lycée Vauvenargues, Aix en Provence

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 mâles à pelage noir (non agouti) et à coloration uniformément répartie :

- 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).

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.



Duplications



corrigé
p. 34

Lycée Albert de Mun, Nogent-sur-Marne

L'Homme 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 1.15 – Caractéristiques des trois hormones hypophysaires de l'Homme

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



14 Caryotype anormal



corrigé
p. 35

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 1.16 –
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 (les) proposition(s) exacte(s).

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

- une absence de séparation des deux chromosomes homologues de la paire 21 en anaphase 1 de méiose
- une absence de séparation des deux chromosomes homologues de la paire XY en anaphase 1 de méiose
- une absence de séparation des deux chromosomes homologues de la paire XX en anaphase 1 de méiose
- une absence de séparation des deux chromatides du chromosome X en anaphase 2 de méiose

15 Caryotype – Anomalie

★★

10 min

→ corrigé
p. 36

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. 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).



Figure 1.17 – Caryotype du père

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

1 QCM Vérification des connaissances→ énoncé
p. 17

Réponse exacte pour chaque série de propositions :

1 **b** ; **2** **c****2 V/F Vérification des connaissances**→ énoncé
p. 17**1** Affirmations inexactes = **a** et **c**. Rectifications :

- a** Lors d'un test-cross, on croise un individu hétérozygote avec un individu homozygote récessif.
- c** Lors d'un test-cross, il est impossible de mettre en évidence le fait que la fécondation amplifie le brassage génétique, car le parent homozygote récessif ne produit qu'une seule sorte de gamètes. Dans ce cas, la fécondation ne peut pas aboutir à davantage de génotypes d'individus que de génotypes de gamètes créés par la méiose chez l'hétérozygote.

2 Affirmation inexacte = **a**. Rectifications :

- a** Le génotype s'écrit a^+b^+/ab . Il ne s'écrit pas a^+/b^+ , a/b pour deux raisons :
- a^+ et a sont les allèles d'un même gène alors que b^+ et b sont les allèles d'un autre gène
 - il est indiqué dans l'énoncé que les deux gènes sont liés.

3 Affirmations inexactes = **a** **b** **c** et **d**. Rectifications :

- a** Le génotype s'écrit a^+/a , b^+/b . Il ne s'écrit pas a^+/b^+ , a/b car a^+ et a sont les allèles d'un même gène alors que b^+ et b sont les allèles d'un autre gène
- b** Le génotype s'écrit a^+/a , b^+/b . Il ne s'écrit pas a^+b^+/ab car il est indiqué dans l'énoncé que les deux gènes sont indépendants, ce qui signifie qu'ils sont portés par des paires différentes de chromosomes.
- c** Il y a lors de la méiose production de gamètes parentaux et de gamètes recombinés en quantités identiques. Ces proportions identiques s'expliquent par l'équiprobabilité des dispositions possibles des chromosomes homologues de part et d'autre du plan équatorial.
- d** Un brassage interchromosomique peut expliquer la diversité des gamètes obtenus. Le brassage intrachromosomique par crossing-over n'intervient pas dans le cas où l'on suit des gènes indépendants.

3 QCM Vérification des connaissances→ énoncé
p. 18

- 1** Réponses exactes : **b** **c**. Le crossing-over est un événement fréquent dont la position est aléatoire. À l'occasion d'un crossing-over, les segments chromatidiens échangés appartiennent bien à des chromosomes homologues, mais l'échange peut accidentellement être inégal (mécanisme à l'origine des duplications géniques).

- Réponses exactes : **b** **c**. La fécondation est bien la réunion de cellules haploïdes, mais il faut faire intervenir la rencontre au hasard de gamètes génétiquement différents créés au cours de la méiose pour mettre en évidence la diversité des génotypes possibles des cellules-œufs.

4 Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 18

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| a La prophase 1 de méiose. | b La méiose et la fécondation. |
| c La réplication de l'ADN. | d Le zygote (ou cellule-œuf). |

5 Méiose – Gamètes

→ énoncé
p. 18

Lycée Eugène Delacroix, Maisons Alfort

Le caryotype de la cellule présenté montre un seul exemplaire de chaque paire de chromosomes (formule chromosomique $n=23$). On en déduit que la première division de méiose, qui assure la séparation des deux chromosomes homologues de chaque paire, a déjà eu lieu. Chaque chromosome de la cellule est encore pourvu de ses deux chromatides. On en déduit que la deuxième division de méiose, qui assure la séparation des chromatides de chaque chromosome, n'a pas encore eu lieu. La cellule proposée, appelée ovocyte, émise par l'ovaire d'une femme au moment de l'ovulation, est donc bien le résultat de la première division de méiose.

6 Méiose – Gamètes

→ énoncé
p. 19

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

⚠ ATTENTION

Attention à l'interprétation du document b : on pourrait être tenté d'identifier une anaphase 1, mais les contours cellulaires bien visibles font comprendre qu'on a déjà deux cellules filles contenant chacune un lot haploïde de chromosomes. On pourrait alors hésiter entre une prophase 2 et une métaphase 2, mais l'aspect très condensé des chromosomes et leur alignement sur la plaque équatoriale (ici en vue polaire) permet de trancher...

L'étape a représente une prophase de 1^{ère} division de méiose. Justification :

- la cellule observée est diploïde ($2n = 28$)
- les deux chromosomes homologues de chaque paire sont appariés (on dénombre 14 bivalents)
- les chromatides des chromosomes homologues sont enchevêtrés

L'étape b représente une métaphase de 2^{ème} division de méiose. Justification :

- les deux cellules observées sont haploïdes ($n = 14$)
- les chromosomes sont à deux chromatides, bien visibles et rangés au niveau du plan équatorial (ici en vue polaire)

7 Méiose - Etapes

→ énoncé
p. 19

Lycée Lakanal, Sceaux

Les tubes séminifères font partie des gonades du criquet. Certaines cellules situées dans les tubes séminifères du criquet sont donc les futurs gamètes ou spermatozoïdes.

La photo B représente une prophase de première division de méiose car les chromosomes homologues sont appariés en bivalents dans lesquels on distingue quatre chromatides entremêlées. À certains niveaux, on observe des chiasmas qui sont les endroits où s'effectuent les crossing-over.

Sur la photo D, on observe la séparation des chromosomes de chaque paire et la migration de certains chromosomes, avec leurs deux chromatides (par exemple paire n°2) vers un pôle de la cellule. On en déduit qu'il s'agit de l'anaphase de la première division de méiose.

Sur la photo A, on observe encore une fois une séparation et une migration de chromosomes. Toutefois, cette fois-ci, les chromosomes qui migrent vers les pôles de la cellule (par exemple le chromosome Y) ne sont constitués que d'une seule chromatide. D'autre part, on observe très bien la séparation des chromatides sur la plaque équatoriale pour les chromosomes 1, 2 et 3. Il s'agit donc de l'anaphase de deuxième division de méiose.

Enfin, sur la photo C, on observe deux groupes de chromosomes à une chromatide. Chacun de ces deux groupes constitue un lot haploïde de chromosomes puisqu'il contient un seul exemplaire de chaque chromosome. Cette photo est donc celle d'une télophase de deuxième division de méiose.

8 Nombre de gènes en cause

→ énoncé
p. 20

Lycée Victor Hugo, Besançon

MÉTHODE

- se placer dans le cas de figure le plus simple : hypothèse d'un seul gène en cause
- dans le cadre de cette hypothèse, effectuer le suivi des allèles de façon théorique, en les impliquant dans des croisements correspondant à ceux proposés dans l'énoncé (il s'agira systématiquement d'un croisement de lignées de race pure puis d'un test-cross)
- confronter les résultats théoriquement attendus aux résultats des croisements expérimentaux afin de valider ou réfuter l'hypothèse

On émet l'hypothèse que les deux souches parentales utilisées diffèrent par un seul gène. On note V ce gène.

Les deux parents utilisés lors du premier croisement sont de race pure, c'est-à-dire homozygotes pour le gène étudié. Chaque parent produit donc une seule sorte de

gamètes : des gamètes contenant l'allèle « rouge vif » pour le parent [œil rouge vif], des gamètes contenant l'allèle « rouge brique » pour le parent [œil rouge brique]. Toutes les cellules-œufs (donc toutes les drosophiles F1) obtenues par fécondation possèdent alors un allèle « rouge vif » et un allèle « rouge brique » : elles sont hétérozygotes pour le gène étudié. En admettant que l'allèle « rouge vif » est récessif par rapport à l'allèle « rouge brique », cela est en accord avec les résultats expérimentaux qui indiquent une F1 homogène constituée d'individus [rouge brique], on peut noter v^+ l'allèle gouvernant la couleur rouge brique de l'œil et v l'allèle gouvernant la couleur rouge vif de l'œil.

Dans le cadre de l'hypothèse, il s'agit de suivre lors du deuxième croisement le devenir du couple d'allèles (v^+ , v) afin de déterminer si les résultats théoriquement attendus sont en accord avec les résultats expérimentaux.

Le deuxième croisement s'écrit : $v^+/v \times v/v$. Il s'agit d'un test-cross.

La drosophile femelle de génotype v^+/v produit deux sortes de gamètes : 50 % de gamètes de génotype v^+ et 50 % de gamètes de génotype v . La drosophile mâle de génotype v/v produit 100% de gamètes de génotype v . On devrait donc obtenir la descendance suivante : 50% de drosophiles de génotype v^+/v et 50% de drosophiles v/v . Cela donnerait 50% de drosophiles [œil rouge brique] et 50% de drosophiles [œil rouge vif].

Ces résultats théoriquement attendus ne correspondent pas aux résultats expérimentaux, puisqu'on obtient en réalité : 26 % de drosophiles [œil rouge brique] et 74 % de drosophiles [œil rouge vif].

L'hypothèse émise doit être réfutée. On peut conclure qu'il y a plus d'un gène en cause dans le déterminisme de la différence phénotypique entre les deux souches parentales.

9 Croisements- Gène(s)

→ énoncé
p. 20

Lycée Charlemagne, Paris

MÉTHODE

Il s'agit, pour tester l'hypothèse proposée, de « simuler » chaque croisement dans le cadre de cette hypothèse puis de confronter les résultats prévus par ces simulations aux résultats effectifs.

Posons l'hypothèse qu'un seul couple d'allèles gouverne la couleur des fleurs chez les Belles de nuit. On note R l'allèle déterminant la couleur rouge des fleurs et B l'allèle déterminant la couleur blanche des fleurs.

Les parents impliqués dans le croisement 1 sont de variétés pures donc homozygotes. Dans le cadre de l'hypothèse, ce croisement s'écrit : $R/R \times B/B$. Chaque parent produit lors de la méiose une seule sorte de gamètes : des gamètes de génotype R pour le parent R/R et des gamètes de génotype B pour le parent B/B. Tous les individus F1 ont donc pour génotype R/B.

Les résultats effectifs de ce premier croisement montrent une génération homogène de phénotype [fleurs roses]. A condition d'admettre que les allèles R et V sont codominants, les résultats prévus dans le cadre de l'hypothèse s'accordent avec les résultats réels.

Le croisement 2 implique des plants F1 à fleurs roses et des plants de lignée pure à fleurs blanches. Toujours dans le cadre de l'hypothèse, ce croisement s'écrit : R/B x B/B. Alors que les plants de génotype B/B fabriquent 100% de gamètes de génotype B, les plants F1, hétérozygotes, produisent 50% de gamètes de génotype B et 50% de gamètes de génotype R. On peut donc prévoir qu'on obtiendra en F'2 :

- 50% de plants de génotype B/B, c'est-à-dire de plants à fleurs blanches ;
- 50% de plants de génotype R/B, c'est-à-dire de plants à fleurs roses.

Les résultats effectifs de ce test-cross montrant une génération faite 56 plants à fleurs roses et 59 plants à fleurs blanches, on peut affirmer que les résultats prévus dans le cadre de l'hypothèse s'accordent avec les résultats réels.

L'hypothèse émise peut donc être validée : la couleur de fleurs chez la « Belle de nuit » est déterminée par un seul couple d'allèles.

10 Liaison ou non de gènes

→ énoncé
p. 20

Lycée Vauvenargues, Aix en Provence

MÉTHODE

- utiliser le premier croisement pour établir les relations de dominance/récessivité entre les allèles
- utiliser le deuxième croisement (test-cross) pour déterminer si les gènes sont liés ou indépendants. L'individu homozygote double récessif ne produisant qu'une seule catégorie de gamètes, ne contenant que des allèles récessifs, les phénotypes de ses descendants sont révélateurs des génotypes des gamètes produits par son partenaire double hétérozygote. L'étude des proportions des gamètes produits par l'individu double hétérozygote renseigne directement sur la liaison ou non des gènes :
- si l'individu double hétérozygote produit quatre types de gamètes (des gamètes parentaux et des gamètes recombinés) en proportions différentes, avec une fréquence de gamètes recombinés inférieure à la fréquence des gamètes parentaux, c'est que les deux gènes sont liés. Les gamètes recombinés ont, dans ce cas, été créés lors de la méiose où s'est produit un crossing-over entre les loci des deux gènes. Il y a eu brassage intrachromosomique. Les proportions différentes des gamètes s'expliquent par le fait que le crossing-over n'a pas lieu, à chaque méiose, entre les loci de deux gènes
- si l'individu double hétérozygote produit quatre types de gamètes en proportions identiques (autant de gamètes parentaux que de gamètes recombinés), c'est que les deux gènes sont indépendants. Un brassage interchromosomique est seul à l'origine des quatre types de gamètes produits en quantités identiques

Etude du premier croisement.

Les deux parents utilisés lors du premier croisement sont de race pure c'est-à-dire homozygotes pour le gène étudié. Chaque parent produit donc une seule sorte de gamètes : des gamètes contenant un allèle « antennes normales » et un allèle « ailes longues » pour le parent [antennes normales, ailes longues] et des gamètes contenant un allèle « antennes courtes » et un allèle « ailes dumpy » pour le parent [antennes courtes, ailes dumpy]. Toutes les cellules-œufs (donc toutes les drosophiles F1) obtenues par fécondation possèdent donc :

- pour le gène de la longueur des antennes, un allèle « antennes normales » et un allèle « antennes courtes » ;
- pour le gène de la forme des ailes, un allèle « ailes longues » et un allèle « ailes dumpy ».

Tous les descendants obtenus en génération F1 sont donc hétérozygotes pour chacun des deux gènes.

Par comparaison du génotype des sujets F1 à leur phénotype macroscopique qui est [antennes normales, ailes longues] on conclut que :

- pour le gène de la longueur des antennes, l'allèle « antennes normales » (que l'on notera c^+) domine l'allèle « antennes courtes » (que l'on notera c) ;
- pour le gène de la forme des ailes, l'allèle « ailes longues » (que l'on notera d^+) domine l'allèle « ailes dumpy » (que l'on notera d).

Etude du deuxième croisement

Deux hypothèses sont possibles concernant la localisation des deux gènes.

- Première hypothèse : les gènes sont situés sur le même chromosome, ils sont liés.
- Deuxième hypothèse : les deux gènes sont situés sur des chromosomes différents, ils sont indépendants.

Dans le second croisement, on réalise un test-cross entre des individus hétérozygotes de la F1 avec des individus $[c, d]$. Le phénotype des individus de la F'2 reflète donc directement le génotype des gamètes fabriqués par l'individu F1.

On observe que la génération F'2 comporte 39% d'individus $[c^+, d^+]$, 39% d'individus $[c, d]$, 11% d'individus $[c^+, d]$, et 11% d'individus $[c, d^+]$.

Les individus F1 ont donc produit, lors de la méiose :

- 39 % de gamètes contenant les allèles c^+ et d^+ ;
- 39 % de gamètes contenant les allèles c et d ;
- 11 % de gamètes contenant les allèles c^+ et d ;
- 11 % de gamètes contenant les allèles c et d^+ .

Les 4 types de gamètes qui peuvent être fabriqués par la F1 ne sont donc pas équiprobables : les gamètes parentaux sont beaucoup plus fréquents que les gamètes recombinés.

Si les deux gènes étaient indépendants, les individus F1 auraient produit, en vertu d'un

brassage interchromosomique, quatre types de gamètes en proportions identiques. Ce n'est pas le cas. On doit donc réfuter la deuxième hypothèse.

Les résultats obtenus ne peuvent s'expliquer que si les gènes sont liés. Le deuxième croisement s'écrit $c^+d^+/cd \times cd/cd$. Les gamètes recombinés de génotype c^+d ou cd^+ produits par les individus F1 ont été créés lors de méioses où s'est produit un crossing-over entre les loci des deux gènes.

11 Brassage génétique

énoncé
p. 21

Lycée Pasteur, Neuilly

ATTENTION

L'énoncé ne précise pas si les gènes étudiés sont liés ou indépendants. Il est nécessaire d'en faire la démonstration au moment d'identifier le type de brassage mis en jeu.

«Démontrez qu'il y a eu brassage génétique au cours de la formation des gamètes chez les individus F1 ... »

- On commence par déterminer les relations de dominance/récessivité entre les allèles à l'aide du premier croisement proposé.
- Chaque parent est de race pure et ne fabrique donc qu'un seul type de gamètes : la souris [poil raide, œil normal] fabrique 100% de gamètes contenant un allèle « poil raide » et un allèle « œil normal » ; la souris [poil frisé, œil mal formé] fabrique 100% de gamètes contenant un allèle « poil frisé » et un allèle « œil mal formé ».
- Les individus F1 ont donc, pour le gène de l'aspect du poil, un allèle « poil raide » et un allèle « poil frisé » et ont, pour le gène de l'aspect de l'œil, un allèle « œil normal » et un allèle « œil mal formé ».
- Or les individus F1 ont tous le phénotype [œil normal, poil raide]. En confrontant leur phénotype macroscopique à leur génotype on déduit que l'allèle « poil raide » domine l'allèle « poil frisé » et que l'allèle « œil normal » domine l'allèle « œil mal formé ».

On peut alors choisir des symboles pour désigner les allèles, par exemple : p^+ = allèle « poil raide » ; p = allèle « poil frisé » ; o^+ = « œil normal » ; o = « œil mal formé »

- Dans un deuxième temps on étudie le deuxième croisement : $F1 \times [o, p]$.

Ce croisement d'un individu hétérozygote avec un individu homozygote récessif est un test-cross. L'intérêt de ce croisement est que les phénotypes des descendants traduisent, par leur nature et leurs proportions, les génotypes des gamètes produits par l'individu F1 et leurs proportions, parce que le partenaire $[o, p]$ ne produit qu'une catégorie de gamètes ne contenant que des allèles récessifs. Ici, on déduit des résultats du test-cross que l'hybride F1 produit 4 types de gamètes, en pourcentages

identiques. Ces gamètes ont pour génotype : o et p ; o^+ et p ; o et p^+ ; o^+ et p^+ .

On arrive à l'idée que les individus F1, d'un génotype unique, ont produit des gamètes variés (plus variés que ceux qui leur ont donné naissance !) : des gamètes parentaux (gamètes de génotype o^+ et p^+ et gamètes de génotype o et p) mais aussi des gamètes recombinés, possédant de nouvelles associations d'allèles (gamètes de génotype o^+ et p et gamètes de génotype o et p^+). On en déduit qu'il y a bien eu brassage génétique lors de la formation des gamètes, c'est-à-dire lors de la méiose.

« ... puis schématisez et commentez le comportement des chromosomes qui, au cours de la méiose, permet d'expliquer ce brassage »

On doit d'abord identifier le type de brassage intervenu lors de la formation des gamètes chez les hybrides F1. Pour cela on analyse les proportions des résultats du test-cross. Les 4 types de gamètes sont produits en quantité identique : cela ne peut s'expliquer que si les deux gènes étudiés sont indépendants. Le brassage génétique à l'origine des 4 gamètes produits est alors un brassage interchromosomique.

Le génotype de l'individu F1 s'écrit o^+/o , p^+/p et peut être représenté de la manière suivante :

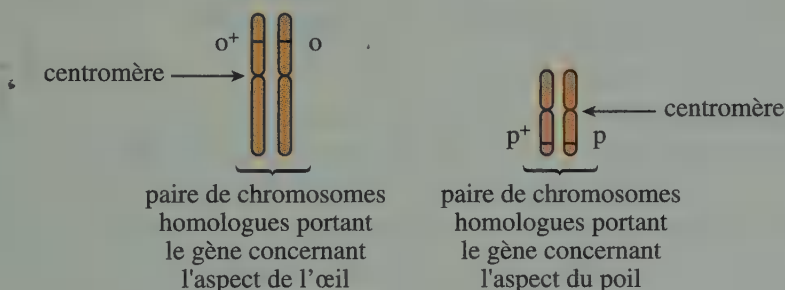


Figure 1.18 – Représentation chromosomique du génotype de l'individu F1

En métaphase 1 de méiose, il y a deux dispositions possibles et équiprobables pour les chromosomes : le brassage interchromosomique est lié à la répartition aléatoire des chromosomes homologues de chaque paire de part et d'autre du plan équatorial et au comportement indépendant des paires de chromosomes entre elles.

Ce brassage préparé en métaphase 1 se concrétise en anaphase 1 au moment où les chromosomes homologues de chaque paire se séparent.

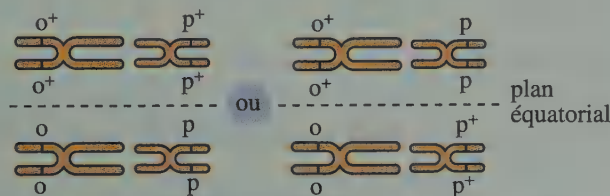


Figure 1.19 – Comportement des chromosomes en métaphase 1 assurant le brassage interchromosomique

Après séparation des chromosomes homologues de chaque paire en anaphase 1 puis séparation des chromatides de chaque chromosome en anaphase 2, on obtient les 4 sortes de gamètes représentés ci-après.

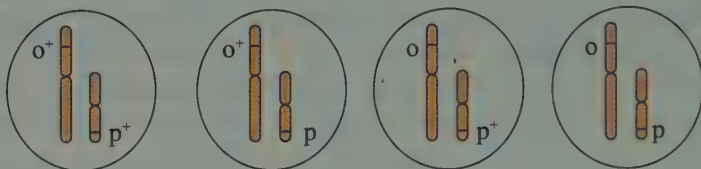


Figure 1.20 – Représentation chromosomique du génotype des quatre types de gamètes obtenus au terme de la méiose chez l'individu $o^+/o, p^+/p$

12 Brassage génétique

→ énoncé
p. 21

Lycée Vauvenargues, Aix en Provence

On étudie la transmission de deux gènes : le gène gouvernant la couleur du pelage représenté par les allèles « noir » et « agouti », et le gène gouvernant la répartition de la coloration représenté par les allèles « uniforme » et « piebald ».

Etude du premier croisement :

Les deux parents utilisés lors du premier croisement sont de race pure et ne produisent donc qu'une seule sorte de gamètes : des gamètes contenant un allèle « noir » et un allèle « uniforme » pour le parent [pelage noir et uniforme] ; des gamètes contenant un allèle « agouti » et un allèle « piebald » pour le parent [pelage agouti et piebald].

Toutes les souris F1 obtenues par fécondation possèdent donc :

- pour le gène de la couleur de pelage, un allèle « noir » et un allèle « agouti » ;
- pour le gène de la coloration, un allèle « uniforme » et un allèle « piebald ».

Tous les individus F1 sont donc hétérozygotes pour chacun des deux gènes.

Par comparaison du génotype des sujets F1 à leur phénotype macroscopique qui est [pelage agouti et uniforme] on conclut que :

- pour le gène de la couleur du pelage, l'allèle « agouti » (que l'on notera n^+) domine l'allèle « noir » (que l'on notera n) ;
- pour le gène de la répartition de la couleur, l'allèle « uniforme » (que l'on notera p^+) domine l'allèle « piebald » (que l'on notera p).

Etude du deuxième croisement :

Le second croisement est un test-cross entre des F1 et des individus $[n, p]$. Les deux allèles n et p étant récessifs, les individus $[n, p]$ sont forcément homozygotes et ne fabriquent donc qu'une seule sorte de gamètes, ne contenant que des allèles récessifs. Le phénotype des individus de la F'2 reflète donc directement le génotype des gamètes fabriqués par l'individu F1.

On observe que la génération F'2 comporte 25% d'individus $[n^+, p^+]$, 25% d'individus

$[n, p]$, 25% d'individus $[n^+, p]$, et 25% d'individus $[n, p^+]$.

Les individus F1 ont donc produit, lors de la méiose :

- 25 % de gamètes contenant les allèles n^+ et p^+ ;
- 25 % de gamètes contenant les allèles n et p ;
- 25 % de gamètes contenant les allèles n^+ et p ;
- 25 % de gamètes contenant les allèles n et p^+ .

Les 4 types de gamètes qui peuvent être fabriqués par la F1 sont donc équiprobables : les gamètes parentaux sont aussi fréquents que les gamètes recombinés.

Les résultats obtenus ne peuvent s'expliquer que si les gènes sont indépendants. Le deuxième croisement s'écrit $n^+/n, p^+/p \times n/n, p/p$. Un brassage interchromosomique est à l'origine des quatre types de gamètes produits en quantités identiques par les individus F1.

On peut illustrer ce raisonnement par des schémas :

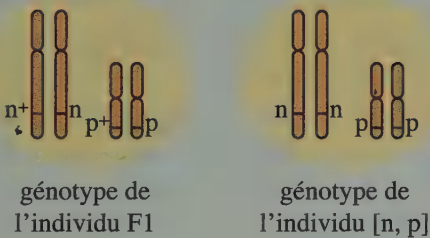


Figure 1.21 – Représentation chromosomique du génotype des parents impliqués dans le deuxième croisement

Chez l'individu F1 de génotype $n^+/n, p^+/p$, il y a en métaphase 1 de méiose deux dispositions possibles et équiprobables pour les chromosomes : le brassage interchromosomique est lié à la répartition aléatoire des chromosomes homologues de chaque paire de part et d'autre du plan équatorial et au comportement indépendant des paires de chromosomes entre elles.

Ce brassage préparé en métaphase 1 se concrétise en anaphase 1 au moment où les chromosomes homologues de chaque paire se séparent. Après séparation des chromosomes homologues de chaque paire en anaphase 1 puis séparation des chromatides de chaque chromosome en anaphase 2, on obtient 4 sortes de gamètes en proportions identiques. Les schémas ci-après illustrent les étapes fondamentales de la méiose assurant la production des 4 sortes de gamètes chez l'individu F1.

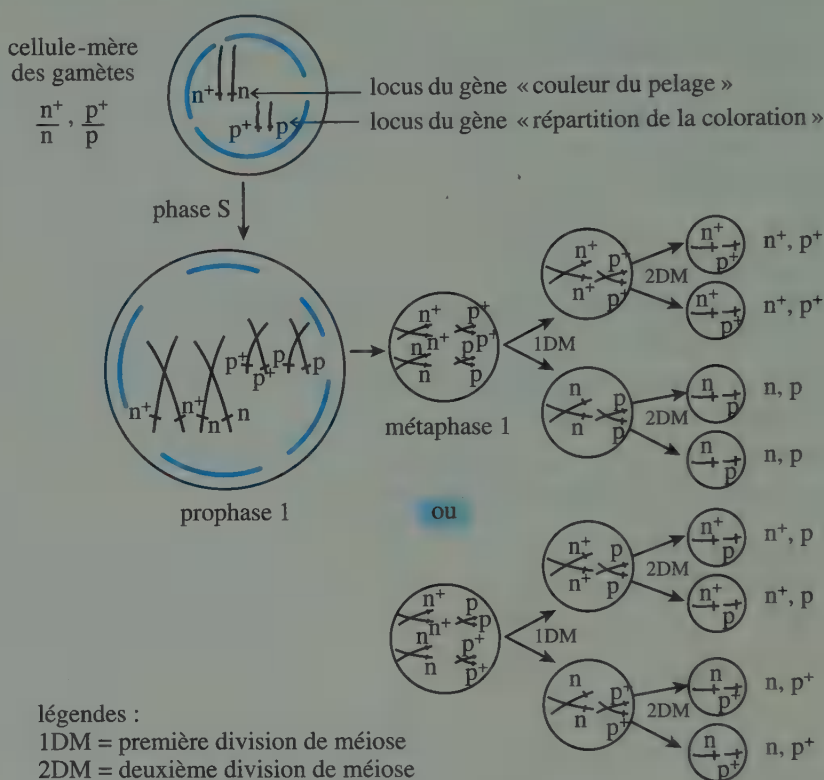


Figure 1.22 – Comportement des chromosomes lors de la méiose chez l'individu F1

On peut ensuite construire un tableau de rencontre des gamètes rendant compte des résultats du second croisement :

Gamètes de l'individu F1 de l'individu [n, p]	Gamètes de l'individu F1			
	n^+, p^+ 1/4	n^+, p 1/4	n, p^+ 1/4	n, p 1/4
n, p 1	$n^+/n, p^+/p$ 25% [n^+, p]	$n^+/n, p/p$ 25% [n^+, p]	$n/n, p^+/p$ 25% [n, p^+]	$n/n, p/p$ 25% [n, p]

13 Duplications

énoncé
p. 22

Lycée Albert de Mun, Nogent-sur-Marne

On constate que les trois hormones présentent des similitudes importantes au niveau de leur séquence en acides aminés :

- la vasotocine (AVT) a en commun 8 acides aminés sur 9 par rapport à l'ocytocine (OT) ou à l'hormone antidiurétique (ADH) ;

- l'ocytocine et l'hormone antidiurétique ont en commun 7 acides aminés sur 9.

De telles similitudes de séquences ne peuvent être attribuées au hasard : on en déduit que ces trois hormones présentes chez l'Homme sont codées par des gènes homologues appartenant à une même famille multigénique.

De tels gènes sont nés par duplication d'un gène ancestral dont les copies ont divergé et acquis de nouvelles fonctions, puisque les trois hormones sont fonctionnelles et possèdent chacune un rôle bien déterminé.

Le mécanisme responsable de la duplication génique est un crossing-over inégal survenu en prophase 1 de méiose.

14 Caryotype anormal

➔ énoncé
p. 22

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

⚠ ATTENTION

Faire au brouillon un travail d'observation et de réflexion, avant d'aborder les propositions. On est en présence d'un caryotype anormal, qui n'est pas une trisomie 21. À l'instar de la trisomie 21, l'anomalie a pour origine un mouvement anormal des chromosomes lors de la méiose et a pour conséquence des troubles phénotypiques. L'anomalie se situe au niveau de la paire de chromosomes sexuels : il y a présence d'un seul chromosome X au lieu d'une paire de chromosomes sexuels. Il y a eu donc un mouvement anormal de la part d'un chromosome sexuel lors de la méiose. Le chromosome absent pouvant être X ou Y, plusieurs scénarii sont envisageables pour expliquer la présence d'un seul chromosome X. Par ailleurs, comme dans le cas de la trisomie 21, le nombre anormal de chromosomes peut résulter d'une anomalie en anaphase 1 ou anaphase 2 de méiose.

Parmi les propositions, on peut retenir les suivantes. Le nombre inhabituel de chromosomes d'une personne atteinte du syndrome de Turner pourrait être dû à :

- une absence de séparation des deux chromosomes homologues de la paire XY en anaphase 1 de méiose
- une absence de séparation des deux chromosomes homologues de la paire XX en anaphase 1 de méiose
- une absence de séparation des deux chromatides du chromosome X en anaphase 2 de méiose

15 Caryotype – Anomalie

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

→ énoncé
p. 23

⚠ ATTENTION

A la différence de ce que vous avez étudié en cours, vous êtes en présence d'une anomalie de caryotype ne s'expliquant pas par un mouvement anormal des chromosomes lors de la méiose. Néanmoins, votre connaissance de la méiose vous permettra d'expliquer, à partir du caryotype anormal du père, comment une méiose « normale » peut conduire à un gamète dont le caryotype est anormal.

La mère possède un caryotype normal. Par contre, le père possède dans son caryotype un chromosome 21 soudé à un chromosome 14, tandis que l'autre chromosome 21 est resté libre. Cette translocation 21 est sans conséquence pour l'individu lui-même (ni perte ni gain de matériel génétique) mais a des conséquences sur les gamètes formés lors de la méiose. Le chromosome 21 soudé restant solidaire du chromosome 14, différentes anaphases 1 de méiose sont possibles. Du fait de ces différentes anaphases, le père produit lors de la méiose différentes sortes de gamètes :

- des gamètes normaux contenant un chromosome 21 et un chromosome 14
- des gamètes contenant un chromosome 14-21
- des gamètes anormaux contenant un chromosome 14 et pas de chromosome 21
- des gamètes anormaux contenant un chromosome 14-21 et un chromosome 21

La naissance d'un enfant trisomique s'explique par la rencontre d'un gamète paternel anormal contenant un chromosome 14-21 et un chromosome 21 avec un gamète maternel normal apportant un chromosome 21. Les avortements spontanés chez la mère correspondent aux embryons ayant un seul chromosome 21, issu de la rencontre d'un gamète paternel anormal contenant un chromosome 14 et pas de chromosome 21 avec un gamète maternel normal apportant un chromosome 21. En effet, dans l'espèce humaine les monosomies (nombre normal de chromosomes pour l'espèce moins un) portant sur un autosome sont létales, éliminées dans les premiers stades de la vie embryonnaire.

Diversité génétique et diversification des êtres vivants

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Une diversité de mécanismes de diversification des génomes
3. Une possible diversification du vivant sans modification des génomes

1 Introduction

Alors que les mutations et les duplications créent respectivement de nouveaux allèles et de nouveaux gènes, les brassages génétiques se chargent d'assurer la transmission aléatoire de ces innovations génétiques d'une génération à la suivante. Il en résulte une diversité de génotypes, donc une diversité de phénotypes.

? PROBLÉMATIQUE

En dehors des mutations, des duplications et du brassage génétique, quels sont les processus de diversification du vivant ?

2 Une diversité de mécanismes de diversification des génomes

2.1 Les hybridations naturelles suivies de polyploïdisation

2.1.1 La notion d'hybridation interspécifique et ses conséquences

On parle généralement d'hybridation pour désigner le croisement entre deux variétés différentes d'une même espèce. Toutefois, le croisement entre deux individus d'espèces différentes est tout à fait possible. Dans la très grande majorité des cas, l'hybridation interspécifique conduit à des descendants infertiles en raison d'un mauvais appariement des chromosomes homologues lors de la méiose.

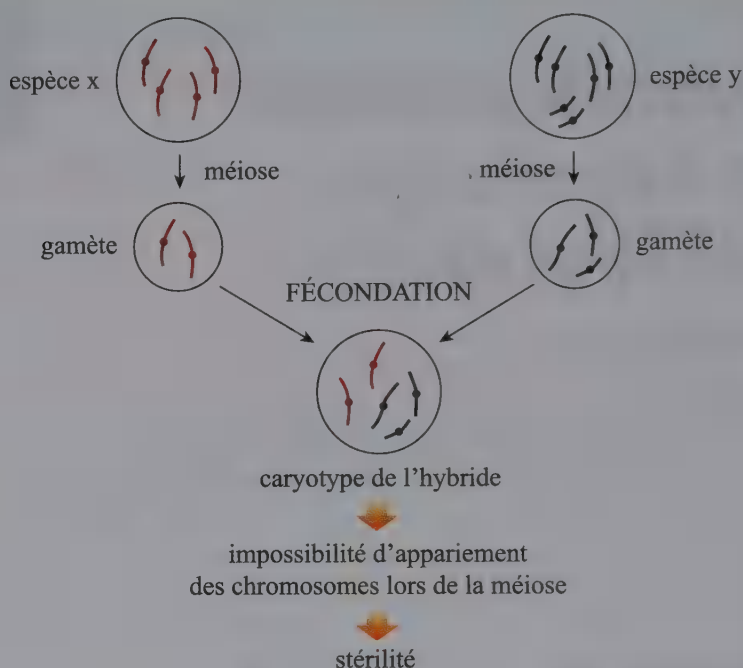


Figure 2.1 – Fécondation entre deux espèces conduisant à un hybride stérile

2.1.2 La stérilité des hybrides contournée par la polyploïdisation

Dans certains cas, à l'occasion d'erreurs (cas où l'ADN est dupliqué sans division de la cellule), le stock chromosomique peut accidentellement doubler. Cela rend possible la méiose chez l'hybride, donc sa fertilité est assurée. On obtient des individus polyploïdes c'est-à-dire dont le jeu de chromosomes est présent en plus de deux exemplaires. Leurs caryotypes, et donc leurs génomes, sont différents de ceux des espèces d'origine. Par conséquent, ces individus montrent des caractéristiques nouvelles. On est en présence d'un premier exemple de modification du génome indépendant des mutations et des brassages génétiques, et source possible de diversification du vivant.

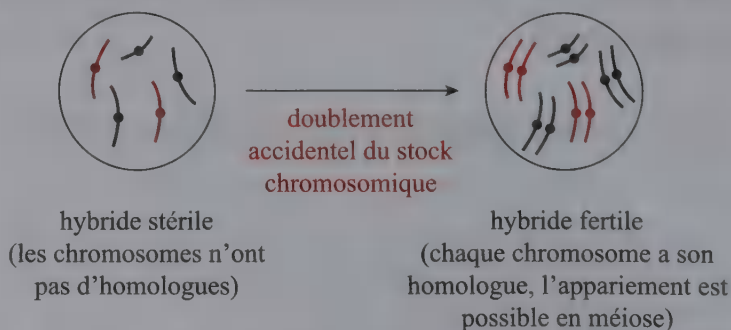


Figure 2.2 – Déroulement d'une polyploïdisation

2.1.3 L'importance de la polyploïdisation dans le monde vivant

Le phénomène de polyploïdisation est assez rare dans le règne animal. Les végétaux sont plus facilement sujets à la polyploïdie. De nombreuses espèces cultivées par l'homme sont polyploïdes. Par exemple, le triticale résulte d'une hybridation entre le blé et le seigle. Cette plante combine des caractéristiques intéressantes du blé (bon rendement) et du seigle (résistance au froid intermédiaire entre celle du blé et du seigle, résistance aux maladies).

D'une manière générale, on estime que 70% des espèces de plantes à fleurs ont connu au moins un événement de polyploïdisation.

2.2 Le transfert horizontal de gènes

Lorsqu'un organisme intègre du matériel génétique provenant d'un autre organisme sans en être le descendant, on parle de transfert horizontal de gènes. Si ce transfert est intentionnellement réalisé par l'homme à l'occasion de transgénèse et de thérapie génique somatique, l'existence de processus naturels de transfert horizontal de gènes est avérée. À titre d'exemple, l'analyse du génome du puceron montre la présence de gènes transférés à partir de champignons et permettant la production de caroténoïde chez le puceron.

On est en présence d'un deuxième exemple de modification du génome, indépendant des mutations et des brassages génétiques, et source possible de diversification du vivant.

Les modalités du transfert horizontal de gènes sont variées :

- de l'ADN libre présent dans le milieu extracellulaire peut être intégré à l'intérieur d'une cellule particulière d'un organisme, puis intégré au génome de cet organisme. On parle de transformation.
- des organismes peuvent s'échanger du matériel génétique, en particulier des plasmides (petits chromosomes bactériens supplémentaires) : deux cellules entrent en contact et s'échangent toute une partie de leur matériel génétique. On parle de conjugaison. Cette pratique, très répandue chez les bactéries, serait responsable du transfert de gène de la résistance aux antibiotiques entre différentes espèces de bactéries.
- l'ADN peut être transféré d'une espèce à une autre par l'intermédiaire de virus. Lorsqu'un virus s'introduit dans une cellule-hôte, il y intègre son matériel génétique pour le faire s'exprimer et donner naissance à de nouvelles particules virales.

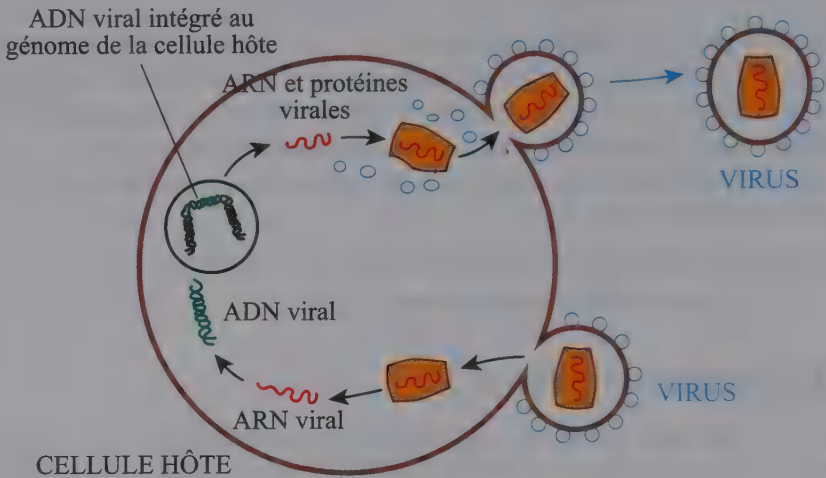


Figure 2.3 – Intégration d'un génome viral dans le génome d'une cellule-hôte

À cette occasion, une partie du matériel génétique de l'hôte peut s'intégrer par erreur dans les particules virales puis, si le virus change d'hôte, passer d'une espèce à une autre. On parle de transduction. D'autre part, de l'ADN viral peut persister dans le génome de la cellule-hôte

Le phénomène de transfert horizontal de gènes n'est pas négligeable : on estime par exemple que le génome humain contient environ 10% d'ADN d'origine viral.

➔ À RETENIR

La polyploïdisation et le transfert horizontal de gènes représentent deux mécanismes participant à la diversification du vivant.

Voir exercices 4, 6 et 7.

2.3 L'implication des gènes dans le développement

2.3.1 L'existence et l'importance de gènes impliqués dans le développement

Chez les organismes eucaryotes pluricellulaires, des gènes particuliers baptisés gènes du développement interviennent pour construire le plan d'organisation caractéristique de l'espèce. Les gènes du développement montrent deux caractéristiques importantes :

- leur expression est limitée dans le temps et dans l'espace au cours du développement de l'individu :

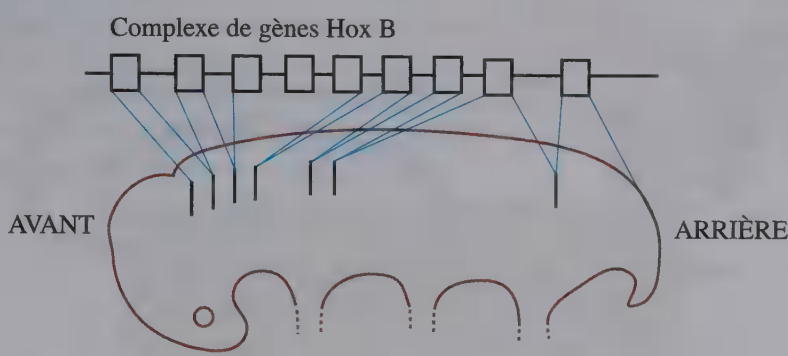


Figure 2.4 – Position d'expression des gènes du développement dans l'embryon de Souris (les gènes HoxB sont des gènes du développement)

- leurs séquences montrent d'importantes homologies, y compris chez des espèces différentes :

EYELESS ATGGCTCACAAGGGTCACAGTGGAGTAATCAGCTGGGTGGCGTTTGTGGAGGAAGGCCCTTGCCAGATTCAACACGGCAAAAAATTGCGAACTGGCACATTCTGGAGCTCGGCCATG
 ANIRIDIA — ATG—G—CA—C—G—C—T—C—CAAC—GC—AC—G—C—C—C—G—G—A—G—A—T—CAGC—G—C—G—
 SMALLEYE — ATG—G—CA—C—G—C—T—C—CAAC—GC—AC—G—C—C—C—G—G—C—A—G—A—T—CAGC—G—C—G—

Figure 2.5 – Séquences nucléotidiques de différents gènes du développement

(smalleye, aniridia et eyeless sont des gènes du développement utilisés pour la formation de l'œil respectivement chez la souris, l'homme et la drosophile)

gène \ gène	eyeless	aniridia	smalleye
eyeless	100%	53,52%	54,21%
aniridia		100%	93,08%
smalleye			100%

Tableau 2.1 – Tableau des ressemblances (%) entre les séquences nucléotidiques de gènes du développement d'espèces différentes

2.3.2 Les conséquences possibles des modifications de l'expression des gènes du développement

Au sein du groupe des vertébrés tétrapodes, l'exemple des serpents permet de comprendre comment, à partir d'un même ensemble de gènes homologues, commun à des espèces différentes, on obtient des phénotypes différents lors du développement. Le plan d'organisation des serpents montre deux particularités : toutes les vertèbres portent des côtes et il n'y a pas de formation de membres. Chez ce groupe, les gènes Hoxc-6 et Hoxc-8 sont exprimés ensemble tout le long de la colonne vertébrale. Chez les autres groupes de tétrapodes, deux membres antérieurs et deux membres postérieurs se forment là où, respectivement, le gène Hoxc-6 ou le gène Hoxc-8 est le seul à s'exprimer.

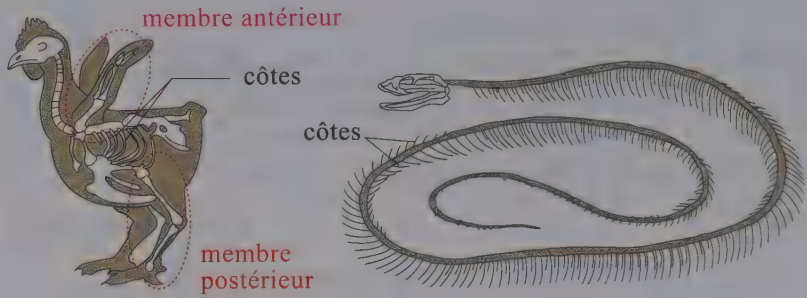


Figure 2.6 – Skelette de poule (à gauche) et de couleuvre (à droite)

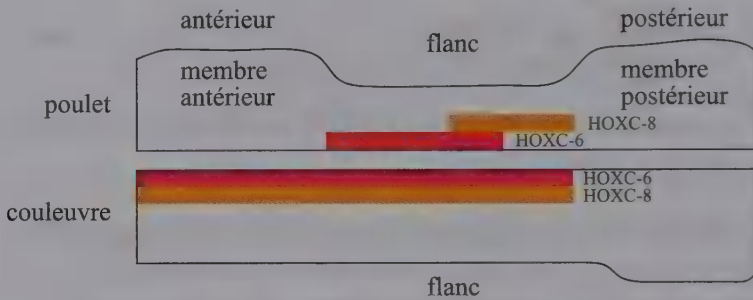


Figure 2.7 – Représentation simplifiée des territoires d'expression des gènes de développement Hoxc-6 et Hoxc-8 chez les embryons de poulet et de couleuvre

De cet exemple, on retire l'idée que la modulation de la position du territoire d'expression d'un gène du développement, ou du moment du développement où il intervient, a pour effet de « construire » des organismes très différents à partir d'un même kit de gènes du développement.

➔ À RETENIR

Des gènes du développement, communs à de nombreuses espèces et montrant des homologies de séquences, sont utilisés pour gouverner le plan d'organisation des organismes. On reconnaît, au sein de la biodiversité actuelle, des formes vivantes très différentes qui ont pour origine des modifications dans la chronologie, le lieu et l'intensité de l'expression de ces gènes.

Voir exercice 5.

1 Une possible diversification du vivant sans modification des génomes

3.1 L'exemple des symbioses

On parle de symbiose pour désigner une association à bénéfice réciproque entre deux

organismes appartenant à des espèces différentes. Par exemple, dans les sols, les mycorhizes sont le résultat de l'association symbiotique entre des champignons et les racines des plantes. En s'associant au système racinaire des plantes, les champignons mycorhiziens créent un réseau dans le sol permettant d'accroître la capacité d'absorption de l'eau et des éléments nutritifs.



Figure 2.8 – Vue microscopique d'une racine mycorhizée (à droite) et non mycorhizée (à gauche)

La nutrition de la plante est améliorée par transfert du champignon vers la plante. De son côté, le champignon (organisme non photosynthétique) reçoit des matières organiques élaborées par la plante. On estime qu'environ 80 % des végétaux développent des mycorhizes.

➔ À RETENIR

L'exemple des symbioses, où les caractéristiques du symbionte sont améliorées par rapport à celles de l'organisme isolé, illustre le fait qu'une diversification des êtres vivants est possible sans modification des informations génétiques.

3.2 L'exemple de la transmission de caractères comportementaux d'une génération à l'autre par voie non génétique

Dans le monde animal, au sein du groupe des vertébrés, on distingue des comportements culturels, appris au contact des individus. Par exemple, il est démontré que certains oiseaux sont capables d'apprendre, par imitation, un chant qu'ils entendent. C'est ainsi qu'à l'échelle d'une espèce, une diversité de chants (caractérisés par le nombre et la fréquence de sons) est élaborée d'une population à l'autre au gré des apprentissages.

➔ À RETENIR

De nouveaux phénotypes comportementaux peuvent apparaître et se transmettre dans une population par voie non génétique, à l'occasion d'apprentissages. Cela illustre une nouvelle fois le fait qu'une diversification des êtres vivants est possible sans modification des informations génétiques.

1

QCM

Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 53

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1 Si un hybride résulte du croisement de deux individus qui n'ont pas le même nombre chromosomique :
 - a il sera forcément stérile
 - b il sera forcément fertile
 - c il sera éventuellement fertile si un événement de polyploïdisation survient
- 2 Le transfert horizontal de gènes :
 - a est un événement exceptionnel
 - b est un événement qui enrichit le génome
 - c concerne uniquement les bactéries
- 3 Les gènes du développement :
 - a sont parfaitement identiques d'une espèce à l'autre
 - b s'expriment différemment d'une espèce à l'autre
 - c commandent la mise en place du plan d'organisation

2

Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 53

Répondez brièvement aux questions suivantes :

- 1 Après avoir défini ce qu'est le transfert horizontal de gènes, présentez-en les modalités possibles.
- 2 Présentez l'implication des gènes du développement dans la diversification des êtres vivants.

3

Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 53

Qui suis-je ?

- 1 Une espèce possédant un jeu de chromosomes en plus de deux exemplaires.
- 2 Une association à bénéfice réciproque entre deux espèces.
- 3 L'association symbiotique entre un champignon et les racines d'une plante.

4

Hybridation – Polyploïdisation

★

10 min

→ corrigé
p. 54

Lycée Charlemagne, Paris

Les espèces végétales sont capables de se reproduire avec des individus d'autres espèces, produisant des hybrides dits « interspécifiques ».

Connu dès la fin du 19^e siècle, le tritcale est une espèce fertile, issue du croisement, effectué par l'homme, entre le blé et le seigle, en 1876 ; d'abord stérile, cette espèce a subi un doublement spontané de son stock chromosomique (ou polyploïdisation) vers 1888, ce qui a permis sa culture. Cette céréale allie la rusticité du seigle (résistance au froid et aux maladies) et la forte productivité du blé. Le potentiel de rendement du tritcale est très élevé et peut dépasser les 100 quintaux par hectare, et son rendement en paille est supérieur de 30 à 50% à celui du blé ou de l'orge. Le tritcale n'est cultivé à grande échelle que depuis les années 50, principalement en Europe (3/4 de la production)

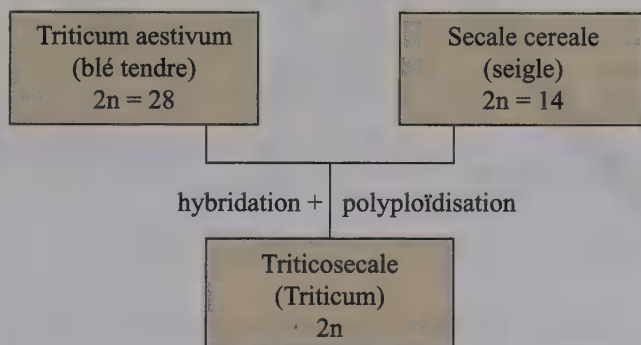
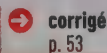


Figure 2.9 – Schéma de la genèse de l'espèce « Tritcale ».

A l'aide de schémas clairs, montrez comment l'Homme a pu contribuer à l'apparition d'une nouvelle espèce et expliquez quel est son intérêt. On donnera les vrais caryotypes des espèces obtenues après hybridation puis après polyploïdisation.

5 Polyploïdie – diversification



Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

De nombreuses plantes cultivées sont naturellement polyploïdes. C'est le cas de la luzerne (tétraploïde), la pomme de terre (tétraploïde), le blé (hexaploïde) et certaines variétés de pommier (triploïdes).

En 1928, G. Karpechenko chercha à obtenir une plante hybride associant les particularités intéressantes de deux plantes : le chou (*Brassica oleacea*) pour ses feuilles et le radis (*Raphanus sativus*) pour ses racines. Il réalisa un croisement entre ces deux plantes et obtint une descendance hybride viable en première génération, qui s'avéra dans un premier temps stérile. Néanmoins, quelques graines furent un jour produites donnant une nouvelle plante fertile, dénommée *Raphanobrassica*. Malheureusement, *Raphanobrassica* avait des feuilles de radis et des racines de choux !

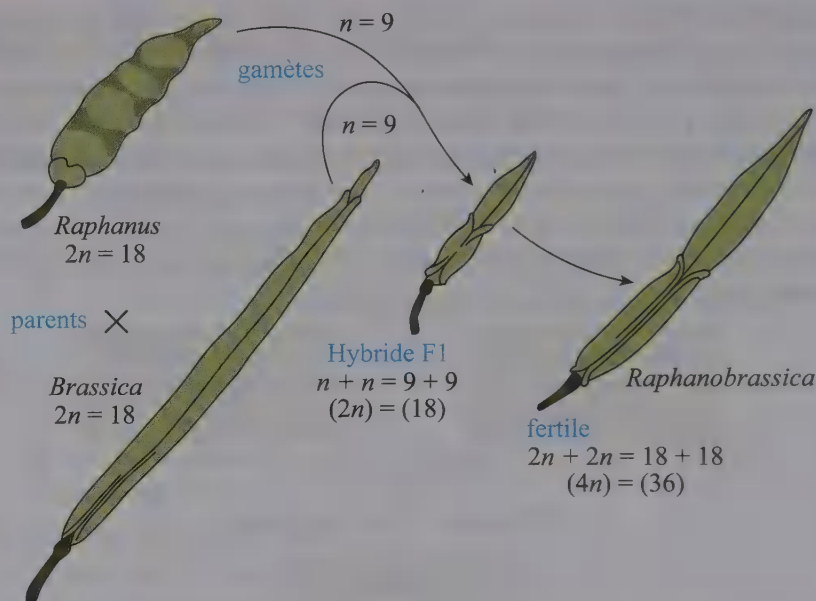


Figure 2.10 – Déroulement des travaux de Karpechenko

1. Expliquez la stérilité des hybrides F1.
2. Présentez le mécanisme biologique expliquant la fertilité de la nouvelle plante « Raphanobrassica ». Vous ne chercherez pas à expliquer le phénotype de Raphanobrassica.

6 Transfert horizontal – Gène – Virus



15 min

corrigé
p. 55

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Parmi les mammifères placentaires, les grands primates expriment une protéine, la syncytine. Les scientifiques pensent que le gène codant pour la syncytine est d'origine virale.

À partir d'arguments tirés des documents proposés, justifiez le point de vue de la communauté scientifique.

DOCUMENT 1 – Informations scientifiques sur la syncytine

La syncytine joue un rôle essentiel lors de la formation du placenta durant la gestation. Chez la femme enceinte, la syncytine est fortement exprimée dans le tissu placentaire. En faisant fusionner les cellules entre elles, comme le fait un virus pour entrer dans une cellule, les syncytines permettent la fabrication d'une « nappe cellulaire », le syncytiotrophoblaste. Ce dernier est le constituant essentiel du placenta.

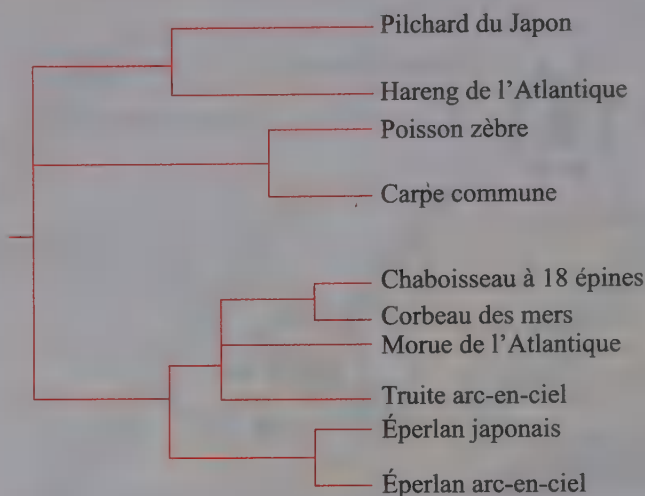


Figure 2.13 – Arbre de parenté déduit de la comparaison de l'ARN16S de différentes espèces

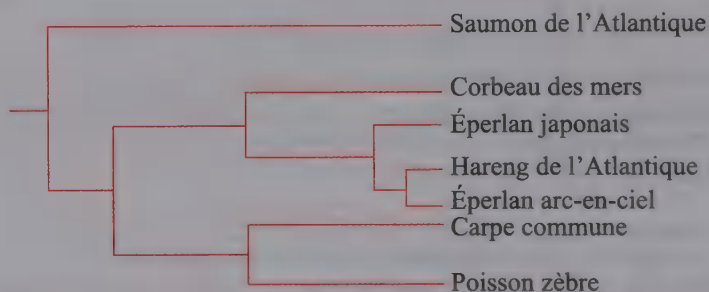


Figure 2.14 – Arbre de parenté déduit de la comparaison du gène de la lectine II-AFP

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. Dites en quoi l'hypothèse des scientifiques permettrait d'expliquer la contradiction entre les deux arbres.

8 Symbiose – Diversification



15 min

→ corrigé
p. 56

Nouveau programme

« L'interaction entre bactéries de la famille des Rhizobiaceae et leurs plantes-hôtes de la famille des Légumineuses conduit à la formation de nouveaux organes racinaires, les nodosités, dans lesquelles les bactéries fixent l'azote atmosphérique pour former de l'ammonium » (source : Peter MERGAERT, CNRS, Gif sur Yvette).

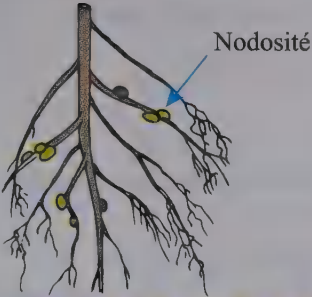


Figure 2.15 – Nodosités sur la racine d'une plante de la famille des légumineuses

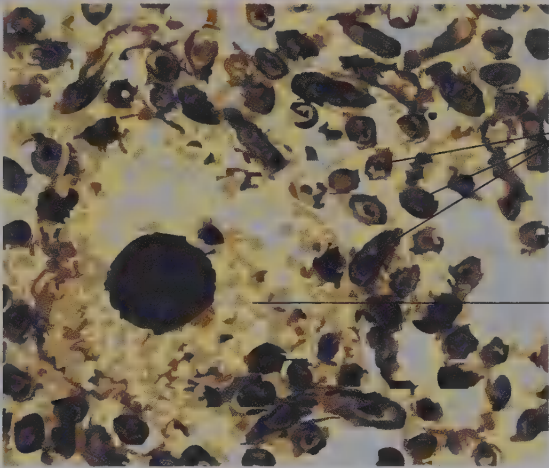


Figure 2.16 – Cellule de nodosité observée au microscope (x1000)

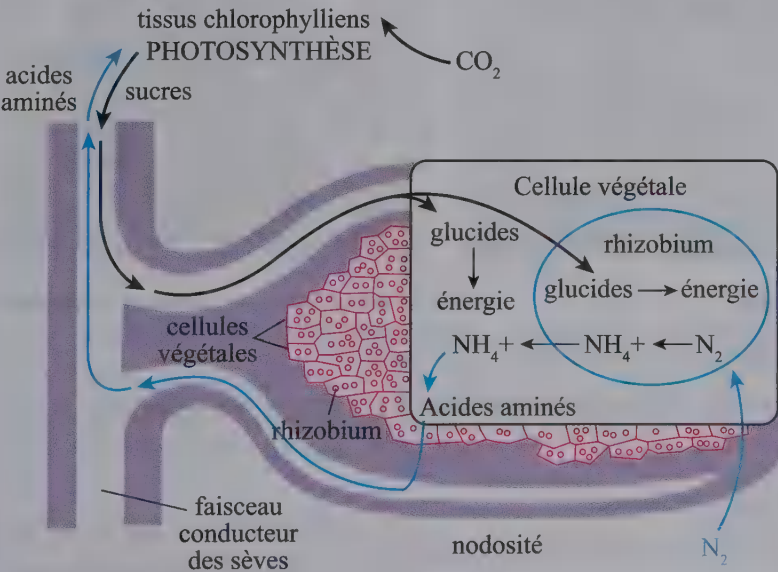


Figure 2.17 – Echanges de matière entre le Rhizobium et la plante

Les plantes de la famille des légumineuses (pois, fève, soja, lentille, haricot ...) sont réputées pour leur richesse en protéines.

À l'aide du corpus documentaire :

1. Identifiez l'association entre les deux êtres vivants.
2. Dites en quoi cette association modifie le phénotype de la plante, puis retrouvez le concept que cette association illustre.

9 Vivant – Diversification



15 min

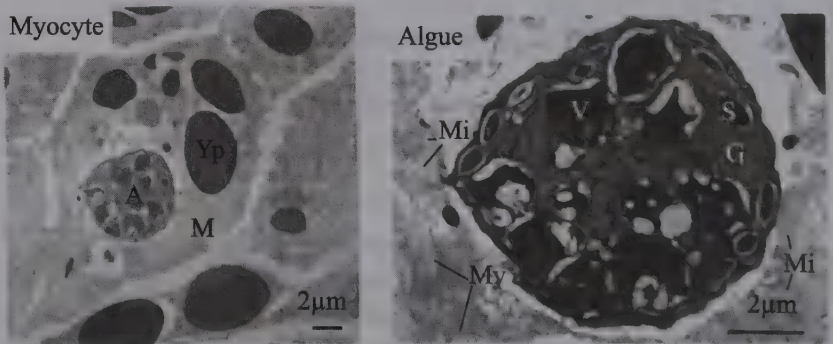
→ corrigé
p. 57

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 dites 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 œufs 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 œufs des salamandres. L'algue n'a jamais été observée à l'état libre dans le milieu.



A : algue

M : Cytoplasme du Myocyte

Yp : Granule de vitellus (réserves)

Mi : Mitochondrie

My : Myofibrille

S : Granule d'amidon

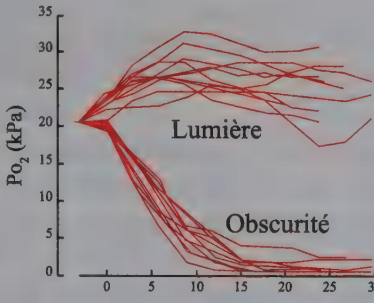
G : Grana du chloroplaste

V : vacuole

Figure 2.18 – Observation microscopique de cellules musculaires d'embryon de salamandre

Myocyte : cellule musculaire

Myofibrille : protéine des cellules musculaires



Profondeur à l'intérieur de l'œuf d'A. maculatum.

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 2.19 – Mesure de la pression de dioxygène dans les œufs 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) :

- 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

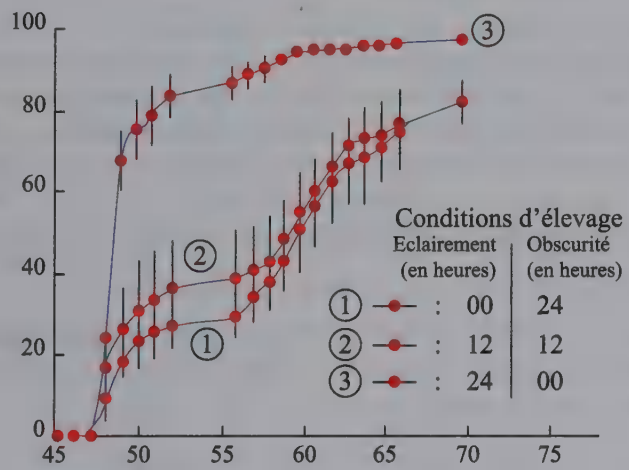


Figure 2.20 – Résultats d'une expérience (expérience 2)

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.

10

Comportement- Diversification

★★

10 min

→ corrigé p. 58

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Cet exercice est décliné en deux versions : une version QCM et une version « question

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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 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 hominides.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 4300 ans. L'équipe d'archéologues dirigée par Julio Mercader a effectué des recherches sur trois sites de la forêt de Taï. Ils 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.

1 QCM Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 44

Propositions exactes :

1 c ; 2 b ; 3 b

2 Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 44

- On parle de transfert horizontal de gènes lorsqu'un organisme intègre du matériel génétique provenant d'un autre organisme sans en être le descendant. Il existe trois grandes modalités de transfert horizontal de gènes :
 - la transformation : de l'ADN libre présent dans le milieu extracellulaire est intégré à l'intérieur d'une cellule particulière d'un organisme, puis intégré au génome de cet organisme ;
 - la conjugaison : des organismes peuvent s'échanger du matériel génétique, en particulier des plasmides (petits chromosomes bactériens supplémentaires) ;
 - la transduction : l'ADN peut être transféré d'une espèce à une autre par l'intermédiaire d'un virus.
- Les gènes du développement interviennent pour construire le plan d'organisation caractéristique de l'espèce. Leur expression est délimitée dans le temps et dans l'espace au cours du développement de l'individu. Par conséquent, la modulation de la position du territoire d'expression d'un gène du développement, ou du moment du développement où il intervient, peut avoir pour effet de « construire » des organismes très différents donc de contribuer à la diversification des êtres vivants.

3 Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 44

- Espèce polyploïde.
- Symbiose.
- Mycorhize.

4 Hybridation – Polyploïdisation

→ énoncé
p. 44

Lycée Charlemagne, Paris

Dans un premier temps, il s'agit d'expliquer l'obtention d'une nouvelle espèce : le Triticale. L'espèce parentale *Triticum aestivum* (blé tendre), de formule chromosomique $2n = 28$, produit des gamètes $n = 14$. L'espèce parentale *Secale cereale* (seigle), de formule chromosomique $2n = 14$ produit des gamètes $n = 7$.

La rencontre des gamètes de ces deux espèces différentes, lors d'une hybridation interspécifique, donne des individus stériles. En effet, les chromosomes n'ont pas d'homologues, ce qui rend la méiose impossible.

Un événement de polyploïdisation permet de doubler accidentellement le stock de

chromosomes. L'hybride est désormais fertile. Il produit des gamètes $n = 21$ et ses représentants forment une nouvelle espèce : Tricosecale (Triticum) ($2n = 42$).

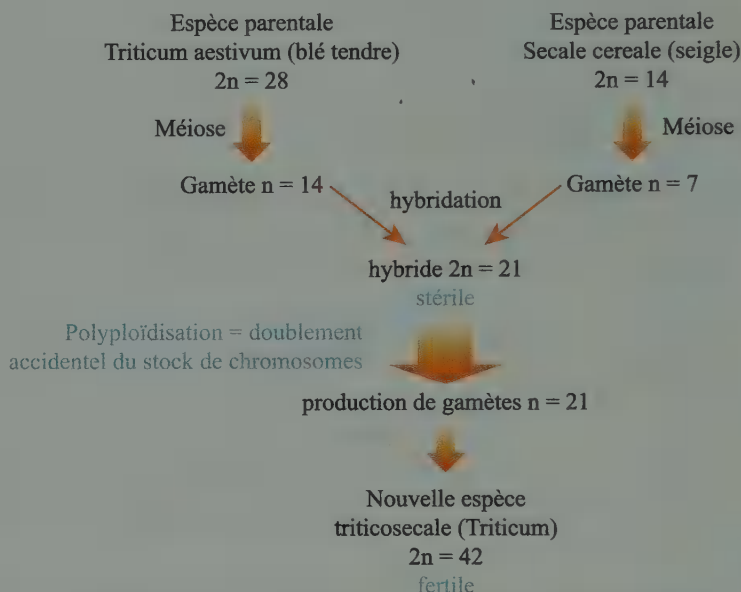


Figure 2.21 – Mécanismes d'apparition de la nouvelle espèce Tricosecale (*Triticum*)

Dans un second temps, on doit montrer l'intervention et l'intérêt de l'Homme.

Le croisement entre le blé et le seigle a été dirigé par l'Homme, en 1876. L'hybride obtenu (l'espèce Triticale) allie les qualités intéressantes du seigle (résistance au froid et aux maladies) et du blé (forte productivité). La nouvelle espèce, créée grâce à l'Homme, est donc très intéressante à cultiver.

5 Polyploïdie – diversification

énoncé
p. 45

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1. Les hybrides F1 obtenus par Karpechenko possèdent deux lots de chromosomes apportés par des gamètes provenant d'espèces différentes. Par conséquent il n'y pas d'homologie parfaite entre les deux lots haploïdes de chromosomes malgré leur formule chromosomique identique $n = 9$. La méiose est impossible en raison d'un mauvais appariement des chromosomes homologues, ce qui explique la stérilité des hybrides F1.
2. Le mécanisme biologique expliquant la fertilité de la nouvelle plante « *Raphanobrassica* » est la polyploïdisation. Il aura suffi que le stock chromosomique d'un hybride F1 double accidentellement (passage de deux lots de $n = 9$ chromosomes à deux lots de $2n = 18$ chromosomes) pour que chaque chromosome possède désormais son homologue. La méiose est alors possible, ce qui explique la fertilité de la nouvelle plante obtenue.

6 Transfert horizontal – Gène – Virus

→ énoncé
p. 46

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

MÉTHODE

Chercher à collecter une diversité d'arguments pour justifier le point de vue de la communauté scientifique. Si le gène codant la syncytine est d'origine virale, la protéine qu'il code doit ressembler à une protéine virale sur le plan de sa structure (homologie de séquence) et de ses propriétés.

Le document 1 présente le rôle physiologique de la syncytine. Lors de la formation du syncytiotrophoblaste, constituant essentiel du placenta, les syncytines ont pour rôle de faire fusionner les cellules entre elles, comme le fait un virus pour entrer dans une cellule-cible. Selon le document 2, lorsqu'un virus doit rentrer dans une cellule-cible, l'enveloppe virale fusionne avec la membrane plasmique de la cellule-cible après une étape de reconnaissance entre des protéines d'enveloppe virale et des protéines réceptrices ancrées dans la membrane de la cellule-cible. Selon le document 3, le virus HERV-W (human endogenous retrovirus) possède dans son enveloppe virale une protéine dont la séquence d'acides aminés montre d'importantes ressemblances avec celle de la syncytine humaine : il n'y a que 14 acides aminés différents sur les portions comparées, qui comportent 229 acides aminés.

Le scénario d'une origine virale du gène codant la syncytine est donc corroboré par deux constats : d'une part la syncytine des mammifères placentaires et la protéine d'enveloppe du virus HERV-W jouent un rôle identique en permettant la fusion de deux systèmes membranaires, d'autre part les deux protéines montrent des similitudes de séquences trop nombreuses pour pouvoir être imputables au hasard.

7 Transfert horizontal – Phylogénies

→ énoncé
p. 47

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

MÉTHODE

La lecture comparée des deux arbres est rendue difficile par le fait que ce ne sont pas tout à fait les mêmes lots d'espèces qui sont représentés dans chaque arbre. Pour contourner cet obstacle, il est conseillé de recopier chaque arbre en ne conservant que les espèces qui figurent dans chacun des deux arbres, soient : le hareng de l'Atlantique, le poisson zèbre, la carpe commune, le corbeau des mers, l'éperlan arc-en-ciel et l'éperlan japonais.

1. Après avoir éliminé les espèces présentes dans un seul des deux arbres afin de faciliter leur lecture, on obtient les deux arbres ci-après :

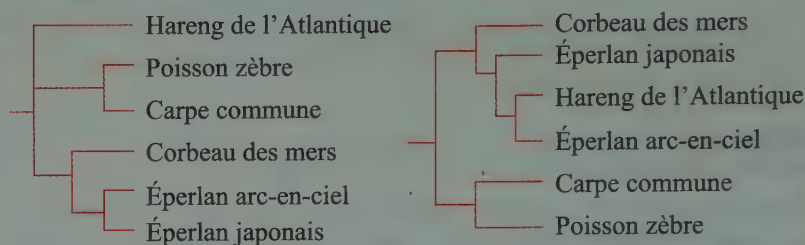


Figure 2.22 – Deux arbres de parenté entre 5 espèces, déduits de la comparaison de l'ARN16S (à gauche) et du gène de la lectine II-AFP (à droite)

Si l'on se base sur l'arbre de parenté déduit de la comparaison de l'ARN16S des cinq espèces, l'Eperlan arc-en-ciel est plus proche du Corbeau des mers qu'il ne l'est du Hareng de l'Atlantique. Par contre, la lecture de l'arbre de parenté déduit de la comparaison du gène de la lectine II-AFP indique que l'Eperlan arc-en-ciel est plus proche du Hareng de l'Atlantique qu'il ne l'est du Corbeau des mers. Il y a donc une contradiction entre ces deux arbres.

2. L'hypothèse des chercheurs est que le gène de la lectine II-AFP, initialement présent chez le Corbeau des mers, a été ensuite transmis horizontalement à d'autres espèces. Si c'est le cas, cela représente un apport d'ADN (celui du gène de la lectine) aux autres espèces. Lorsque ce gène est ensuite utilisé par les biologistes pour construire des relations de parenté, des similitudes vont se manifester, qui sont la traduction du transfert horizontal de gène mais ne correspondent pas à de réelles relations de parenté. L'hypothèse des chercheurs est donc cohérente pour expliquer la contradiction entre les deux arbres.

8 Symbiose – Diversification

énoncé
p. 48

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1. D'après l'image de cellule de nodosité observée au microscope, les bactéries du genre *Rhizobium* sont hébergées dans le cytoplasme des cellules des nodosités des racines des plantes de la famille des Légumineuses. D'après la figure schématisant les échanges de matière entre le *Rhizobium* et la plante, les bactéries du genre *Rhizobium* sont capables, dans la nodosité, de convertir le diazote atmosphérique (N_2) en ions ammonium (NH_4^+), que la plante utilise comme source d'azote pour fabriquer ses acides aminés. En contrepartie, des glucides fabriqués dans les tissus chlorophylliens de la plante lors de la photosynthèse sont transférés dans les cellules de la nodosité et utilisés par le *Rhizobium*. On reconnaît donc entre les deux êtres vivants une association à bénéfice réciproque, c'est-à-dire une symbiose : alors que le *Rhizobium* bénéficie des produits de la photosynthèse élaborés par la plante, cette dernière tire un avantage de la présence du *Rhizobium* pour sa nutrition azotée.
2. Il est indiqué que les plantes de la famille des Légumineuses sont réputées pour leur richesse en protéines. Il s'agit d'une caractéristique phénotypique acquise grâce à la symbiose avec le *Rhizobium*, puisque la fixation du diazote atmosphérique par

ce dernier est à l'origine de la production par la plante d'acides aminés et donc des protéines qu'ils constituent. Cette association symbiotique entre le *Rhizobium* et sa plante-hôte, où les caractéristiques du symbionte sont améliorées (production importante de protéines) par rapport à celles de la plante isolée, illustre le fait qu'une diversification des êtres vivants est possible sans modification des génomes.

9 Vivant – Diversification

→ énoncé
p. 50

Lycée Notre Dame du Grand Champ, Versailles

On dispose d'un corpus de documents contenant des informations et des données expérimentales sur deux espèces différentes : la salamandre ponctuée *Ambystoma maculatum* et l'algue verte *Oophila amblystomatis*. À partir de l'exploitation des documents, on doit identifier le mécanisme à l'origine des caractéristiques de la salamandre ponctuée et dire en quoi il participe à la diversification du vivant.

Le premier document montre des images de myocytes d'embryon de salamandre. On peut voir que l'algue, organisme unicellulaire représenté sur l'image de droite, est hébergée dans le cytoplasme du myocyte. On a donc la preuve d'une association intime et interspécifique entre deux êtres vivants. On peut soupçonner une symbiose, à condition de prouver que l'association est à bénéfice réciproque.

On dispose pour cela d'une série d'expériences :

L'expérience 1 consiste à mesurer les variations de la pression partielle en dioxygène dans les oeufs de salamandre hébergeant l'algue, dans deux conditions différentes (lumière et obscurité). Les mesures faites à la lumière montrent une pression partielle en dioxygène importante, voisine de 30 kPa, quelle que soit la profondeur de l'œuf à laquelle on la mesure. Il est indiqué qu'en l'absence de l'algue, aucune variation de la quantité de dioxygène dans les œufs n'est observée. On peut en déduire que la présence de l'algue *Oophila* dans les œufs d'*Ambystoma* influence la quantité de dioxygène à l'intérieur des œufs. Les mesures faites à l'obscurité montrent une pression en dioxygène moins importante dans les oeufs, en particulier en profondeur de l'œuf. L'influence de l'algue sur la teneur en dioxygène des œufs est donc dépendante de la lumière, probablement parce que l'algue dégage du dioxygène à la lumière en effectuant la photosynthèse. On a ici la preuve de l'effet positif de l'algue sur la salamandre (oxygénation des œufs de salamandre à la lumière)

L'expérience 2 consiste à mesurer le pourcentage d'embryons de salamandre qui éclosent, dans différentes conditions d'élevage. Sur une durée de 24 heures, les oeufs sont soit éclairés 12 heures, soit éclairés 24 heures, soit laissés à l'obscurité. Les résultats indiquent un plus fort pourcentage d'embryons éclos pour le lot ayant reçu la plus grande durée d'éclairement. On en déduit que l'éclairement des œufs de salamandre hébergeant des algues favorise le développement des embryons. On a la confirmation de l'effet positif de la présence de l'algue (développement plus important des embryons à condition qu'ils soient éclairés, c'est-à-dire à condition que l'algue hébergée par les œufs puisse effectuer la photosynthèse). Le texte associé à l'expérience 2 indique que la multiplication de l'algue est impossible en dehors de l'embryon et précise que les algues *Oophila* ont besoin des déchets produits par l'embryon pour

pouvoir se multiplier. On a la preuve de l'effet positif de la salamandre (nutrition de l'algue grâce aux déchets de l'embryon) sur l'algue.

L'ensemble des documents a donc montré une association intime, à bénéfice réciproque, entre deux organismes hétérosécifiques. Il s'agit bien d'une symbiose.

Ce mécanisme permettant au symbionte d'acquérir des caractéristiques nouvelles par rapport à celles des deux organismes vivant séparément, on considère qu'il participe à la diversification du vivant.

10 Comportement- Diversification

→ énoncé
p. 51

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1. Version QCM. Affirmations exactes : b et c. Justifications :

L'affirmation a est fausse car il est indiqué dans le document 2 que les pierres retrouvées et utilisées comme outils sont trop grosses pour avoir été utilisées par Homo sapiens.

L'affirmation b est vraie car il est indiqué dans le document 2 que les chimpanzés actuellement présents sur les lieux continuent d'utiliser des pierres comme percuteurs pour consommer des noix.

L'affirmation c est vraie car le document 1 relate que lorsqu'une nouvelle connaissance est acquise par un chimpanzé en captivité, elle se transmet rapidement aux autres membres du groupe.

2. Version « question ouverte ».

MÉTHODE

Distinguer explicitement ce qui prouve l'émergence d'un nouveau phénotype comportemental, ce qui prouve sa transmission et ce qui prouve l'absence d'intervention de la voie génétique. L'exploitation des documents ne se fait pas obligatoirement dans l'ordre dans lequel ils sont fournis.

Dans le parc national de Taï en Côte d'Ivoire, des archéologues ont mis au jour des pierres, datées de 4300 ans, correspondant à des percuteurs utilisés par des chimpanzés pour casser des noix. Dans ce même parc, de nos jours, les chimpanzés présents continuent d'utiliser des pierres comme percuteurs pour consommer des noix. Par contre, un tel comportement n'a pas été observé chez les chimpanzés vivant en d'autres endroits de l'Afrique. On est donc en présence d'un nouveau phénotype comportemental, propre à la population de chimpanzés du parc de Taï, apparu il y a au moins 4300 ans et transmis dans la population. Des études complémentaires, menées sur des chimpanzés en captivité, indiquent que « lorsqu'une nouvelle connaissance est acquise, elle se transmet rapidement aux autres membres du groupe ». On est alors amené à penser que l'aptitude des chimpanzés à utiliser des pierres pour casser des noix s'est transmise par voie non génétique.

De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Les mécanismes qui modifient les populations :
dérive génétique, sélection naturelle
3. La genèse de nouvelles espèces

1 Introduction

Les mécanismes de diversification des êtres vivants, étudiés dans le chapitre précédent, conduisent à une biodiversité. En classe de Seconde, la biodiversité a été présentée à ses trois échelles : diversité génétique au sein d'une même espèce, diversité des espèces et diversité des écosystèmes. La biodiversité se modifie au cours du temps : la biodiversité observée à un instant t est à la fois le résultat et une étape de l'évolution.

2 PROBLÉMATIQUE

À partir des modifications de la biodiversité à l'échelle des populations, comment naissent les nouvelles espèces ?

2 Les mécanismes qui modifient les populations : dérive génétique, sélection naturelle

2.1 La dérive génétique

Au sein d'une population, tous les individus ne transmettent pas systématiquement leurs allèles à leur descendance. À fécondité identique, certains individus ne participent pas à la reproduction tandis que certains individus font un peu plus de descendants que les autres. Des outils mathématiques existent qui permettent de simuler l'évolution de la fréquence des allèles d'un gène au cours des générations successives. Dans la simulation illustrée ci-après, on choisit une population initiale de 1000 individus dans laquelle la fréquence initiale de l'allèle A_1 est 0,5. On suit l'évolution de la fréquence de l'allèle A_1 au cours de 100 générations.

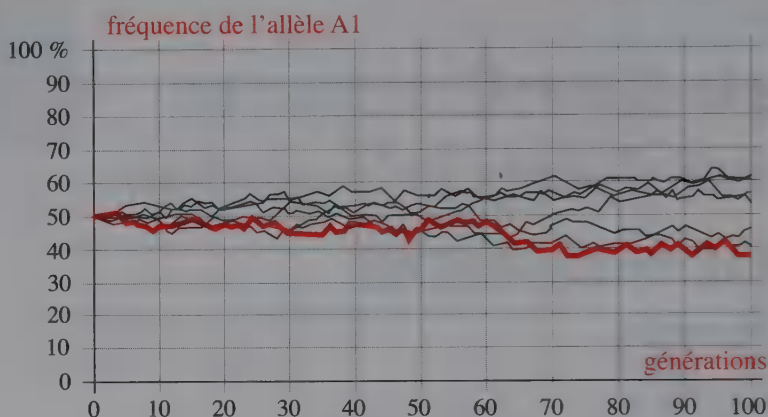


Figure 3.1 – Simulation du devenir d'un allèle au sein d'une population d'effectif important (différents essais) avec le logiciel « Evolution allélique »

On observe, pour chaque essai, une modification de la fréquence allélique, donc une modification de la diversité allélique au cours du temps.

A paramètres de la simulation constants, les essais donnant des résultats variables, il est possible d'affirmer que la modification de la diversité allélique est aléatoire. On parle de dérive génétique.

En jouant sur l'effectif de la population, on observe que les variations de fréquence allélique sont plus importantes dans le cas de simulations où l'on a paramétré un petit nombre d'individus (dans la simulation présentée ci-après, 50 individus formaient la population initiale) :

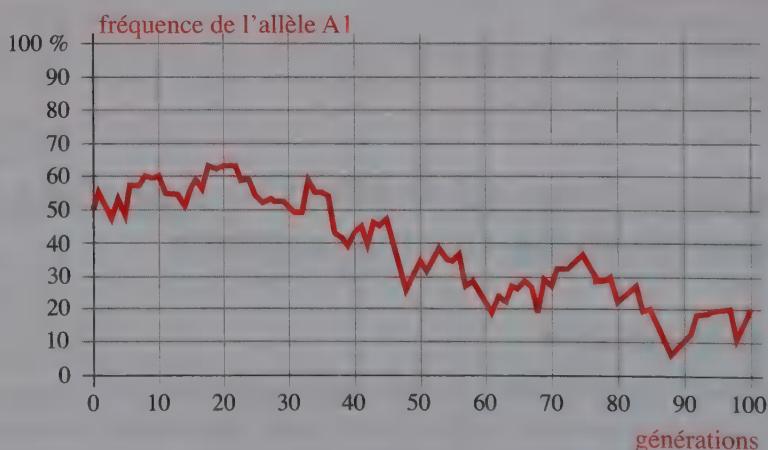


Figure 3.2 – Simulation du devenir d'un allèle au sein d'une population d'effectif faible avec le logiciel « Evolution allélique »

On peut ainsi affirmer que la dérive génétique se produit de façon plus marquée lorsque l'effectif de la population est faible.

2.2 La sélection naturelle

Chez l'escargot des haies, les couleurs et le nombre des bandes des coquilles sont très diverses :

gène	allèle	phénotype de la coquille
gène C (déterminisme de la couleur de la coquille)	C ^B	coquille marron
	C ^P	coquille rose
	C ^Y	coquille jaune
gène B (déterminisme des bandes)	B	présence de bandes
	B ⁰	pas de bandes

Tableau 3.1 – Déterminisme génétique des caractéristiques de la coquille chez l'escargot des haies

Dans un même lieu vit un mélange d'individus différents. Toutefois, la répartition des différents phénotypes n'est pas la même d'un milieu à l'autre :

Milieux	Coquilles jaunes	Coquilles rayées
haies	environ 70 %	environ 70 %
hêtraies	environ 20 %	environ 20 %
chênaies	environ 20 %	environ 40 %

Une telle variation dans la répartition des phénotypes révèle une variation de la diversité allélique d'un milieu à l'autre. On doit faire intervenir la prédation et un mécanisme de sélection naturelle pour expliquer cela.

Les grives sont des prédateurs des escargots. D'une manière générale, dans les habitats où les grives sont présentes, les coquilles très voyantes et facilement repérables, sont moins abondantes que les coquilles plus discrètes. Par exemple, en forêt, les grives repèrent plus facilement les escargots à coquille claire, ceux sans bande, parce que les bandes masquent la forme générale de la coquille. Ainsi, posséder l'allèle C^B responsable de la couleur marron de la coquille et/ou l'allèle B responsable de la présence de bandes est avantageux dans les écosystèmes forestiers. Les individus porteurs de ces allèles sont moins facilement repérables par leur prédateur, ils ont donc une plus grande probabilité de survie et vont participer davantage à la reproduction que les autres individus. Les allèles en question vont donc davantage se répandre dans la population. On parle de sélection naturelle pour désigner le fait que des facteurs environnementaux favorisent certains phénotypes et exercent ainsi une influence sur la fréquence des allèles en conférant un avantage aux individus qui sont porteurs d'un allèle particulier.

À RETENIR

La dérive génétique et la sélection naturelle sont deux mécanismes d'évolution. Sous l'effet de la pression du milieu, de la concurrence entre les êtres vivants et du hasard, il y a modification de la diversité génétique des populations au cours des générations.

La genèse de nouvelles espèces

3.1 L'espèce : un concept délicat

3.1.1 L'évolution du concept d'espèces dans l'histoire de la biologie

Avant l'émergence de la théorie de l'évolution, on ne se posait pas la question de l'origine des espèces. L'espèce est alors représentée comme une entité permanente, faite d'individus se ressemblant et se reproduisant entre eux.

Depuis la théorie de l'évolution, on tend vers un concept évolutionniste de l'espèce. La filiation entre les espèces est mise en valeur et l'espèce n'est plus considérée comme une unité stable : une population d'individus identifiée comme constituant une espèce n'est définie que durant un laps de temps fini.

3.1.2 Les critères de définition de l'espèce

Critère	Définition	Limites
critères phénotypiques	L'espèce est un ensemble d'organismes se ressemblant plus entre eux qu'à d'autres ensembles équivalents	Il peut y avoir des variations phénotypiques notables au sein d'une même espèce.
critères d'interfécondité	L'espèce rassemble tous les individus capables de se reproduire entre eux et dont les descendants sont également féconds.	Des membres d'une espèce, potentiellement interféconds, peuvent être séparés par des barrières d'isolement reproductif.
critères génétiques	L'absence de flux de gènes entre deux populations qui ne sont pas isolées géographiquement indique qu'il s'agit de deux espèces distinctes	Nécessité de données moléculaires pour évaluer le flux de gènes.

Tableau 3.2 – Les différents critères actuellement utilisés pour définir l'espèce

3.2 Mécanismes de spéciation

La spéciation est le processus par lequel de nouvelles espèces apparaissent. Les espèces s'individualisent à partir de populations appartenant à une espèce d'origine et se retrouvant isolées sur le plan reproducteur. Selon que l'isolement est géographique ou non, on distingue deux grands types de spéciation :

Type de spéciation	Mécanisme
Spéciation avec isolement géographique	Des populations initialement interfécondes sont isolées géographiquement. Elles évoluent indépendamment l'une de l'autre au gré de la dérive génétique et de la sélection naturelle. Si les différences deviennent importantes au point que les deux populations ne sont plus interfécondes, cela aboutit à deux espèces distinctes.
Spéciation sans isolement géographique	Au sein de populations non isolées géographiquement, la sélection naturelle joue un rôle crucial dans la divergence des populations. Si la sélection naturelle modifie de manière importante leurs structures génétiques respectives, les populations peuvent évoluer en espèces distinctes.

➔ À RETENIR

On peut considérer l'espèce comme une population d'individus suffisamment isolés génétiquement des autres populations. Une espèce disparaît si l'ensemble des individus qui la composent disparaît ou cesse d'être isolé génétiquement. L'émergence d'une nouvelle espèce correspond à l'individualisation d'un nouvel ensemble.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 72

Choisissez la (ou les) réponse(s) exacte(s) pour chaque série de propositions :

- 1** Une espèce rassemble des individus :
 - a** isolés génétiquement les uns des autres.
 - b** se ressemblant plus entre eux qu'à d'autres ensembles d'individus.
 - c** se reproduisant entre eux pour former des descendants stériles.
- 2** Le concept d'espèce :
 - a** est un concept figé.
 - b** a évolué au cours de l'histoire de la biologie.
 - c** est parfaitement défini.
- 3** La formation d'une nouvelle espèce :
 - a** nécessite toujours un isolement géographique.
 - b** nécessite toujours un isolement génétique.
 - c** se fait à partir de populations appartenant à une espèce d'origine et se retrouvant isolées sur le plan reproducteur.

2 Vérification des connaissances

10 min

→ corrigé
p. 72

Répondez brièvement aux questions suivantes :

- 1** Présentez les deux mécanismes responsables de la modification des fréquences des allèles d'un gène au cours du temps.
- 2** Expliquez comment un isolement géographique peut aboutir à une spéciation.

3 Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 73

Qui suis-je ?

- 1** Le processus par lequel de nouvelles espèces apparaissent.
- 2** La modification aléatoire de la diversité génétique d'une population au cours du temps.
- 3** Le mécanisme par lequel la pression du milieu influence la diversité génétique d'une population.

4 Population – Sélection naturelle

★★

10 min

→ corrigé
p. 73

Lycée JP Vernant, Sèvres

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 géo-

mètre 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.

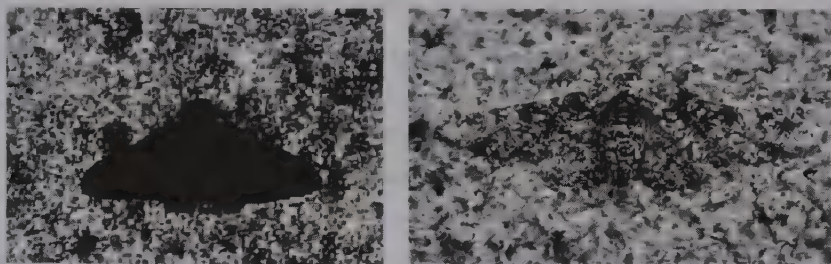


Figure 3.3 – Une forme sombre (à gauche) et une forme claire (à droite) du géomètre du bouleau posées sur un tronc non pollué

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. À 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.

5 Dérive génétique – Sélection naturelle ★

10 min

→ corrigé
p. 73

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.

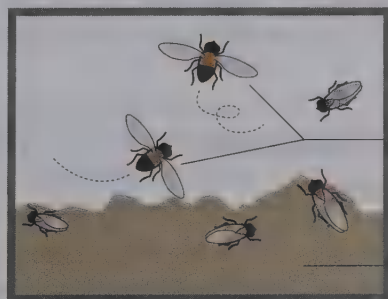


Figure 3.4 – Schéma d'une cage à population

drosophiles

milieu nutritif

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 Elever dans une cage des drosophiles possédant un allèle et dans une autre cage les drosophiles possédant l'autre allèle de manière à éviter leur croisement.
- 1.3 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.

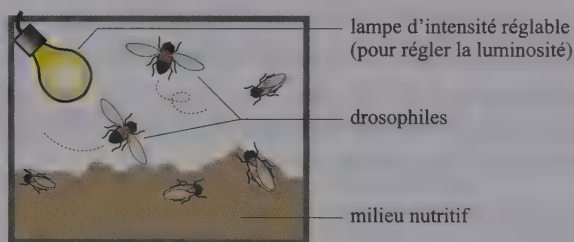


Figure 3.5 – Cage à population permettant de tester l'influence de la luminosité

Choix de protocoles :

- 2.1 Elever 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 Elever 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 Elever 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.

6

Population – Sélection naturelle

★★

5 min

→

corrigé
p. 74

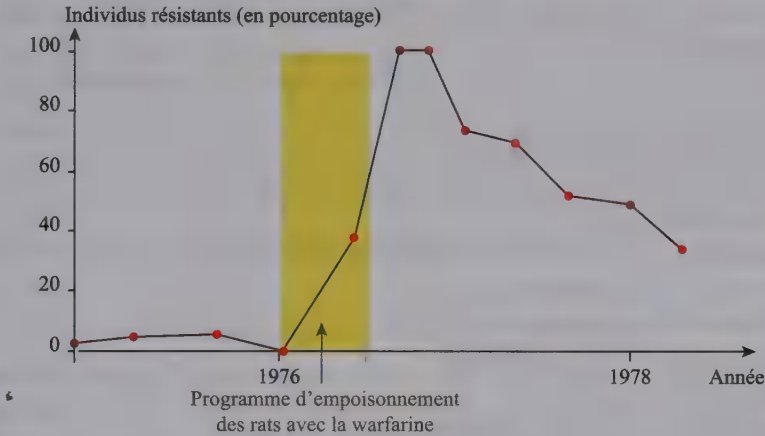
Lycée Jean de la Fontaine, Paris

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.

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	125
Traitement					
Identités	*	*	*	*	*
VKOR rat sensible	SerLeuValSerValAlaGlySerLeuTyrLevAlaTrpIleLeuPhePheValLeuTyrAsp				
VKOR rat résistant 1	-	-	-	-	Gln-
VKOR rat résistant 2	-	-	-	Gln-	-

Choisissez la proposition exacte pour chaque question.

- Le document 1 montre que :
 - les rats sensibles à la warfarine ont disparu après 1976
 - tous les rats étaient sensibles à la warfarine avant 1976
 - des rats résistants à la warfarine existaient avant 1976
 - la résistance à la warfarine est apparue à partir de 1976

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 plus 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
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

7 Diversité allélique – Sélection naturelle

30 min

→ corrigé
p. 74

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 en 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 1**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.



coquille unie-claire

coquille à bandes
sombres peu marquéescoquille à bandes
sombres très marquées

Figure 3.6 – Présentation des phénotypes

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 des oyats.



Figure 3.7 – Lieu de dénombrement des coquilles en 1960

Phénotypes de Theba pisana	Zone à oyat	
	Nombre	Pourcentage
Coquille unie-claire	50	18
Coquille à bandes peu marquées	80	30
Coquille à bandes foncées	140	52

Tableau 3.3 – 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.

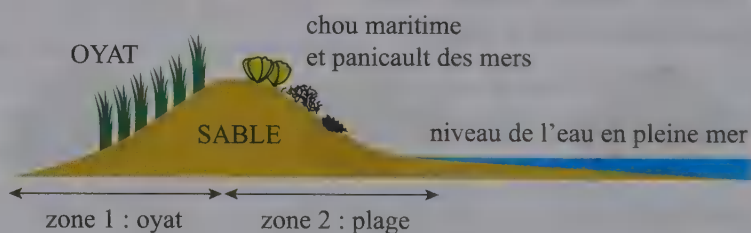


Figure 3.8 – Lieu de dénombrement des coquilles en 2007

Phénotypes de Theba pisana	Zone 1 : OYAT		Zone 2 : PLAGE	
	Nombre	%	Nombre	%
Coquille unie-claire	25	18	90	69
Coquille à bandes peu marquées	40	30	30	23
Coquille à bandes foncées	70	52	10	8

Tableau 3.4 – Nombre et pourcentage 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.

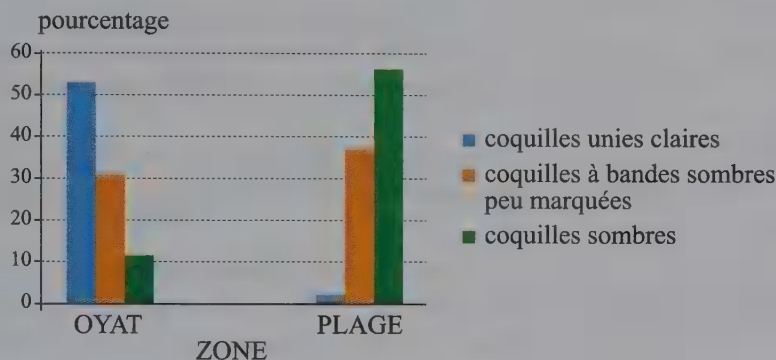


Figure 3.9 – Pourcentage de chaque phénotype de *Theba pisana* consommé par les Grives

8 Spéciation

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

★★★

30 min

→ corrigé
p. 75

« 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 : Etudes 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.

1 QCM Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 64

Propositions exactes :

1 **b** ; 2 **b** ; 3 **b**

Explications complémentaires :

L'affirmation 1a est fausse car l'absence de flux de gènes entre deux populations qui ne sont pas isolées géographiquement indiquerait au contraire qu'il s'agit de deux espèces distinctes.

L'affirmation 1c est fausse selon le critère d'interfécondité : l'espèce rassemble tous les individus capables de se reproduire entre eux et dont les descendants sont également féconds.

L'affirmation 2c est fausse car les critères phénotypiques et d'interfécondité de l'espèce montrent des limites. D'une part, il peut y avoir des variations phénotypiques notables au sein d'une même espèce. D'autre part, des membres d'une espèce, potentiellement interféconds, peuvent être séparés par des barrières d'isolement reproductif.

L'affirmation 3a est fausse car on connaît des spéciations sans isolement géographique : si la sélection naturelle modifie de manière importante leurs structures génétiques respectives, des populations peuvent évoluer en espèces distinctes.

2 Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 64

1 On connaît deux mécanismes responsables de la modification des fréquences des allèles d'un gène au cours du temps :

- L'un des mécanismes est la dérive génétique. Au sein d'une population, tous les individus ne transmettent pas systématiquement leurs allèles à leur descendance. À fécondité identique, certains individus ne participent pas à la reproduction tandis que certains individus font un peu plus de descendants que d'autres. Cela influence les fréquences alléliques. On parle de dérive génétique pour désigner cette modification aléatoire de la fréquence des allèles. Il est établi que la dérive génétique se produit de façon plus marquée lorsque l'effectif de la population est faible.
- L'autre mécanisme est la sélection naturelle. Dans un certain environnement, il arrive que des individus, du fait de la possession de certains allèles, aient une plus grande probabilité de survie que d'autres. Ils vont donc participer davantage à la reproduction que les autres individus. Les allèles qu'ils possèdent vont donc davantage se répandre dans la population. L'expression « sélection naturelle » désigne le fait que des facteurs environnementaux favorisent certains phénotypes et exercent ainsi une influence sur la fréquence des allèles en conférant un avantage aux individus qui sont porteurs d'un allèle particulier.

2 Un isolement géographique peut aboutir à une spéciation selon le scénario suivant : des populations initialement interfécondes sont isolées géographi-

quement. Elles évoluent indépendamment l'une de l'autre au gré de la dérive génétique et de la sélection naturelle. Si les différences deviennent importantes au point que les deux populations ne sont plus interfécondes, cela aboutit à deux espèces distinctes.

3 Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 64

- 1 La spéciation. 2 La dérive génétique. 3 La sélection naturelle.

4 Population – Sélection naturelle

→ énoncé
p. 64

Lycée JP Vernant, Sèvres

Dans les populations de géomètre du bouleau, la période 1848-1975 peut être décomposée en deux parties. Entre 1848 et 1960, on assiste à une augmentation de la fréquence des papillons au corps sombre (jusqu'à 98% en 1900) et une diminution de la fréquence des papillons au corps clair. Entre 1960 et 1975, la tendance s'inverse : la fréquence de la forme claire augmente, alors que celle de la forme sombre diminue, passant de 95% à 82%.

L'évolution des fréquences des deux formes de papillons peut être mise en relation avec les caractéristiques de l'environnement :

- À la fin du XVIII^e siècle, l'Angleterre connaît l'industrialisation et utilise massivement le charbon comme source d'énergie. Au milieu du XIX^e siècle, la pollution de l'air est déjà importante et se traduit notamment par le dépôt de particules sombres sur les troncs des arbres. Par conséquent, les formes sombres sont moins facilement repérables par leurs prédateurs sur les troncs noirs, elles ont donc une plus grande probabilité de survie et vont participer davantage à la reproduction que les autres individus. Au contraire, les formes claires qui sont plus facilement repérables par leurs prédateurs sur les troncs noirs, ont une plus faible probabilité de survie et vont moins participer à la reproduction que les autres individus. On est en présence d'un exemple de sélection naturelle puisque des facteurs environnementaux favorisent certains phénotypes et exercent ainsi une influence sur la fréquence des allèles responsables de ces phénotypes en conférant un avantage aux individus qui sont porteurs d'un allèle particulier.
- À partir des années 1960, des mesures ont été prises pour réduire la pollution. On peut penser que ces mesures ont atténué le noircissement du tronc des bouleaux. Dans ce nouveau contexte environnemental, les formes claires se trouvent avantagées ce qui explique, toujours par le mécanisme de sélection naturelle, l'augmentation de la fréquence des formes claires et la diminution de celle des formes sombres.

5 Dérive génétique – Sélection naturelle

→ énoncé
p. 65

Lycée Frison-Roche, Chamonix

Pour l'expérience 1, le protocole 1.1 est adapté tandis que les protocoles 1.2 et 1.3 ne

sont pas adaptés. Avec le protocole 1.2, on ne part pas d'une diversité allélique initiale dans chaque cage, il ne pourra donc pas y avoir de dérive génétique. Avec le protocole 1.3, on introduit un facteur de variation (quantité de nourriture mise dans chaque cage) qui va influencer les effectifs des différentes drosophiles indépendamment de la dérive génétique.

Pour l'expérience 2, le protocole 2.2 est adapté tandis que les protocoles 2.1 et 2.3 ne sont pas adaptés. Avec le protocole 2.1, on ne teste pas l'influence de la luminosité mais celle de l'alimentation. Avec le protocole 2.3, on introduit un facteur de variation (modification des fréquences alléliques initiales) qui va influencer les effectifs des différentes drosophiles indépendamment de la luminosité.

6 Population – Sélection naturelle

→ énoncé
p. 66

Lycée Jean de la Fontaine, Paris

Les propositions exactes sont les suivantes :

1. c (le graphique montre bien environ 3% d'individus résistants à la warfarine avant 1976)
2. b (le texte associé au document 1 indique bien que l'enzyme VKOR permet la réduction de la vitamine K, indispensable à la coagulation sanguine)
3. d (ne pas confondre nucléotides et acides aminés)
4. d (il n'est pas question de nouvelle espèce, mais d'augmentation du nombre d'individus résistants au sein de la même espèce)
5. c (en présence de warfarine les rats résistants à la warfarine sont avantagés, survivent et participent davantage à la reproduction que les rats sensibles)
6. d (ne pas choisir les affirmations b et c qui sont teintées de finalisme)
7. a (à long terme l'utilisation de la warfarine mènerait à une population faite de 100% de rats résistants, contre lesquels elle serait inefficace)
8. b (les individus résistants à la warfarine ont bien un avantage sélectif puisqu'ils survivent à la présence de warfarine, à la différence des individus sensibles)

7 Diversité allélique – Sélection naturelle

→ énoncé
p. 69

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1. Selon le document 1, il existe bien une diversité allélique chez *Theba pisana* puisque la couleur de la coquille chez cet escargot est gouvernée par un gène représenté par deux allèles : l'un responsable de la présence de bandes claires et l'autre responsable de la présence de bandes sombres.
2. Les données du document 2a indiquent qu'en 1960, la fréquence des escargots à coquille claireunie était plus faible (18%) que celle des escargots à coquille intermédiaire (30%), elle-même moins importante que celle des escargots à coquille à bandes foncées (52%).

Les données du document 2b indiquent qu'en 2007, dans la zone à oyats, la fréquence des différents phénotypes n'a pas changé par rapport à 1960. Par contre, dans la zone de plage, la fréquence des phénotypes s'est inversée : peu d'escargots à coquille à bandes sombres (8%), un peu plus d'escargots à coquille intermédiaire (23%) et beaucoup d'escargots à coquille unie (69%).

Comme le seul paramètre qui a changé entre 1960 et 2007 est l'environnement (réduction de la zone à oyats et remplacement par une zone de plage), on peut penser que c'est la modification du milieu qui est responsable du changement de fréquence des différents phénotypes d'escargot.

3. Le document 3 présente, sous la forme d'histogrammes, des données relatives à la prédation de *Theba pisana* par les grives dans les différents environnements. On observe que dans une zone plantée d'oyats, les grives consomment peu d'escargots sombres (13%), davantage d'escargots à phénotype intermédiaire (32%) et beaucoup d'escargots clairs (55%). Dans une zone de plage c'est l'inverse : les escargots foncés sont davantage consommés (58%) et les escargots clairs sont peu consommés (4%). On voit donc que, si les grives consomment des escargots, le phénotype des escargots choisis de façon préférentielle est différent selon le milieu. On peut supposer que, dans la zone à oyats, les grives repèrent mieux les phénotypes clairs et les consomment préférentiellement. En zone de plage, elles repèrent mieux les phénotypes sombres. Avoir une coquille claire est donc avantageux en zone de plage et désavantageux en zone d'oyats ; c'est l'inverse pour les escargots à coquille sombre.
4. Le mécanisme révélé par cette étude est la sélection naturelle. On parle de sélection naturelle pour désigner le fait que des facteurs environnementaux favorisent certains phénotypes et exercent ainsi une influence sur la fréquence des allèles en conférant un avantage aux individus qui sont porteurs d'un allèle particulier.

8 Spéciation

➔ énoncé
p. 71

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1. Dans la publication de l'INRA, il est fait allusion à deux populations d'individus chez la processionnaire du pin du parc national de Leiria. Dans l'une des populations, les adultes émergent en mai et le développement larvaire a lieu en été. Dans l'autre population, les adultes émergent fin août et développement larvaire a lieu en automne-hiver. Il est indiqué que les flux de gènes sont très faibles entre les deux groupes d'individus. On est donc en présence de deux populations qui montrent des différences de cycle biologique et ne peuvent plus se reproduire entre elles. Cela étaye l'idée qu'une spéciation est en cours.
2. Le point de départ de cette spéciation est la présence de quelques individus « mutants » qui montrent un cycle biologique différent, ce qui empêche la reproduction avec les individus à développement « normal ». L'isolement génétique est ainsi assuré et un nouvel ensemble peut s'individualiser. Les deux populations distinctes continuent à vivre dans la même forêt, il s'agit d'une spéciation sans isolement géographique chez la processionnaire du pin.

Un regard sur l'évolution de l'Homme

Plan du chapitre

1. Introduction
2. La place de l'Homme dans la dynamique évolutive des primates
3. Les mécanismes et phénomènes à l'origine de la diversification Homme/Chimpanzé

1 Introduction

L'Homme actuel, *Homo sapiens*, est une espèce apparue sur Terre il y a 200 000 ans. Il est aujourd'hui le seul représentant du genre *Homo*. Son histoire évolutive s'inscrit dans celle du groupe des primates, auquel il appartient. Au sein de ce groupe, il montre une parenté étroite avec d'une part certains grands singes actuels, d'autre part certains grands primates fossiles.

2 PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les grands traits de l'histoire évolutive de l'Homme ?

2 La place de l'Homme dans la dynamique évolutive des primates

2.1 L'Homme au sein des primates actuels

2.1.1 Utilisation de caractères macroscopiques

Pour établir des relations de parenté entre espèces en se basant sur des comparaisons anatomiques, on s'appuie sur des caractères dérivés possédés par certaines espèces seulement. L'état dérivé d'un caractère (par opposition à l'état ancestral) est celui apparu le plus récemment au cours des temps géologiques. Les êtres vivants qui partagent un même caractère dérivé ont un ancêtre commun qui leur est propre et qui possédait déjà ce caractère.

caractère taxon	Narines	Orbites	Pouce	Queue	Rhinarium	Terminaison des doigts
Babouin	rapprochées	fermées	opposable	présente	absent	ongles
Bonobo	rapprochées	fermées	opposable	absente	absent	ongles
Chimpanzé	rapprochées	fermées	opposable	absente	absent	ongles
Gibbon	rapprochées	fermées	opposable	absente	absent	ongles
Gorille	rapprochées	fermées	opposable	absente	absent	ongles
Homme	rapprochées	fermées	opposable	absente	absent	ongles
Indri	écartées	ouvertes	opposable	présente	présent	ongles
Orang-outan	rapprochées	fermées	opposable	absente	absent	ongles
Oreillard	écartées	ouvertes	Non opposable	présente	présent	griffes
Saki	écartées	fermées	opposable	présente	absent	ongles
Tarsier	écartées	ouvertes	opposable	présente	absent	ongles

Tableau 4.1 – Matrice taxons/caractères pour onze espèces de mammifères
(les cases sur fond bleu indiquent l'état dérivé du caractère)

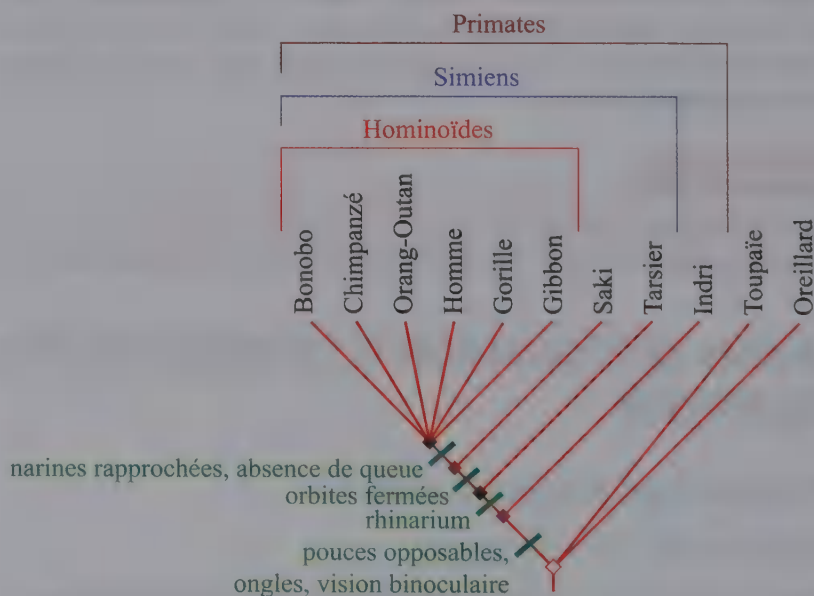


Figure 4.1 – Arbre phylogénétique des Primates

On établit ainsi que l'homme possède les caractères dérivés propres aux primates : pouce opposable aux autres doigts, doigts terminés par des ongles plats, orbites vers l'avant autorisant une vision binoculaire. Au sein des primates, c'est un hominoïde (queue réduite au coccyx) et ses plus proches parents sont les autres hominoïdes.

2.1.2 Utilisation de données moléculaires

Chez des espèces différentes, on peut rencontrer des molécules homologues. Il s'agit de protéines ou de gènes dont les séquences montrent des ressemblances importantes, ne pouvant être attribuées au hasard. Les espèces possédant ces molécules doivent avoir une origine commune. On utilise les homologues moléculaires pour préciser le degré de parenté entre les espèces : des espèces sont d'autant plus apparentées que les séquences de leurs molécules homologues sont semblables.

En appliquant ce raisonnement aux molécules d'opsines contenues dans les cônes (programme de Première S) ainsi qu'à diverses autres molécules (voir matrice des distances ci-dessous à propos de la cytochrome oxydase), on confirme que l'Homme fait partie des primates, et on démontre qu'au sein des primates hominoïdes son plus proche parent est le Chimpanzé (Chimpanzé « au sens large », c'est-à-dire les deux espèces : le chimpanzé commun et le bonobo (chimpanzé nain)).

espèce espèce	Bonobo	Chimpanzé	Homme	Gorille	Orang- outan	Gibbon
<i>Bonobo</i>	0	0,881	2,64	3,08	5,29	6,17
<i>Chimpanzé</i>		0	2,64	3,08	5,29	6,17
<i>Homme</i>			0	3,08	6,17	5,73
<i>Gorille</i>				0	3,96	6,17
<i>Orang- outan</i>					0	6,17
<i>Gibbon</i>						0

Tableau 4.2- Matrice des pourcentages de différences entre les séquences d'acides aminés de la cytochrome oxydase de différentes espèces de primates



Figure 4.2 – Arbre phylogénétique construit à partir de la matrice des distances pour la cytochrome oxydase (enzyme impliquée dans la chaîne respiratoire mitochondriale)
(Source : logiciel Phylogène)

➔ À RETENIR

Différentes méthodes, fondées sur la comparaison de caractères macroscopiques dérivés et de caractères moléculaires homologues, situent l'Homme parmi les primates. Son plus proche parent, dans la nature actuelle, est le Chimpanzé. L'Homme et le Chimpanzé partagent donc un ancêtre commun récent, que l'on qualifie de dernier ancêtre commun.

Voir exercices 4, 6 et 7.

2.2 Les particularités du phénotype humain

Pour identifier les particularités du genre *Homo*, on peut d'une part comparer l'Homme actuel et le Chimpanzé, d'autre part examiner les caractéristiques de grands primates fossiles dont ceux habituellement classés dans le genre *Homo*.

Caractère \ Espèce		Homme	Chimpanzé
CRÂNE	Face	Verticale	Prognathe (mâchoires projetées vers l'avant)
	Capacité crânienne	Élevée (environ 1500 cm ³)	Faible (environ 400 cm ³)
	Bourrelets sus-orbitaires	Absents	Marqués, particulièrement chez les mâles
	Mâchoires	Forme parabolique (V)	Forme de U
	Trou occipital	En position avancée (le crâne est « sur » la colonne vertébrale)	En position reculée (le crâne est « en avant » de la colonne vertébrale)
MEMBRES	Caractéristiques du membre inférieur	Membre supérieur plus court que le membre inférieur. Axe du fémur oblique par rapport à un axe vertical passant par le genou	Membre antérieur plus long que le membre postérieur. Axe du fémur pratiquement vertical.
	Pied	Gros orteil parallèle aux autres doigts → pied ne permettant pas la préhension	Gros orteil opposable aux autres doigts → pied pouvant permettre la préhension

BASSIN	Forme des os iliaques	Os iliaques courts et larges → surface d'attache efficace pour les muscles assurant la station verticale	Os iliaques longs et étroits
COLONNE VERTEBRALE	Nombre de courbures	4 courbures	une seule courbure

Tableau 4.3 – Tableau de comparaison des caractéristiques anatomiques de l'Homme actuel (un bipède exclusif) et du Chimpanzé (le répertoire locomoteur du Chimpanzé comporte 5 à 10 % de bipédie, 40 à 60 % de quadrupédie et 40 à 60 % de suspension/grimper).

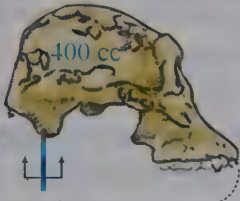
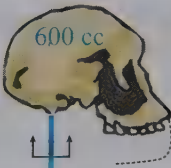
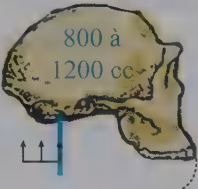
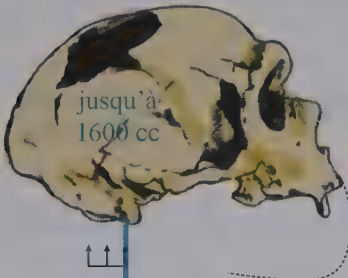
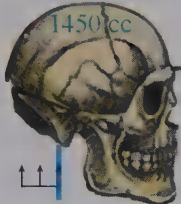
AUSTRALOPITHECUS	HOMO HABILIS	HOMO ERECTUS		
 400 cc emplacement du trou occipital	 600 cc	 800 à 1200 cc		
<th>HOMO NEANDERTALENSIS</th>		HOMO NEANDERTALENSIS	<th>HOMO SAPIENS</th>	HOMO SAPIENS
 jusqu'à 1600 cc		 1450 cc		

Figure 4.3 – Crânes et capacités crâniennes de quelques grands primates fossiles

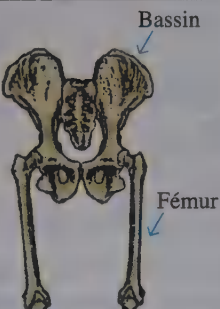
Espèce	Chimpanzé	Australopithecus afarensis	Homo erectus	Homo sapiens
Bassin et fémur			À peu près identique à <i>Homo sapiens</i>	

Tableau 4.4 – Bassins et fémurs de quelques grands primates

Homo habilis	Homo erectus	Homo sapiens et Homo neanderthalensis
Confection de galets aménagés Existence probable d'un langage articulé	Création d'outils évolués (bifaces) Maîtrise du feu	Existence certaine d'un langage articulé Industrie sophistiquée et diversifiée ; rites funéraires Activités artistiques (peintures) pour Homo sapiens

Tableau 4.5 – Outils et pratiques culturelles chez des grands primates du genre *Homo*

➔ À RETENIR

La comparaison Homme/Chimpanzé et l'observation des représentants fossiles du genre *Homo* mettent en relief les caractères propres aux humains. Les espèces du genre *Homo* ont une face réduite, un certain développement cérébral, une mandibule parabolique, un style de bipédie marqué par un trou occipital avancé et l'aptitude à la course à pied (longues jambes). Ils produisent des outils complexes et ont des pratiques culturelles variées.

Voir exercices 5 et 8.

? PROBLÉMATIQUE

Une fois connues les caractéristiques des divers représentants du genre *Homo*, quelle représentation peut-on faire de leur phylogénie?

2.3 Le genre Homo : une lignée buissonnante

2.3.1 Les périodes d'existence des principaux représentants du genre Homo

Genre	Australopithecus	Homo			
Espèce	Plusieurs espèces	Homo habilis	Homo erectus	Homo neanderthalensis	Homo sapiens
Répartition	Afrique	Afrique	Asie. Incur-sions en Afrique et en Europe	Afrique, Europe et Asie	Toute la Terre
Période d'existence	-4,2 à -1,2 Ma	-2,5 à -1,5 Ma	-1,8 à -1 Ma	-250 000 à -30 000 ans	Depuis 200 000 ans

Tableau 4.6 – Périodes et lieux de vie des principaux grands primates fossiles proches de l'Homme (dont des espèces fossiles du genre Homo, sur fond bleu)

2.3.2 Les relations phylogénétiques entre Homo sapiens et les autres espèces

La multiplicité des espèces de grands primates fossiles plus ou moins proches de l'Homme et le chevauchement de leurs périodes de vie amènent à proposer des représentations buissonnantes de leur arbre phylogénétique.

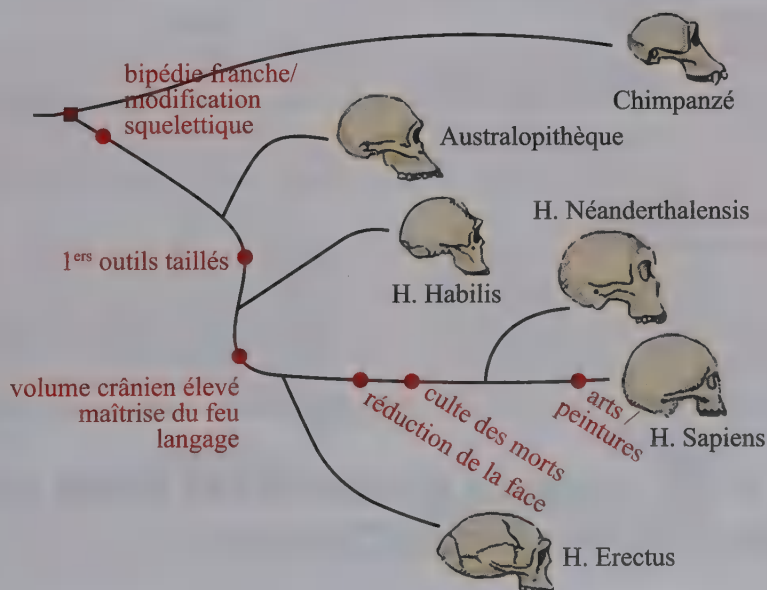


Figure 4.4 – Une représentation possible de la filiation entre les représentants du genre Homo

Remarque : on ne peut pas proposer avec certitude tel ou tel arbre phylogénétique. En raison de la difficulté à rattacher certains spécimens à une espèce connue, le détail de la filiation entre les différentes espèces fait l'objet de débats dans la communauté scientifique.

Voir exercices 9, 10 et 11.

PROBLÉMATIQUE

L'histoire de l'Homme est corrélée à celle des grands primates fossiles qui lui sont proches. Quelle image a-t-on de la diversité des grands primates, depuis leur apparition ?

2.4 variation de la diversité au sein du groupe des grands primates

Les premiers primates datent de -65 à -50 millions d'années (Ma), tandis que les grands primates datent de 20 Ma. Les archives fossiles montrent des primates variés qui ne sont identiques ni à l'Homme actuel, ni aux autres singes. Une importante diversification des grands primates est observée il y a 16 Ma, puis un affaiblissement à partir de 8 Ma. La diversité des grands singes actuels se limite à une vingtaine d'espèces parmi les 200 espèces actuelles de primates, alors que certains groupes de primates comme celui des cercopithécoïdes (macaque, babouin...) connaissent actuellement une importante diversification.

À RETENIR

D'après l'ensemble des fossiles mis au jour, si la diversité des grands primates a été grande, elle est aujourd'hui réduite.

PROBLÉMATIQUE

Une fois l'Homme replacé dans la dynamique évolutive des primates, quels mécanismes pourraient expliquer la distinction entre l'Homme et le Chimpanzé à partir de leur dernier ancêtre commun ?

Les mécanismes et phénomènes à l'origine de la diversification Homme/Chimpanzé

3.1 La proximité génétique de l'Homme et du Chimpanzé

Le séquençage du génome du chimpanzé, achevé en septembre 2005, révèle une différence d'à peine 4 % avec le génome humain. La similarité va même jusqu'à 99 % si l'on ne considère que les gènes codants pour des protéines. L'extrême proximité géné-

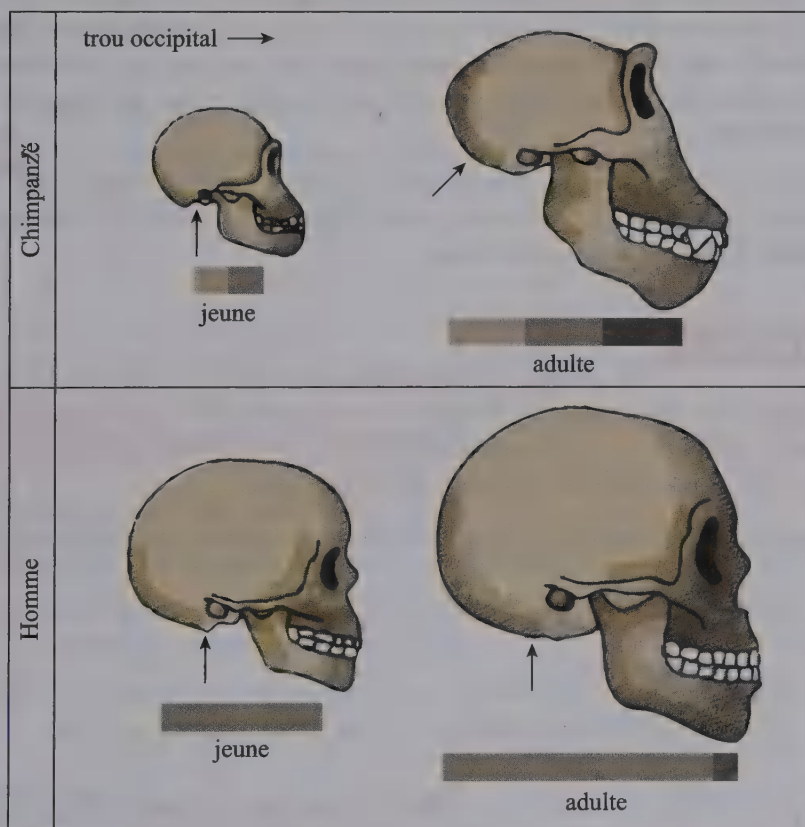
tique des deux espèces indique que la séparation des deux lignées est relativement récente. La majorité des scientifiques évalue cette séparation entre 6 et 8 millions d'années. Il s'agit alors d'expliquer les différences importantes (bipédie, développement cérébral) existant entre l'Homme et le Chimpanzé alors que ces deux espèces sont très proches génétiquement.

3.2 Regard sur le développement comparé de l'Homme et du Chimpanzé

3.2.1 Mise en place du tissu cérébral lors du développement prénatal

La phase embryonnaire dure deux semaines chez le Chimpanzé et huit semaines chez l'Homme. C'est justement lors de la phase embryonnaire que se multiplient les cellules nerveuses, à une vitesse pouvant atteindre 5000 neurones par seconde.

3.2.2 Mise en place des caractères crâniens lors du développement postnatal



■ caractères juvéniles ■ caractères adolescents ■ caractères adultes

Tableau 4.7 – Evolution du crâne de l'Homme et du Chimpanzé lors du développement postnatal

Sur le plan des caractères crâniens, l'Homme conserve à l'état adulte des caractères embryonnaires et juvéniles. On parle de néoténie.

Chez le Chimpanzé, jusqu'à l'âge d'un an, la position inférieure du trou occipital permet la bipédie. Ensuite, le déplacement du trou occipital vers l'arrière impose la quadrupédie de l'adulte. Cette phase conduisant au déplacement du trou occipital est très lente chez l'Homme.

3.3 La mise en jeu des variations d'expression de gènes du développement

Il a été vu (chapitre 2) que des gènes du développement peuvent connaître des changements dans leurs modalités (lieu, chronologie et intensité) d'expression et que cela est susceptible d'influencer le plan d'organisation.

Dans le cas de l'Homme et du Chimpanzé, on évoque des différences dans la durée et l'intensité d'expression de certains gènes du développement pour expliquer leurs différences phénotypiques. Par exemple, la durée d'expression du gène ASPM (Abnormal Spindle-like Microcephaly-associated), qui code une protéine déterminant la multiplication des cellules souches du cortex, est plus courte chez le Chimpanzé que chez l'Homme.

Remarque : l'environnement, dont la relation avec les autres individus, joue chez l'Homme comme chez le Chimpanzé, un rôle dans l'acquisition du phénotype, en particulier le phénotype comportemental.

➔ À RETENIR

L'Homme et le Chimpanzé sont remarquablement proches d'un point de vue génétique. Ils se distinguent surtout par des différences d'expression de leurs gènes du développement lors du développement pré- et post-natal.

1 QCM Vérification des connaissances

10 min

 corrigé
p. 95

Choisissez la (ou les) réponse(s) exacte(s) pour chaque série de propositions :

1 Les Australopithèques :

- ☐ a font partie de la lignée des Homo
- ☐ b font partie de la lignée des Chimpanzés
- ☐ c forment un rameau détaché assez tôt de la lignée humaine
- ☐ d montraient, au-dessus des épaules, des caractères de grands singes
- ☐ e montraient, au-dessous des épaules, des caractères de grands singes

2 Le genre Homo :

- ☐ a est apparu il y a 4 millions d'années
- ☐ b n'est représenté que par des espèces fossiles
- ☐ c est représenté par un certain nombre d'espèces ayant vécu entre 2,5 Ma et l'actuel
- ☐ d comporte des espèces fabriquant toutes des outils
- ☐ e montre une aptitude à la course à pied

3 Le(s) caractère(s) favorisant la bipédie est (sont) :

- ☐ a une mandibule parabolique
- ☐ b un bassin court et large
- ☐ c un volume cérébral important
- ☐ d un membre antérieur plus long que le membre postérieur
- ☐ e des fémurs convergents vers les genoux

2 Vérification des connaissances

10 min

 corrigé
p. 95

Répondez brièvement aux questions suivantes :

- 1** Quelles sont les caractéristiques des représentants du genre Homo ?
- 2** Situez le genre Homo par rapport à la l'histoire évolutive des primates démarrée il y a 65 millions d'années.
- 3** Comment explique-t-on les différences phénotypiques importantes entre l'Homme et le Chimpanzé malgré leur extrême proximité génétique ?

3 Vérification des connaissances

10 min

 corrigé
p. 96

Qui suis-je ?

- 1** Un individu dont la période d'existence est comprise entre -4,2 et -1,2 Ma et dont la répartition géographique s'est limitée à l'Afrique.

- ☒ Un caractère possédé par l'ancêtre commun à plusieurs espèces, et utilisé pour construire des relations de parenté.
- ☒ Un groupe de primates possédant un coccyx et non une queue.

4 Homme - Primates - Parenté



5 min

→ corrigé
p. 96

Lycée Frison-Roche, Chamonix

Répondez par vrai ou faux et justifiez votre choix.

L'arbre phylogénétique présenté ci-après permet d'affirmer que :

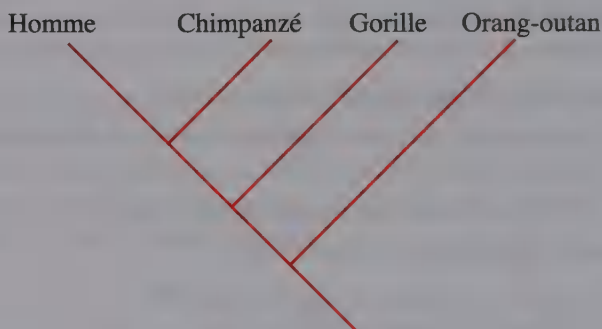


Figure 4.12 – Arbre phylogénétique de quatre primates

- ☒ L'Homme, le Chimpanzé, le Gorille et l'Orang-outan ont un ancêtre commun
☐ a) vrai ☐ b) faux
- ☒ Les espèces les plus apparentées sont le Gorille et l'Orang-outan
☐ a) vrai ☐ b) faux
- ☒ Le Chimpanzé est l'ancêtre de l'Homme
☐ a) vrai ☐ b) faux
- ☒ L'Orang-outan est l'ancêtre commun des espèces présentes dans l'arbre
☐ a) vrai ☐ b) faux

5 Lignée humaine – Anatomie



20 min

→ corrigé
p. 96

Lycée Léonard de Vinci, Tremblay en France

À l'aide des documents proposés :

- Déterminez les critères d'appartenance au genre Homo.
- Dites pourquoi on peut affirmer que les Australopithèques sont plus proches de l'Homme actuel que du Chimpanzé.
- Précisez les relations de parenté entre les taxons suivants : Homo sapiens, Homo erectus, Australopithèque, Chimpanzé.

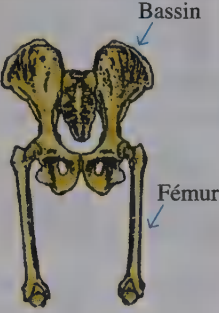
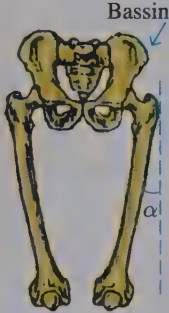
Espèce	Chimpanzé (actuel)	<i>Australopithecus afarensis</i> (-3,9 à - 3 MA)	<i>Homo erectus</i> (-1,8 à -0,12 MA)	<i>Homo sapiens</i> (actuel)
Mâchoire	En U	En U	Parabolique en V	Parabolique en V
Trou occipital	Non centré	Centré	Centré	Centré
Bassin et fémur			À peu près identique à <i>Homo sapiens</i>	
Gros orteil	Opposable	Opposable	Non opposable	Non opposable
Fabrication d'outils	Non	Non	Oui	Oui

Tableau 4.13- Document A : caractéristiques de quelques espèces de grands primates

1  450 cm ³ Australopithèque et Chimpanzé	2  875 cm ³ Pithécantrophe (<i>Homo erectus</i>)
3  1600 cm ³ Homme de La Chapelle-aux-Saints	4  1400 cm ³ Homme de Cro-Magnon (Homme actuel)

Tableau 4.14 –Document B : Crânes et volumes cérébraux de quelques grands primates fossiles dans leur ordre d'apparition

6

Grands primates – Parenté

★

5 min

➔ corrigé p. 97

Lycée Corot, Savigny-sur-Orge

En utilisant les documents joints, précisez la place de l’Homme dans le règne animal et dégagez les caractéristiques du plus récent ancêtre commun partagé par l’Homme et l’espèce dont il est le plus proche parent.

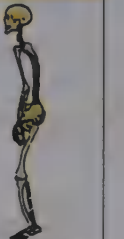
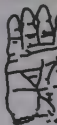
	Chimpanzé	Orang-outang	Gorille	Homme
squelette et silhouette				
capacité crânienne	De 380 à 440 cm ³	De 385 à 490 cm ³	De 450 à 625 cm ³	De 1100 à 1700 cm ³
crânes				
mains				
pieds				
structure sociale	grégaire	variable (solitaire, couple ou groupe)	grégaire	grégaire

Tableau 4.10 – Document A : quelques données anatomiques et biologiques

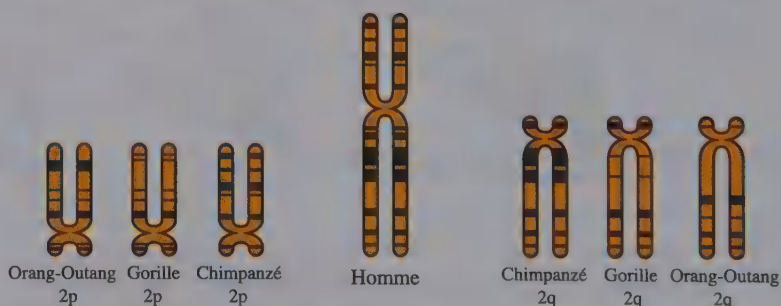


Figure 4.5 – Document B : chromosomes non homologues 2p et 2q de trois singes et chromosome 2 humain.

Donnée : le nombre total de chromosomes chez les singes est de 48, il est de 46 chez l'Homme

	Homme	Chimpanzé	Gorille	Orang-Outang
Homme	0			
Chimpanzé	1,45	0		
Gorille	1,51	1,57	0	
Orang-Outang	2,98	2,94	3,04	0

Tableau 4.11 – Document C : différences (exprimées en %) entre les gènes codant pour la chaîne alpha de l'hémoglobine de quelques primates

7 Homo – Squelette



15 min

→ corrigé
p. 98

Lycée Corot, Savigny-sur-Orge

Un fossile particulièrement complet a été retrouvé en 1984 sur les bords du lac de Turkana, au nord du Kenya ; il a été baptisé « l'adolescent de Turkana ». Son étude précise révèle qu'il s'agit des restes d'un représentant de l'espèce *Homo erectus* qui aurait vécu il y a 1,6 Ma.

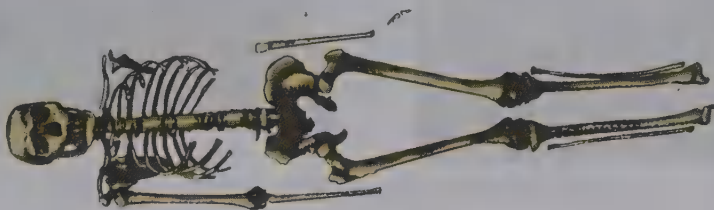


Figure 4.6 – Squelette fossile de l'adolescent de Turkana

1. Justifiez l'appartenance de ce fossile à la lignée humaine.
2. Habituellement les fossiles retrouvés sont beaucoup moins complets. Indiquez un fragment de ce fossile qui aurait pu suffire pour prouver son appartenance à la lignée humaine.
3. Justifiez le fait que ce fossile soit reconnu comme un représentant d'*Homo erectus* et non un *Australopithecus*.

8 Crânes - Homme - Chimpanzé



10 min

→ corrigé
p. 99

Lycée J-P Vernant, Sèvres

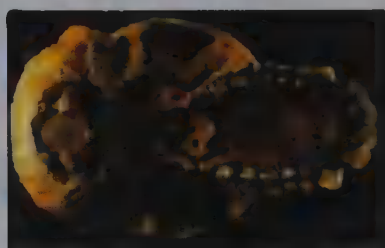
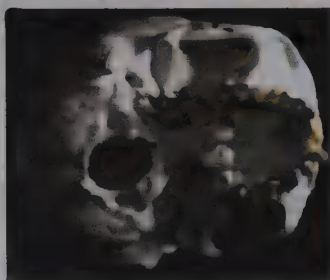
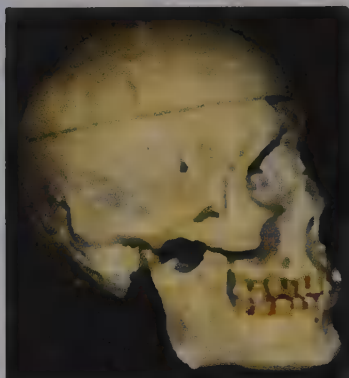


Figure 4.7 – Images de crânes d'Homme et de chimpanzé

1. Choisissez la proposition exacte :

Ces deux propriétés caractérisent le crâne humain, par rapport au crâne de chimpanzé :

- a. Une mâchoire avancée et un trou occipital avancé
- b. Une mâchoire reculée et un trou occipital avancé
- c. Une mâchoire avancée et un trou occipital reculé
- d. Une mâchoire reculée et un trou occipital reculé

2. Choisissez la proposition exacte :

Ces deux propriétés caractérisent le crâne humain :

- a. Une face prognathe et une mâchoire parabolique (en V)
- b. Une face prognathe et une mâchoire en U
- c. Une face plate et une mâchoire parabolique (en V)
- d. Une face plate et une mâchoire en U

3. Choisissez uniquement la proposition inexacte :

- a. Le chimpanzé possède des dents peu différenciées
- b. Le chimpanzé possède un fort bourrelet sus-orbitaire
- c. L'humain possède un menton fort et un front
- d. L'humain possède des canines non saillantes

9 Homo – Chimpanzé – Parenté



5 min

corrigé
p. 99

Lycée J-P Vernant, Sèvres

On cherche à préciser les relations de parenté entre quelques primates à partir de données anatomiques. Un arbre phylogénétique a été construit à partir des états dérivés de caractères présents dans le tableau ci-après.

	Bourrelet sus-orbi- taire	Cage thoracique	Front	Bassin	
Homo neanderta- lensis	Développé	En tonneau	Fuyant	Court et large	
Homo sapiens	Absent	En tonneau	Haut	Court et large	
Chimpanzé	Développé	En tronc de cône	Fuyant	Long et étroit	
Homo erectus	Développé	En tronc de cône	Fuyant	Court et large	
État ancestral : case bleutée État dérivé : case non bleutée					arbre construit d'après ces données

Tableau 4.12 – Matrice espèces/caractères et arbre de parenté
pour quelques espèces de primates

A partir des informations extraites du tableau, choisissez parmi les affirmations ci-dessous celles qui sont exactes et celles qui sont fausses. Dans ce dernier cas, justifiez la réponse.

- Homo neanderthalensis et Homo sapiens ont un ancêtre commun qu'ils ne partagent pas avec Homo erectus.
- Homo erectus est plus apparenté avec le chimpanzé qu'il ne l'est avec Homo neanderthalensis.
- L'ancêtre commun exclusif aux trois espèces du genre Homo possède une cage thoracique en tonneau.
- Le chimpanzé ne possède aucun des états dérivés des caractères présentés ici.
- Homo sapiens et Homo neanderthalensis sont les plus proches parents car ils possèdent tous deux un front haut.
- Homo sapiens est la seule espèce sur cet arbre à ne pas posséder de bourrelet sus-orbitaire.

10 Découverte – Nouvel Homo

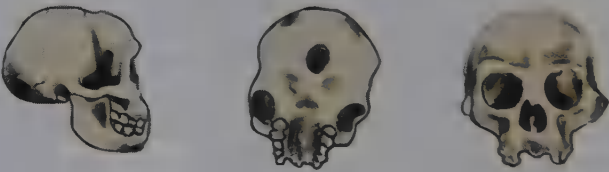


Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

En octobre 2004, des scientifiques publient dans « Nature » le résultat de leur étonnante découverte : des paléontologues ont trouvé à Liang Bua, sur l'île de Flores (Indonésie), des restes fossiles de sept spécimens humains. Pour la communauté scientifique, cette découverte permet de fonder au sein de la lignée humaine une nouvelle espèce baptisée *Homo floresiensis*, « l'Homme de Flores ».

Tirez du document proposé les informations justifiant l'appartenance de « l'Homme de Flores » au genre *Homo* et celles justifiant d'en faire une nouvelle espèce au sein du genre *Homo*.

DOCUMENT : Caractéristiques de l'Homme de Flores

Âge estimé	Les sept spécimens exhumés ont été datés entre -12 000 et -95 000 ans.
Caractères crâniens	 Cloison nasale renforcée par une structure osseuse (comme les Australopithèques). Os de la voûte crânienne épais, comme le genre <i>Homo</i>, mais renforcés vers l'arrière. Forte courbure de l'os occipital, comme le genre <i>Homo</i>.
Capacité crânienne	380 cm ³ .
Taille	Les ossements les plus complets sont ceux d'une femme âgée de 30 ans dont la taille est estimée à un mètre.
Os	Fémur : insertion plus oblique que celle d'<i>Homo sapiens</i>. Bassin : plus large que celui d'<i>Homo sapiens</i>. Les tibias et les os des bras retrouvés confirment pour l'ensemble des spécimens qu'il s'agissait d'êtres de petite taille d'environ un mètre de hauteur. Présence de longs bras qui rappellent davantage les australopithèques qu'<i>Homo erectus</i>.
Traces d'activités	Outils : présents sur le site où les restes osseux de l'Homme de Flores ont été découverts. Feu : maîtrisé. Des lames de silex noir, finement taillées, ont été découvertes dans les mêmes niveaux que les ossements.

1 **QCM** **Vérification des connaissances**→ énoncé
p. 871. Réponses exactes : **c d**

Les Australopithèques font partie de la lignée humaine mais forment un genre que l'on distingue du genre Homo. Ils montrent quelques caractères dérivés de la lignée humaine, non présents chez les chimpanzés, donc ils ne font pas partie de lignée des chimpanzés et sont assimilés à un rameau détaché assez tôt de la lignée humaine. Leur faible volume cérébral et leur face prognathe correspond bien « au-dessus des épaules » à des caractères de grands singes. Par contre, si l'on regarde « en dessous des épaules », leur bassin relativement élargi gomme les ressemblances avec les grands singes.

2. Réponses exactes : **c d e**

Notre espèce, Homo sapiens, est le représentant actuel du genre Homo. Les premiers représentants connus du genre Homo datent de -2,5 Ma.

3. Réponses exactes : **b e**

Un bassin élargi offre une plus grande surface d'insertion pour les muscles fessiers, ce qui favorise la bipédie. Les membres antérieurs plus longs que les membres postérieurs sont plutôt des caractéristiques de grands singes pratiquant la quadrupédie. Les bipèdes ont des fémurs convergents vers les genoux car cela permet de rapprocher le point d'appui du pied du milieu (projection verticale du centre de gravité).

2 **Vérification des connaissances**→ énoncé
p. 87

Les espèces du genre Homo ont une face réduite, un volume cérébral relativement important, une mandibule parabolique, un style de bipédie marqué par un trou occipital avancé et l'aptitude à la course à pied (longues jambes). Ils produisent des outils complexes et ont des pratiques culturelles variées.

Les premiers primates datent de -65 à -50 millions d'années (Ma), tandis que les grands primates datent de -20 Ma. Une importante diversification des grands primates est observée il y a 16 Ma, puis un affaiblissement à partir de 8 Ma. Parmi ces grands primates, le genre Homo apparaît il y a 2,5 Ma. Il est représenté par un certain nombre d'espèces fossiles qui forment une lignée buissonnante et une seule espèce actuelle : Homo sapiens.

Pour expliquer les différences importantes entre l'Homme et le Chimpanzé malgré leur extrême proximité génétique, on évoque des différences d'expression de leurs gènes du développement lors du développement pré- et post-natal. Par exemple, la durée d'expression du gène ASPM (Abnormal Spindle-like Microcephaly-associated), qui code une protéine déterminant la multiplication des cellules souches du cortex, est plus courte chez le Chimpanzé que chez l'Homme.

3 Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 87

- Un Australopithèque. ■ Un caractère dérivé. ■ Un hominoïde.

4 Homme – Primates – Parenté

→ énoncé
p. 88

Lycée Frison-Roche, Chamonix

1. Vrai : l'ancêtre commun est représenté dans l'arbre par le nœud situé le plus en bas.
2. Faux : les espèces les plus apparentées dans un arbre sont celles qui ont l'ancêtre commun le plus récent. Il s'agit donc ici de l'Homme et du Chimpanzé.
3. Faux : une espèce actuelle n'est jamais l'ancêtre d'une autre espèce. Le dernier ancêtre commun de l'Homme et du Chimpanzé n'est pas connu et peut seulement être décrit grâce aux caractères dérivés communs aux deux espèces actuelles.
4. Faux : pour la même raison que la question 3.

5 Lignée humaine – Anatomie

→ énoncé
p. 88

Lycée Léonard de Vinci, Tremblay en France

⚠ ATTENTION

Ne pas confondre la lignée humaine et le genre Homo. Même si l'on range les Australopithèques dans la lignée humaine, ils représentent un genre distinct du genre Homo. Dans la première question, il faut donc mettre en relief les caractères dérivés que possèdent les représentants du genre Homo et que ne possèdent ni le Chimpanzé ni les Australopithèques.

1. Afin de déterminer les critères d'appartenance au genre Homo, il faut relever les différences entre les espèces du genre Homo d'une part, et le Chimpanzé et les Australopithèques d'autre part. D'après le document A, les caractères dérivés propres au genre Homo sont : une mâchoire parabolique en V, un trou occipital centré, un volume cérébral relativement important, un gros orteil non opposable et la fabrication d'outils.
2. Les Australopithèques présentent un bassin court et large ainsi qu'un fémur non aligné avec la verticale. Il s'agit de caractères dérivés que possède l'Homme actuel et que ne possède pas le Chimpanzé. On peut donc affirmer que les Australopithèques sont plus proches de l'Homme actuel que du Chimpanzé.
3. D'après le document B, Homo erectus et l'Homme actuel ont une face non prognathe et un volume cérébral relativement important. Il s'agit de caractères dérivés qu'ils ont en commun et que les Australopithèques ne possèdent pas. On peut donc affirmer qu'Homo sapiens est plus proche d'Homo erectus que des Australopithèques.

6 Grands primates – Parenté

→ énoncé
p. 89

Lycée Corot, Savigny-sur-Orge

MÉTHODE

Afin d'exploiter plusieurs documents en vue de répondre à une seule question, il faut procéder méthodiquement : il faut décrire et interpréter chaque document séparément, puis, rassembler les conclusions tirées de chaque document pour répondre à la question posée. La rédaction de la réponse à la question posée ne reprend pas forcément l'ordre des documents fournis.

Le document A permet de comparer les caractéristiques anatomiques de trois grands primates et de l'Homme. On observe que seul l'Homme se tient debout verticalement et présente plusieurs courbures de sa colonne vertébrale. Les trois grands singes (Chimpanzé, Gorille, Orang-outan) ont la tête dirigée vers l'avant du corps et non posée sur la colonne vertébrale comme l'Homme. Aucune des quatre espèces ne possède de queue. La capacité crânienne des trois grands primates est bien plus faible que celle de l'Homme (625 cm^3 au maximum pour le Gorille).

Le crâne des trois grands singes présente un fort prognathisme, absent chez l'Homme. L'organisation des mains et pieds montre que le pouce des mains est opposable chez les quatre espèces et le gros orteil des pieds l'est seulement chez les grands singes.

La structure sociale est similaire chez le Chimpanzé, le Gorille et l'Homme (grégaire). En considérant que l'Homme possède les états dérivés des caractères, on peut alors dire que l'Homme, le Gorille et le Chimpanzé ont en commun un ancêtre qu'ils ne partagent pas avec l'Orang-outan. Ce document permet donc de tirer des critères de classification des quatre espèces : elles ont un pouce opposable, ce qui les place parmi les Primates ; l'absence de queue les place dans le groupe des Hominoïdes. La structure sociale permet d'isoler l'Orang-outang.

Le document B nous donne la répartition des bandes claires et sombres sur le chromosome humain n° 2 et sur les chromosomes 2p et 2q des trois grands singes. On observe d'une part des similitudes de répartition des bandes entre les chromosomes 2p des grands singes et le bras court du chromosome 2 humain, et d'autre part des similitudes entre les chromosomes 2q des grands singes et le bras long du chromosome 2 humain. On peut supposer que l'ancêtre commun des quatre espèces possédait 48 chromosomes, et que chez l'Homme deux d'entre eux ont fusionné pour former l'actuel chromosome 2.

En réalisant la fusion virtuelle des chromosomes 2p et 2q de chaque Singe, on obtient un résultat plus ou moins proche du chromosome n° 2 humain. C'est le Chimpanzé qui présente le plus de similitudes de répartition des bandes. Cela montre que le Chimpanzé et l'Homme ont un ancêtre commun qui leur est propre.

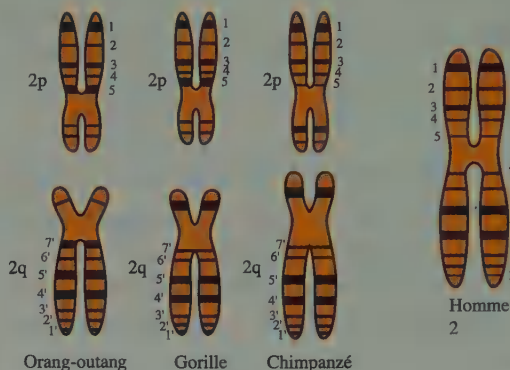


Figure 4.8 – Résultat de la fusion virtuelle des chromosomes 2p et 2q des trois Primates et comparaison avec le chromosome 2 humain

Le document C nous permet de trouver la plus forte homologie de séquence entre les chaînes alpha d'hémoglobine de Chimpanzé et d'Homme. Cela signifie que l'Homme et le Chimpanzé ont un ancêtre commun qui leur est propre et qu'ils ne partagent pas avec les autres grands primates. D'autre part ces données moléculaires permettent de déduire que le Gorille partage un ancêtre commun un peu moins récent avec le couple Homme-Chimpanzé (différence de 1,51 et 1,57 %). Quant à l'Orang-outan, il possède lui aussi un ancêtre commun avec ces trois espèces, mais cet ancêtre est plus éloigné (différence d'environ 3 %).

Les trois documents nous permettent donc de placer l'Homme dans les vertébrés (colonne vertébrale), les primates (pouce opposable) et les hominoïdes (absence de queue). Ils nous permettent également d'affirmer que l'Homme et le Chimpanzé ont un ancêtre qui leur est propre, qu'ils ne partagent pas avec le Gorille ni avec l'Orang-outan. Cet ancêtre commun devait posséder les caractères suivants : colonne vertébrale, absence de queue, faible capacité crânienne, prognathisme, pouce des mains et des pieds opposables, vie grégaire, caryotype à 48 chromosomes.

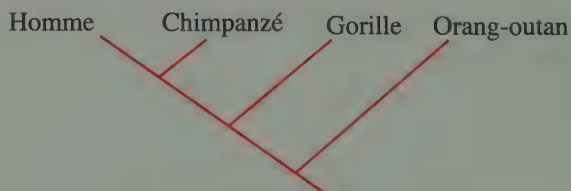


Figure 4.9 – Arbre phylogénétique construit avec l'ensemble des données

7 Homo – Squelette

➔ énoncé
p. 91

Lycée Corot, Savigny-sur-Orge

1. On observe chez « l'adolescent de Turkana » des indices d'une démarche bipède permanente : la tête est droite au-dessus de la colonne vertébrale en position debout, les membres antérieurs sont plus courts que les membres postérieurs, le bassin est court et évasé, l'axe des fémurs est incliné. Tous ces caractères sont propres à la lignée humaine.

2. Un os iliaque aurait donné un indice sur la forme du bassin. La mâchoire avec sa forme parabolique ou l'absence de canines saillantes, ainsi que le crâne auraient permis de trancher.
3. On sait que les représentants du genre *Homo* se distinguent au niveau anatomique des Australopithèques par une capacité crânienne plus importante, une régression de la face par rapport à l'ensemble de la tête et une mâchoire parabolique. Sur cette vue de face, on peut observer la présence d'un front qui traduit un volume cérébral important (le front est absent chez les Australopithèques). Pour cette raison, ce fossile est reconnu comme un représentant d'*Homo erectus* et non un Australopithèque.

8 Crânes - Homme - Chimpanzé

→ énoncé
p. 92

Lycée J-P Vernant, Sèvres

Questions 1 et 2 : les propositions exactes sont 1.b et 2.c.

Question 3 : la proposition inexacte est la proposition a.

9 Homo - Chimpanzé - Parenté

→ énoncé
p. 93

Lycée J-P Vernant, Sèvres

- a. Vrai.
- b. Faux. *Homo erectus* est plus apparenté avec *Homo sapiens* et *Homo neanderthalensis* qu'il ne l'est avec le chimpanzé, car il a en commun avec *Homo sapiens* et *Homo neanderthalensis* un caractère dérivé que ne possède pas le chimpanzé. Il s'agit du bassin court et large.
- c. Faux. L'ancêtre commun exclusif aux trois espèces du genre *Homo* doit posséder les caractères dérivés communs à ces trois espèces. La cage thoracique en tonneau n'est pas possédée par *Homo erectus*.
- d. Vrai.
- e. Faux. Seul *Homo sapiens* possède un front haut. La parenté étroite entre *Homo sapiens* et *Homo neanderthalensis* est par contre attestée par leur cage thoracique en tonneau.
- f. Vrai.

10 Découverte – Nouvel Homo

→ énoncé
p. 94

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

MÉTHODE

Il est conseillé d'organiser la réponse en deux paragraphes correspondant aux deux directives de l'énoncé : il s'agit d'une part de justifier l'appartenance de « l'Homme de Flores » au genre Homo et d'autre part de justifier d'en faire une nouvelle espèce au sein du genre Homo. Bien choisir (sans les mélanger) les arguments en faveur de l'un ou l'autre de ces deux points, en indiquant au préalable le raisonnement.

« Informations justifiant l'appartenance de l'Homme de Flores au genre Homo »

On peut tenir le raisonnement suivant : il suffit que l'Homme de Flores possède au moins un caractère dérivé propre à des représentants du genre Homo (c'est-à-dire non partagé avec les Australopithèques) pour justifier son appartenance au genre Homo.

Or l'Homme de Flores possède les caractères dérivés crâniens suivants : une face faiblement prognathe, des bourrelets sus-orbitaires peu marqués, un trou occipital relativement centré, une forte courbure de l'os occipital. Il montre également des caractéristiques en relation avec une bipédie très affirmée : fémur à insertion oblique, bassin élargi. Enfin, il manifeste des caractères comportementaux évolués : maîtrise du feu et confection d'outils complexes (lames de silex noir finement taillées).

La collection de caractères dérivés propres au genre Homo et que possède l'Homme de Flores certifie son appartenance au genre Homo.

« Informations justifiant de faire de l'Homme de Flores une nouvelle espèce au sein du genre Homo »

On peut penser que si l'Homme de Flores possède un (ou des) caractère(s) [primitif(s) ou dérivé(s)] le distinguant nettement des autres représentants du genre Homo, on peut en faire une nouvelle espèce au sein du genre Homo.

Or l'Homme de Flores montre un volume cérébral faible (380 cm^3) à la différence des autres représentants du genre Homo (ces derniers ont habituellement un volume cérébral supérieur à 600 cm^3). Il a une petite taille (1 mètre) à la différence des autres représentants du genre Homo, ainsi que des membres supérieurs allongés (« longs bras ») à la différence des autres représentants du genre Homo (chez qui le membre inférieur est allongé par rapport au membre supérieur). D'autre part, il a des fémurs dont l'insertion est plus oblique que celle d'Homo sapiens, un bassin plus large que celui d'Homo sapiens, une cloison nasale renforcée par une structure osseuse, comme les Australopithèques et à la différence des autres représentants du genre Homo, et un renforcement des os de la voûte crânienne vers l'arrière.

La collection de caractéristiques originales que montre l'Homme de Flores au sein du genre Homo peut justifier d'en faire une nouvelle espèce.

Les relations entre organisation et mode de vie, résultat de l'évolution : l'exemple de la vie fixée chez les plantes

Plan du chapitre

1. Introduction
2. L'organisation de l'appareil végétatif de la plante en relation avec la vie fixée
3. Des modalités particulières de reproduction en relation avec la vie fixée

1 Introduction

Ancrées dans le sol par leurs racines, les plantes mènent une vie fixée. Elles doivent pour leur nutrition réaliser des échanges avec l'air et le sol. Il leur faut également s'impliquer dans la reproduction sexuée, avec un plant généralement différent, parfois éloigné.

? PROBLÉMATIQUE

Que ce soit sur le plan de la nutrition ou de la reproduction, quels sont les systèmes mis en place chez les plantes au cours de l'évolution en réponse aux contraintes de la vie fixée ?

2 L'organisation de l'appareil végétatif de la plante en relation avec la vie fixée

2.1 Un système souterrain adapté au prélèvement de l'eau et des ions

La fonction principale des racines est de puiser dans le sol l'eau et les ions minéraux dont les feuilles ont besoin pour alimenter la photosynthèse.

L'absorption de l'eau s'effectue principalement grâce aux poils absorbants. Chaque poil est une cellule très allongée, différenciée à partir de l'assise la plus externe de la racine. Un poil absorbant a un diamètre de 12 à 15 micromètres pour une longueur de l'ordre du millimètre, et une fine paroi.

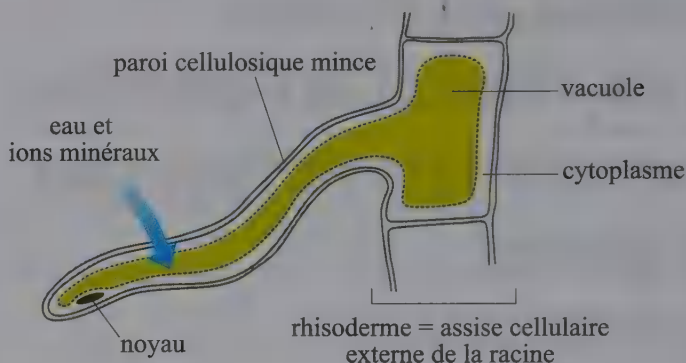


Figure 5.1 – Schéma d'un poil absorbant (proportions non respectées)

La présence de poils absorbants est circonscrite à la zone pilifère, mais leur nombre important (200 à 500 par cm^2) permet une surface de contact considérable entre le sol et la plante. En outre, la plante montre un réseau de racines à partir d'une racine principale, donc une multitude de zones pilifères. Au final, la surface d'absorption offerte par le système racinaire d'une plante peut atteindre plusieurs dizaines ou même centaines de m^2 .

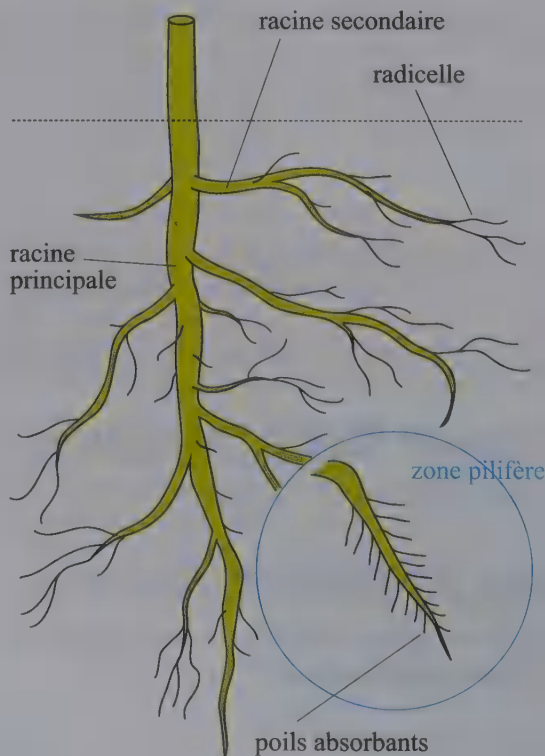


Figure 5.2 – Démultiplication de la surface d'absorption racinaire à différentes échelles

2.2 Le développement de surfaces foliaires : échanges de gaz, capture de la lumière

2.2.1 Echanges gazeux

Les échanges de gaz avec l'atmosphère concernent le dioxyde de carbone et le dioxygène (échanges gazeux respiratoires, échanges gazeux photosynthétiques) ainsi que l'eau (phénomène de transpiration). Les stomates sont des dispositifs anatomiques aménagés dans l'épiderme de la feuille, en particulier l'épiderme inférieur, et impliqués dans les échanges avec l'atmosphère. Chaque stomate est formé de deux cellules stomatiques en regard, laissant entre elles une ouverture (l'ostiole) plus ou moins fermée selon les conditions du moment. C'est par l'ostiole que s'effectue l'entrée ou la sortie des gaz.

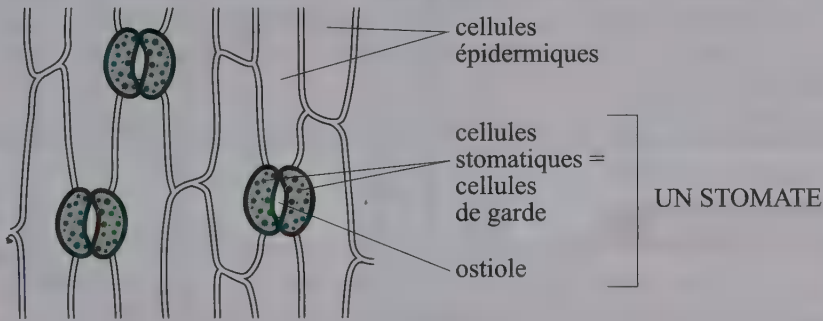


Figure 5.3 – Schéma d'un épiderme stomatifère de feuille observé au microscope

Le nombre important de stomates par cm^2 d'épiderme foliaire permet de réaliser une importante surface d'échange.

2.2.2 Capture de la lumière

Dans la feuille, le parenchyme chlorophyllien, tissu situé entre les épidermes inférieur et supérieur, héberge les chloroplastes, organites où se déroule la photosynthèse. Ce parenchyme chlorophyllien, étendu dans tout le limbe de la feuille, représente donc le tissu qui capte la lumière indispensable à l'acte photosynthétique.

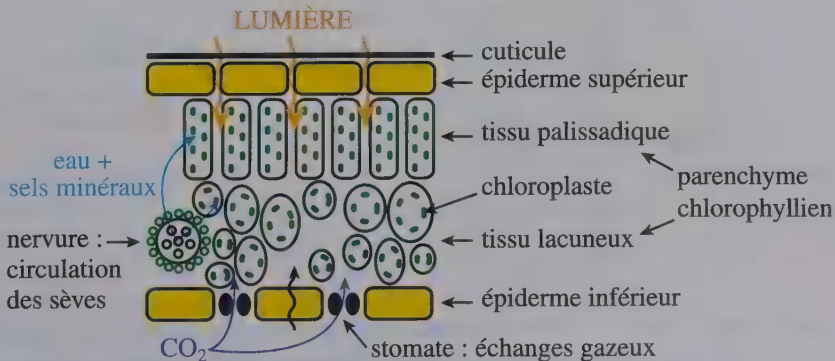


Figure 5.4 – Parenchyme chlorophyllien et capture de la lumière

La forme aplatie des feuilles réalise, pour un volume donné, une surface maximum de contact avec le milieu extérieur. Situé sous l'épiderme supérieur, le parenchyme palissadique est celui qui reçoit le maximum de lumière. C'est d'ailleurs le tissu foliaire le plus riche en chloroplastes.

➔ À RETENIR

Chez la plante, les surfaces impliquées dans les échanges sont importantes en regard de la masse et du volume, à l'instar des surfaces d'échange mobilisées par des organes d'animaux (poumons, intestin). Au moyen d'un appareil racinaire développé à différentes échelles, de l'organe à la cellule, la plante développe une surface d'échange (d'eau et d'ions) de grande dimension avec le sol. Pourvue d'un système foliaire étendu et dont l'organisation est appropriée (épiderme stomatifère permettant les échanges gazeux, parenchyme chlorophyllien permettant la capture de la lumière), la plante développe une surface d'échange de grande dimension avec l'atmosphère.

Voir exercices 5, 6 et 7.

? PROBLÉMATIQUE

La zone d'approvisionnement en eau et en ions étant dissociée de celle spécialisée dans les échanges gazeux et la capture de la lumière, comment s'effectue la circulation de matière entre les racines et les feuilles ?

2.3 Systèmes conducteurs et communication entre les appareils souterrain et aérien

Il existe, au sein du végétal, une circulation verticale de la matière par l'intermédiaire de deux tissus dits conducteurs : le xylème et le phloème. On retrouve les tissus conducteurs dans tous les organes de l'appareil végétatif : racines, tige, feuilles.

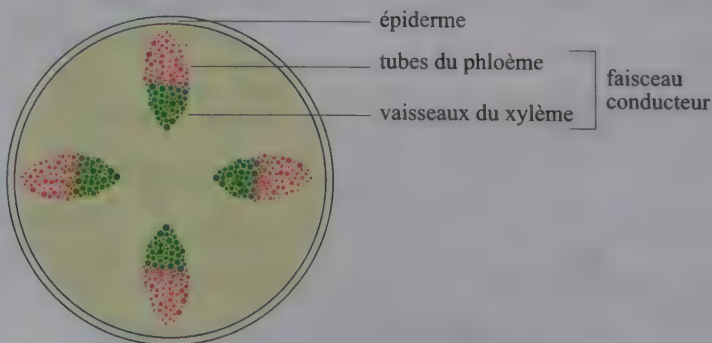


Figure 5.5 – Situation du xylème et du phloème dans une coupe transversale de tige

Le xylème est constitué de vaisseaux, unités allongées faites de cellules mortes dont les parois sont renforcées par de la lignine. Les vaisseaux du xylème véhiculent la sève brute, constituée d'eau et d'ions minéraux puisés dans le sol par les racines.

Le phloème est constitué de tubes, unités allongées faites de cellules vivantes dont les parois assez épaisses sont cellulosiques. Les tubes du phloème véhiculent la sève élaborée, formée d'eau et des matières organiques préalablement fabriquées lors de la photosynthèse, vers les parties non photosynthétiques du végétal.

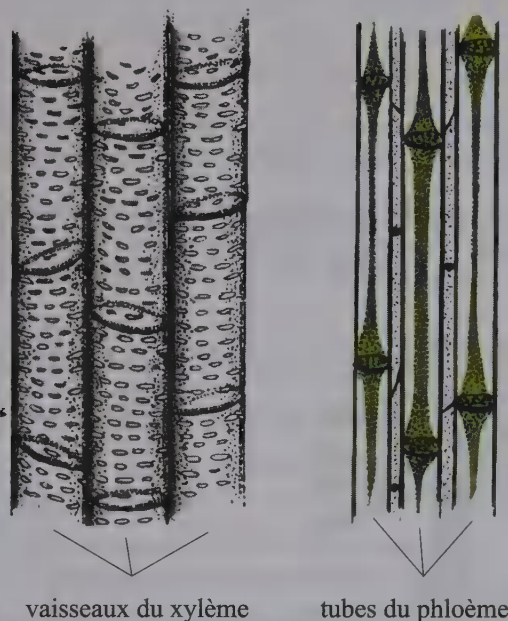


Figure 5.6 – Structure schématique des unités conductrices du xylème et du phloème

Type de sève	Matière sèche	Saccharose	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	PO ₄ ³⁻
Sève brute	1,4	0,1	0,17	0,01	0,004	0,01	0,05
Sève élaborée	220	140	0,1	0,07	0,03	0,04	0,5

Tableau 5.1 – Composition de la sève brute et de la sève élaborée (en mg pour 1000 mg) chez le chêne rouvre

À RETENIR

La plante est un végétal vasculaire. Deux systèmes de vaisseaux, le xylème et le phloème, assurent respectivement l'acheminement de l'eau et des ions des racines vers les feuilles et le transport des produits de la photosynthèse vers tous les organes.

? PROBLÉMATIQUE

Si l'organisation type d'une plante lui permet d'assurer sa nutrition dans un environnement standard, quelles adaptations particulières rencontre-t-on chez les plantes vivant dans des conditions hostiles ?

2.4 Des adaptations particulières en réponse à des conditions hostiles

2.4.1 - Des exemples de mise en place de mécanismes protecteurs

Les espèces végétales adaptées aux milieux secs ont sur l'épiderme de leurs feuilles une cuticule plus épaisse, parfois doublée extérieurement par un revêtement cireux.

Les espèces d'arbustes et d'herbes des régions sèches et désertiques développent un système de racines souterraines peu profond mais étendu à proximité de la surface de manière à récolter une quantité d'eau suffisante.

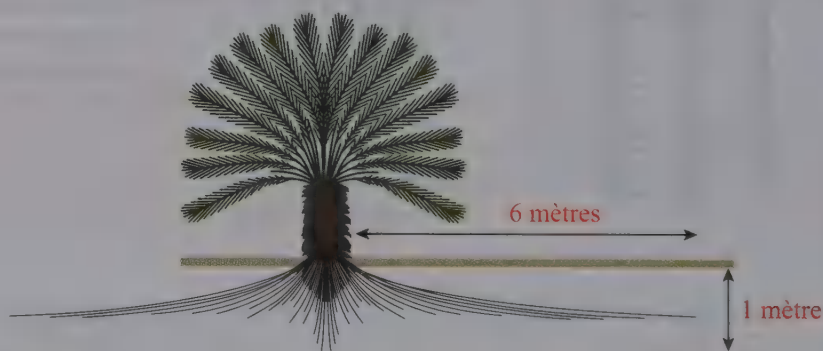


Figure 5.7 – Système racinaire du Palmier à huile

Chez l'Oyat, un végétal qui pousse sur les dunes, les feuilles sont effilées vers leur pointe et s'enroulent sur elles-mêmes lorsque l'air est sec. Cela limite les déperditions d'eau.

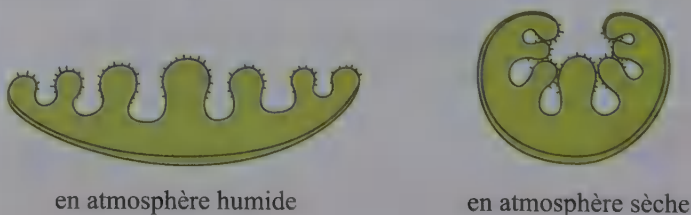


Figure 5.8 – Adaptation de la feuille d'Oyat à un milieu sec

Des excroissances pointues, les épines, sont présentes sur certains végétaux et servent à modérer la consommation par les herbivores. Une production de toxines est réalisée par certains végétaux, comme mécanisme de défense de la plante contre ses prédateurs.

2.4.2 La possibilité de résistance aux variations saisonnières

Chez les espèces des régions tempérées, la perte des feuilles et la protection des ébauches foliaires à l'intérieur de bourgeons écailleux représentent une forme de résistance à la mauvaise saison.

À RETENIR

Les plantes montrent une variété d'adaptations fonctionnelles en réponse à des contextes défavorables. Au cours de l'évolution, des structures et des mécanismes de défense contre les agressions du milieu, les prédateurs et les variations saisonnières se sont développés.

Des modalités particulières de reproduction en relation avec la vie fixée

3.1 L'organisation fonctionnelle de la fleur du végétal angiosperme

3.1.1 Notion de végétal angiosperme et plan d'organisation de la fleur

Le groupe des angiospermes réunit toutes les plantes à fleurs. Lors de la reproduction d'une plante angiosperme, les graines se forment dans un fruit clos.

Chez le végétal angiosperme, de l'extérieur vers l'intérieur d'une fleur, on distingue :

- des pièces stériles : les sépales (formant le calice) puis les pétales (formant la corolle)
- deux ensembles de pièces fertiles : les étamines (organes reproducteurs mâles), formées chacune d'un filet et d'une anthère contenant le pollen, et le pistil (organe reproducteur femelle), formé d'un ovaire subdivisé en carpelles, hébergeant les ovules, et surmonté d'un stigmate dont le rôle est de réceptionner le pollen.

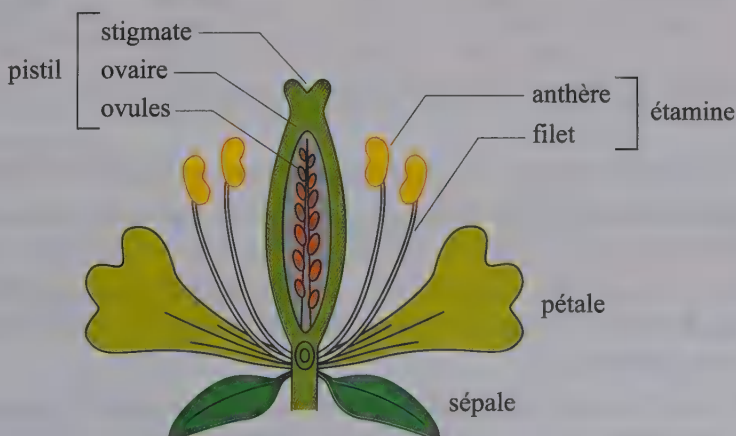


Figure 5.9 – Organisation d'une fleur de colza (Seuls 2 des 4 sépales, 2 des 4 pétales et 4 des 6 étamines ont été représentés)

L'usage est de représenter l'organisation florale d'une espèce par son diagramme floral, c'est-à-dire une coupe transversale théorique de la fleur où les différentes pièces sont représentées sur des cercles concentriques. On figure, de l'extérieur vers l'intérieur, les sépales et les pétales par des arcs de cercle, les étamines par des « B » représentant la coupe de l'anthere et le pistil par les différents carpelles.

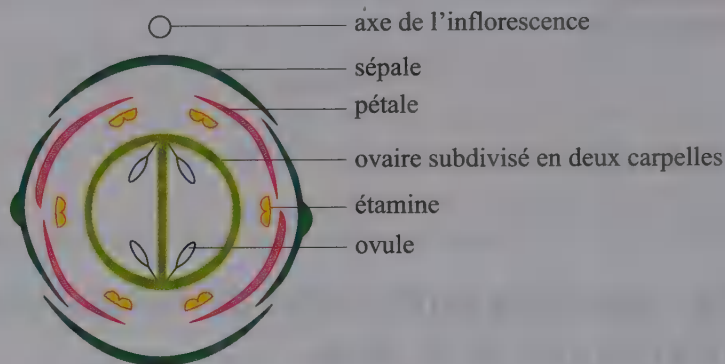


Figure 5.10 – Diagramme floral du colza

Parmi tous les éléments floraux, le pistil est celui qui définit l'angiospermie : une partie importante du pistil persiste après la fécondation et évolue en un fruit qui contiendra les graines provenant des ovules.

3.1.2 Le contrôle de l'organisation florale par des gènes du développement

Chez l'arabette des dames, organisme modèle pour l'étude du développement floral, on connaît différents mutants montrant un plan d'organisation floral modifié :

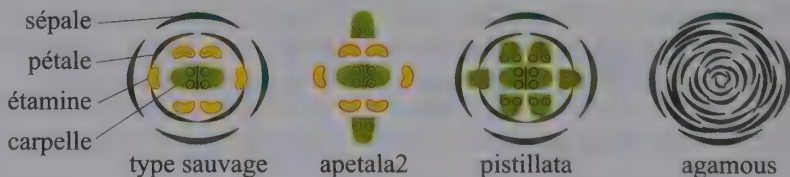


Figure 5.11 – Organisations florales normales et modifiées chez l'arabette des dames

- chez le mutant *apetala2*, il y a un remplacement des sépales par des carpelles ;
- chez le mutant *pistillata*, les sépales remplacent les pétales et les carpelles remplacent les étamines ;
- chez le mutant *agamous*, les étamines sont remplacées par des pétales et le pistil est remplacé par une seconde fleur agamous. L'arrangement sépale-pétale-pétale est réitéré plusieurs fois.

Ces transformations sont causées par des mutations de gènes. Il s'agit de gènes du développement, regroupés en trois classes de gènes A, B et C. Lors du développement de la fleur, l'identité de chaque couronne de pièces florales dépend de l'expression isolée ou combinée des groupes de gènes A, B et C.

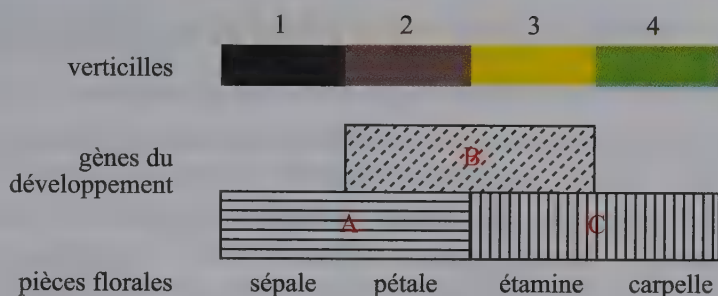


Figure 5.12 – Modèle de contrôle génétique du développement floral chez l'Arabette

3.1.3 Les étapes-clé de la reproduction du végétal angiosperme

La pollinisation, dont les agents sont principalement le vent et les insectes, est le transport du pollen émis par les étamines sur le stigmate d'un pistil.

On parle d'autopollinisation (ou autogamie) dans le cas où le stigmate d'une fleur est pollinisé par le pollen d'une fleur portée par la même plante, et de pollinisation croisée (ou allogamie) dans le cas où le pollen d'une plante est transporté sur le stigmate d'une fleur appartenant à une autre plante de la même espèce. D'une manière générale, c'est la fécondation croisée qui est la règle chez la plupart des espèces.

Lors de sa germination sur le stigmate, le grain de pollen émet un tube pollinique qui se développe dans l'ovaire où il libère les gamètes mâles. La fécondation des ovules est suivie de leur transformation en graines, qui évoluent dans le fruit issu de la transformation de l'ovaire. Après dispersion des graines et/ou du fruit, la germination d'une graine donne naissance à un nouveau plant.

➔ À RETENIR

L'organisation florale est sous le contrôle de gènes du développement. La fleur ainsi construite héberge les pièces indispensables à la reproduction sexuée du végétal angiosperme. À l'issue de la fécondation, une partie de la fleur se transforme en fruit contenant les graines.

? PROBLÉMATIQUE

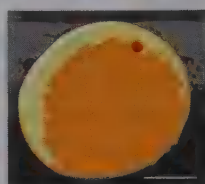
La plante étant fixée alors que la pollinisation croisée est généralement la règle, comment est facilité le rapprochement des gamètes ? D'autre part, comment est assurée la dispersion de la descendance de la plante ?

3.2 L'organisation fonctionnelle de la fleur du végétal angiosperme

3.2.1 L'adaptation de l'appareil floral à la pollinisation par les insectes

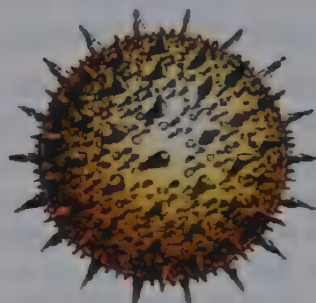
Les fleurs entomogames (c'est-à-dire pollinisées par les insectes) montrent des caractères qui « favorisent » l'intervention des insectes :

- Les grains de pollen sont généralement de plus grande taille que ceux d'une plante anémogame (dont le vent assure le transport du pollen) et l'enveloppe du pollen (exine) est généralement couverte d'ornementations (pointes, crêtes) favorisant l'accrochage du pollen aux poils du corps de l'insecte pollinisateur.



(le trait = 20 μm)

a. Maïs



b. Rose trémière

Figure 5.13 – a : grain de pollen de Maïs (plante anémogame)
et b : grain de pollen de Rose trémière (plante entomogame)

- Les nectaires, glandes produisant un liquide sucré que recherchent les insectes lors du butinage, sont situés profondément dans la fleur. En obligeant l'insecte butineur à pénétrer à l'intérieur de la fleur, la disposition des nectaires favorise la récolte du pollen.

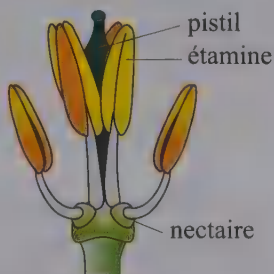


Figure 5.14 – Nectaires à la base
des étamines d'une fleur de giroflée
(les sépales et les pétales ont été enlevés)

3.2.2 L'adaptation réciproque de l'organisation et de la biologie de l'insecte pollinisateur

Les insectes butineurs montrent des caractères qui « favorisent » la visite de plante entomogame. On peut s'appuyer sur l'organisation fonctionnelle d'une abeille ouvrière :

- les pièces buccales de l'abeille dessinent un tube permettant l'aspiration du nectar prélevé au fond la fleur ;
- le corps de l'abeille est couvert de poils sur lesquels s'accroche le pollen ;
- les pattes postérieures de l'abeille sont particulièrement adaptées à la pollinisation : des brosses permettent de rassembler les grains de pollen en une grosse pelote ensuite stockée dans une corbeille.

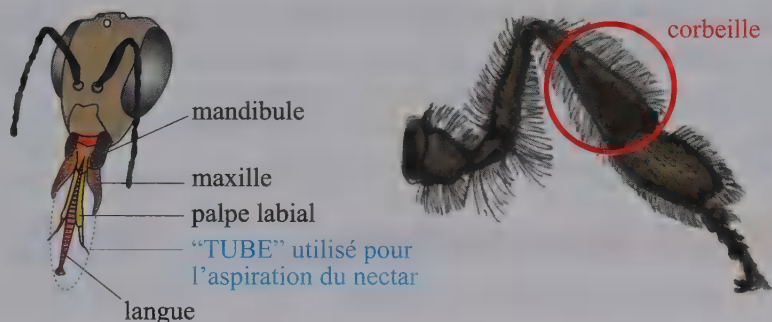


Figure 5.15 – Pièces buccales (à gauche) et patte postérieure (à droite) d'une abeille ouvrière

3.2.3 Les adaptations en relation avec la dissémination des graines et des fruits par des animaux

Les particularités de certains fruits et graines (aiguillons, crochets) leur permettent de s'attacher au pelage ou au plumage des animaux, qui participent ainsi passivement à leur dissémination.

Les animaux peuvent intervenir de manière active dans la dissémination des fruits. Par exemple, lorsque les oiseaux frugivores consomment les fruits charnus, ils rejettent ensuite les graines dans leurs excréments.

➔ À RETENIR

Chez de nombreuses plantes, la pollinisation repose sur une collaboration entre l'insecte butineur et la plante entomogame qu'il fréquente. La dispersion des graines du végétal, nécessaire à la survie de l'espèce et à la dispersion de la descendance, repose souvent sur une collaboration entre l'animal disséminateur et la plante.

Chaque collaboration est le produit d'une coévolution : des transformations se produisent chez les deux espèces au cours de l'évolution, à la suite de leurs influences réciproques.

Voir exercices 8 et 9.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 119

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

1 Les échanges gazeux entre la plante fixée et l'atmosphère :

- ☐ a se font au niveau des poils absorbants des feuilles
- ☐ b se font au niveau des stomates des feuilles
- ☐ c se font au niveau des nervures des feuilles

2 Le xylème est un tissu :

- ☐ a constitué de tubes qui véhiculent la sève élaborée
- ☐ b constitué de vaisseaux qui véhiculent la sève brute
- ☐ c présent uniquement dans la tige du végétal

2 V/F Vérification des connaissances

10 min

→ corrigé
p. 119

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

1 Le parenchyme palissadique :

- ☐ a a une disposition permettant à la feuille de recevoir le maximum de lumière.
- ☐ b contient les stomates.
- ☐ c est riche en chloroplastes.

2 Les végétaux angiospermes :

- ☐ a sont des plantes à fleurs.
- ☐ b sont représentés par toutes les plantes à graines.
- ☐ c forment des fruits provenant de la transformation des graines.

3 Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 119

Répondez brièvement aux questions suivantes :

- 1** Expliquez en quoi l'organisation du système racinaire d'une plante répond aux contraintes de la vie fixée.
- 2** Expliquez en quoi l'organisation du système foliaire d'une plante répond aux contraintes de la vie fixée.
- 3** Expliquez en quoi l'organisation de la fleur d'une plante entomogame favorise sa visite par les insectes.

4 Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 120

Qui suis-je ?

- ☐ a L'organe reproducteur femelle de la fleur. *pistil*
- ☐ b Les organes reproducteurs mâles de la fleur. *étamines*
- ☐ c Le transport du pollen émis par les étamines sur le stigmate d'un pistil. *pollinisation*

- d Le produit de la transformation de l'ovule après la fécondation.
e Le produit de la transformation de l'ovaire après la fécondation.

5 Feuille – Adaptations

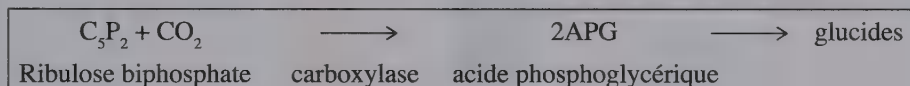


10 min

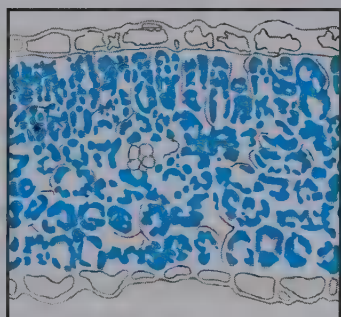
→ corrigé
p. 120

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.



résultat

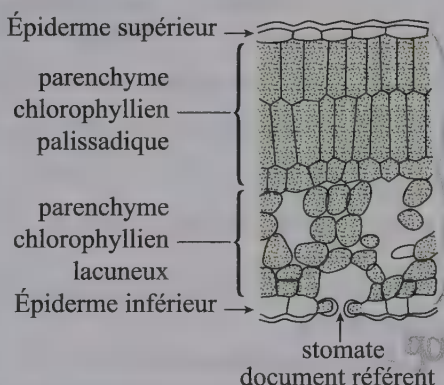


Figure 5.6 – Résultat : coupe transversale de feuille de betterave (x130) traitée par immunofluorescence (à gauche), et schéma référent d'une coupe transversale de feuille (x130) (à droite)

- Déterminez le(s) tissu(s) impliqué(s) dans la photosynthèse.
- Identifiez les adaptations de la feuille aux échanges gazeux et à la capture de la lumière chez la plante fixée.

6 Plante fixée – Défenses



5 min

→ corrigé
p. 121

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.

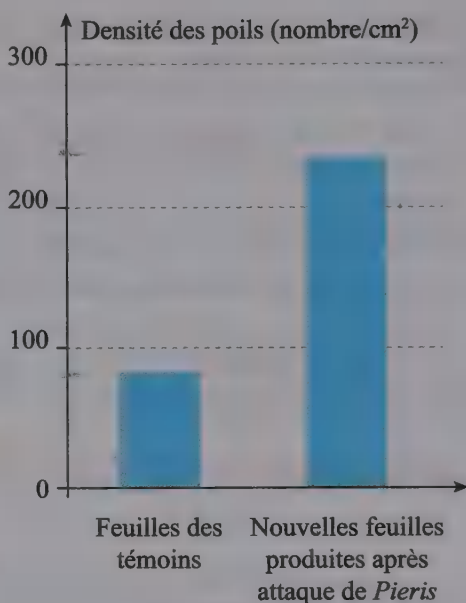


Figure 5.17 – Densité des poils présents sur les feuilles de la plante

Pour chaque proposition, choisissez la ou les bonne(s) réponse(s):

1. Le paramètre « densité de poils » mesure :
 - a. la masse de poils
 - b. le nombre de poils
 - c. le nombre de poils par unité de surface

2. La densité des poils sur les feuilles après attaque de chenille augmente :
 - a. de 50% environ
 - b. de manière non significative
 - c. de 175% 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 pieride

7

Plante fixée – Adaptations

★★

10 min

→ corrigé
p. 121

Lycée Lamartine, Paris

La gentiane de Koch vit dans les pelouses alpines, à plus de 2000 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.

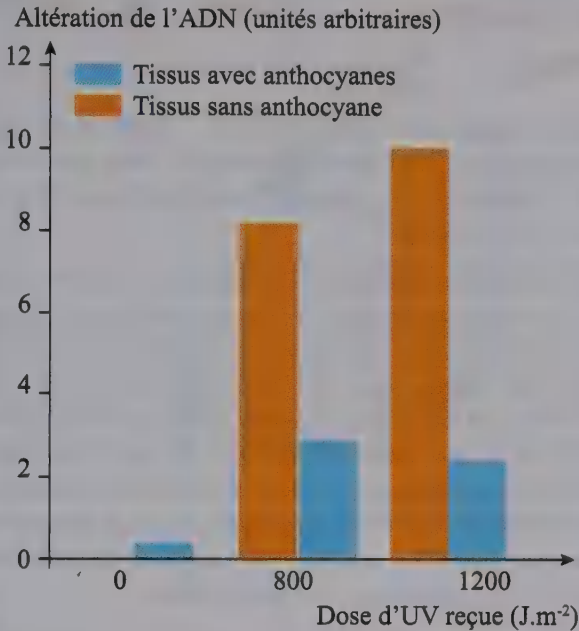


Figure 5.18 – Effet de doses variables d'UV sur l'altération de l'ADN dans des tissus végétaux

À partir des informations tirées du document, explicitez les différentes adaptations morphologiques de la gentiane de Koch aux contraintes de la vie en altitude.

8 Surfaces d'échange



10 min

→ corrigé p. 122

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'échange mobilisées par des organes d'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 m^2 , soit la taille d'un terrain de volley. On calcule un poids moyen de 1 kg pour les deux poumons, qui représentent un volume maximal de $4,5 \text{ litres}$.
- Des mesures ont été faites sur le système racinaire d'un plant d'Arabette âgé de 15 jours :
 - surface du système racinaire : $0,81 \text{ cm}^2$
 - masse du système racinaire : $1,56 \text{ mg}$

9 Plante - Insecte - Coévolution



10 min

➔ corrigé
p. 122

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. »

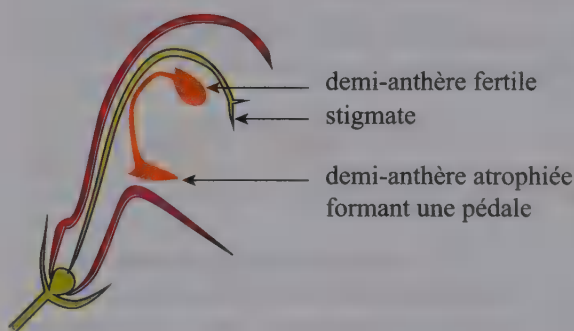


Figure 5.19 –
Organisation de la
fleur de sauge

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.

10 Plante - Insecte - Coévolution



15 min

➔ corrigé
p. 122

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 cent), ceci parce qu'il existe à l'intérieur de la fleur une fine languette qui empêche tout contact entre les étamines et le pistil.

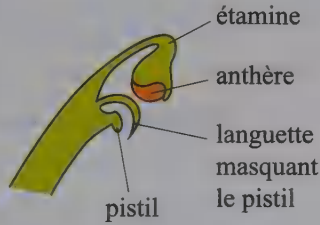


Figure 5.20 – Schéma d'une fleur de Vanille

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.

1. Indiquez en quoi le couple (fleur de vanille, abeille Mélipone) représente un exemple de coévolution.
2. Montrez comment l'action de l'Homme a contribué à la survie de la Vanille sur l'île de la Réunion.

11 Plante – Primate – Coévolution

★★★

15 min

→ corrigé
p. 123

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 a montré que les fruits constituaient 82% de la ration alimentaire des chimpanzés. On a également estimé que les différents singes rejettent sur 1km² les graines de 35 000 fruits par jour, dans leurs crottes ou en les crachant.

À l'aide de l'étude des documents 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.

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	85%	45%
à pulpe fibreuse et juteuse	3%	2%
à pulpe très réduite	11.7%	23%
fruit sec	0.3%	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 *Santira* 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 hominés, 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 opiacées 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 alimentaires des primates »
Les courriers de la nature n°227 (2006)

1 QCM Vérification des connaissances→ énoncé
p. 112

Affirmations exactes :

- 1**
- b**
- ;
- 2**
- b**

2 V/F Vérification des connaissances→ énoncé
p. 112Affirmation exacte : **1** **a**, **1** **c** et **1** **a**

Rectifications :

- 1** **b** L'épiderme contient les stomates.
- 2** **b** Les végétaux angiospermes sont représentés par toutes les plantes dont les graines se forment dans un fruit clos.
- 2** **c** Les végétaux angiospermes forment des fruits provenant de la transformation des ovaires.

3 Vérification des connaissances→ énoncé
p. 112

1 L'organisation du système racinaire d'une plante répond aux contraintes de la vie fixée en développant une surface d'échange (d'eau et d'ions) de grande dimension avec le sol. L'absorption de l'eau s'effectue principalement grâce aux poils absorbants, qui sont des cellules très allongées, de petit diamètre et à fine paroi. La présence de poils absorbants est circonscrite à la zone pilifère, mais leur nombre important permet une surface de contact considérable entre le sol et la plante. En outre, la plante montre un réseau de racines à partir d'une racine principale, donc une multitude de zones pilifères. Au final, la surface d'absorption offerte par le système racinaire d'une plante peut atteindre plusieurs dizaines ou même centaines de m².

2 L'organisation du système foliaire d'une plante répond aux contraintes de la vie fixée en développant une surface d'échange de grande dimension avec l'atmosphère. La forme aplatie des feuilles réalise, pour un volume donné, une surface maximum de contact avec le milieu extérieur. Situé sous l'épiderme supérieur, le parenchyme palissadique est le tissu qui reçoit le maximum de lumière (indispensable à la photosynthèse) et s'étend dans tout le limbe de la feuille. Le prélèvement du CO₂ se fait par les stomates, dispositifs anatomiques aménagés dans l'épiderme de la feuille. Le nombre important de stomates par cm² d'épiderme foliaire permet de réaliser une importante surface d'échange.

3 Les fleurs entomogames montrent des caractères qui « favorisent » l'intervention des insectes :

- Les grains de pollen sont généralement de plus grande taille que ceux d'une

plante anémogame (dont le vent assure le transport du pollen) et l'enveloppe du pollen (exine) est généralement couverte d'ornementations (pointes, crêtes) favorisant l'accrochage du pollen aux poils du corps de l'insecte pollinisateur.

- Les nectaires, glandes produisant un liquide sucré que recherchent les insectes lors du butinage, sont situés profondément dans la fleur. En obligeant l'insecte butineur à pénétrer à l'intérieur de la fleur, la disposition des nectaires favorise la récolte du pollen.

4 Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 112

- ☐ a Le pistil.
- ☐ b Les étamines.
- ☐ c La pollinisation.
- ☐ d La graine.
- ☐ e Le fruit.

5 Feuille – Adaptations

→ énoncé
p. 113

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

MÉTHODE

Dans cet exercice, le schéma référent de la feuille sert d'une part à la lecture du résultat (localisation de la carboxylase par immunofluorescence), d'autre part à la présentation des adaptations de la feuille en relation avec la vie fixée.

1. D'après l'aspect de la coupe transversale de feuille de betterave traitée par immunofluorescence, la carboxylase indispensable à l'incorporation du CO_2 dans la matière organique carbonée n'est détectée que dans les cellules du parenchyme chlorophyllien (lacuneux ou palissadique). C'est donc dans ce tissu qu'est réalisée la photosynthèse.
2. Le schéma référent d'une coupe transversale de feuille permet d'observer un certain nombre de dispositifs en relation avec la vie fixée :
 - le parenchyme chlorophyllien, siège de la photosynthèse, est étendu dans tout le limbe de la feuille, entre les épidermes supérieur et inférieur. Cela offre une grande surface pour la capture de la lumière.
 - les stomates représentent des interruptions dans l'épiderme des feuilles, par lesquelles des gaz peuvent rentrer ou sortir. Sur la coupe proposée, on repère un stomate au niveau de l'épiderme inférieur. C'est le nombre important (non visible sur la coupe) de stomates par cm^2 d'épiderme foliaire qui permet de réaliser une importante surface d'échange.

6 Plante fixée – Défenses

→ énoncé
p. 113

Lycée Lamartine, Paris

Affirmations exactes :

- 1c. Justification : une densité est un rapport statistique d'une entité donnée sur un élément d'espace, ici un nombre de poils par cm.
- 2c. Justification : la densité des poils a augmenté d'environ 85 poils/cm² à environ 235 poils/cm² après l'attaque de la piéride, ce qui représente environ $(235-85)/85 \times 100$ soit un peu plus de 175% d'augmentation.
- 3 b et 3c. Justification : il est peu probable que les végétaux développent des structures qui favorisent l'animal qui les consomme (élimination de l'hypothèse a) et les chenilles ne pondent pas d'œufs car ce ne sont pas des adultes (élimination de l'hypothèse d).

7 Plante fixée – Adaptations

→ énoncé
p. 114

Lycée Lamartine, Paris

La vie en altitude présente différentes contraintes : il faut lutter contre le froid (température moyenne de 2°C), résister à l'enneigement et aux vents forts, et tolérer un rayonnement ultraviolet intense.

Différentes adaptations sont observables chez la gentiane de Koch :

- l'absence de tige et la présence de feuilles plaquées au sol est une adaptation qui permet à l'appareil végétatif de ne pas donner prise au vent ;
- le bourgeon terminal souterrain et la présence de réserves de glucides dans la racine permettent de s'affranchir de la photosynthèse alors que le végétal est recouvert de neige, c'est une forme de passage de la mauvaise saison ;
- l'accumulation d'anthocyanes dans les fleurs est un dispositif de protection contre les UV. En effet, le graphique proposé indique que des tissus sans anthocyanes sont plus sujets à une altération de l'ADN que des tissus avec anthocyanes. Par exemple, on lit qu'avec une dose d'UV reçue de 800 J.m⁻², le taux d'altération de l'ADN vaut environ 8 dans des tissus sans anthocyanes et environ 3 dans des tissus avec anthocyanes.

8 Surface d'échange

énoncé
p. 115

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

MÉTHODE

L'objectif de cet exercice est de démontrer par des calculs appropriés que la plante développe des surfaces d'échanges remarquables. L'exemple des poumons, organes d'échange « emblématiques », permet d'avoir une référence chez les animaux. Pour ne comparer que ce qui est comparable, il faudra s'en tenir à la mesure du rapport surface/masse puisqu'on ne connaît pas le volume des feuilles d'Arabette.

Les deux poumons humains, spécialisés dans les échanges gazeux respiratoires, représentent un rapport surface/masse égal à 130/1 soit 130 m² par kg.

Chez l'Arabette, le système racinaire représente un rapport surface/masse égal à $0,81 \cdot 10^{-4} / 1,56 \cdot 10^{-6}$ soit 52 m² par kg.

On est donc en mesure d'affirmer que chez les végétaux, les surfaces impliquées dans les échanges, rapportées à leur masse, sont importantes et du même ordre de grandeur que chez les animaux.

9 Plante – Insecte – Coévolution

énoncé
p. 116

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Au sein de la fleur de sauge, les étamines ont une organisation très particulière. Le texte et le schéma indiquent la présence d'une pédale à l'extrémité inférieure de l'étamine. Lorsque l'insecte rentre dans la fleur, il bute sur la pédale ce qui favorise le déversement du contenu pollinique de l'anthèse fertile sur son dos. Lorsque le même insecte visite une autre fleur, plus âgée, son dos se retrouve au contact du stigmate épanoui de la fleur ce qui assure la pollinisation. On est en présence d'un exemple original d'adaptation de l'appareil floral chez une plante entomogame.

10 Plante – Insecte – Coévolution

énoncé
p. 116

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

- On parle de coévolution pour désigner les transformations se produisant chez deux espèces au cours de l'évolution, à la suite de leurs influences réciproques. Dans le cas du couple (fleur de vanille, abeille Mélipone), les particularités suivantes sont observées :
 - à l'intérieur de la fleur de Vanille, une fine languette empêche tout contact entre les étamines et le pistil ;
 - seule une petite abeille, la Mélipone, est capable de polliniser de manière naturelle la fleur de Vanille.

2. L'abeille *Mélipone* n'étant pas présente sur l'île de la Réunion, la reproduction de la Vanille n'était pas possible au moment de son introduction à la Réunion. La parade a consisté à inventer une méthode manuelle de pollinisation en soulevant la languette qui masque le pistil avec une épine, puis en rabattant au moyen du doigt l'étamine sur le pistil. De cette manière, la production de gousses (fruits) de Vanille a pu être possible. On peut donc dire que l'action de l'Homme a contribué à la survie de la Vanille sur l'île de la Réunion.

11 Plante – Primate – Coévolution

→ énoncé
p. 117

Lycée Charlemagne, Paris

Le document 1 est un tableau indiquant, pour 4 espèces végétales différentes de la réserve de Kibale, le pourcentage de germination selon que les graines soient ou non issues d'excréments. On peut remarquer que les graines non issues d'excréments germent peu ou pas du tout par rapport à celles issues d'excréments. Cela montre le rôle des animaux de cette réserve dans la reproduction sexuée des plantes, illustrant un aspect de la collaboration animal/plante.

Le document 2 est un tableau qui renseigne sur le type de fruits préférentiellement mangés par les gibbons dans une forêt de Bornéo. On peut observer que les fruits à pulpe sucrée et juteuse, qui représentent 45% des fruits de la forêt, sont très appréciés des gibbons (85% de leur ration alimentaire). Par contre, les fruits secs, qui représentent pourtant 30% des fruits de la forêt, sont peu appréciés (0,3% de la ration alimentaire des gibbons).

Le document 3 fournit des indications sur la teneur en sucre des pulpes des fruits tropicaux. Des fruits d'une teneur exceptionnelle en sucres sont observés et on interprète leur existence par le phénomène de sélection naturelle. Cette notion peut être explicitée à l'aide du document 4. En effet, la consommation de fruits sucrés procure aux primates une récompense, les conduisant à la quête de matières sucrées. Cette attitude a conduit à sélectionner naturellement les plantes produisant les fruits les plus sucrés.

Pour résumer, les fruits sucrés constituent la plus grande part de l'alimentation des primates dans les forêts. Les primates consomment ces fruits sucrés et en dispersent les graines par l'intermédiaire de leurs excréments, ce qui favorise la reproduction des espèces de plantes à fleurs qui produisent des fruits sucrés. Il s'agit bien d'une coévolution, car des transformations se produisent chez deux espèces au cours de l'évolution, à la suite de leurs influences réciproques : les espèces végétales sous l'influence des préférences alimentaires des primates, produisent des fruits de plus en plus sucrés, tandis que les primates disséminent dans leurs crachats ou leurs crottes les graines présentes dans les fruits.

La caractérisation du domaine continental

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Une lithosphère en équilibre sur l'asthénosphère : le concept d'isostasie
3. La variation de la profondeur du Moho sous les continents : une confirmation du modèle d'isostasie
4. Des preuves de l'épaississement de la croûte continentale au niveau des chaînes de montagnes
5. L'âge des matériaux continentaux

1 Introduction

En classe de première S, l'accent a été mis sur le contraste océans-continents : l'altitude moyenne de océans est différente de celle des continents (notion de distribution bimodale des altitudes), les roches représentatives sont différentes (alors que la croûte océanique est essentiellement formée de basaltes et de gabbros, la croûte continentale comporte entre autre des granites) et la densité des roches de la croûte océanique est plus importante que celle des roches de la croûte continentale.

D'autre part, les particularités du domaine océanique ont été étudiées, avec la production de lithosphère océanique au niveau des dorsales.

PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les caractéristiques remarquables de la lithosphère continentale, et en particulier de la croûte continentale qui la compose ?

2 Une lithosphère en équilibre sur l'asthénosphère : le concept d'isostasie

2.1 La notion d'isostasie

On parle d'isostasie pour désigner l'état d'équilibre hydrostatique qui serait réalisé à une certaine profondeur de la Terre. La théorie de l'isostasie postule qu'un état

d'équilibre est réalisé à une profondeur dite profondeur ou niveau de compensation, pour laquelle la pression de charge est la même en tout point de la lithosphère. La notion d'isostasie est indissociable de la gravimétrie, c'est-à-dire de l'étude du champ de pesanteur de la Terre. La pesanteur terrestre est la somme des effets sur les corps de l'attraction de la Terre (attraction newtonienne ou gravité) et de la force axifuge due à sa rotation.

En 1851, on remarqua que la masse de l'Himalaya n'attirait pas autant un pendule dans son voisinage qu'elle aurait dû le faire. D'une manière générale, au XIX^{ème} siècle on sait déjà que la pesanteur varie très peu qu'on la mesure (à altitude constante) au-dessus des océans ou au-dessus des continents (montagnes comprises). On parle alors d'anomalies gravimétriques négatives ou positives selon que la gravité mesurée en un lieu donné est inférieure ou supérieure à la gravité attendue en ce lieu. Pour expliquer ces anomalies gravimétriques, en particulier l'anomalie gravimétrique négative au niveau des chaînes de montagnes, différents modèles d'isostasie ont été proposés.

2.2 Modèles d'isostasie

2.2.1 Le modèle de Pratt (1871)

Selon Pratt, les masses situées au-dessus de la surface de compensation sont comme des colonnes de hauteurs et de densités variables et exercent à leur base des pressions identiques.

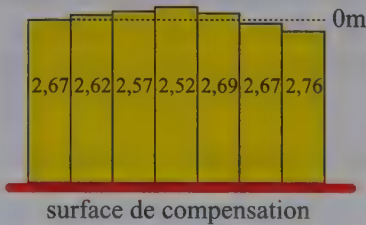


Figure 6.1 – Modèle de compensation isostatique selon John Henry Pratt (les valeurs numériques indiquent la densité des matériaux)

2.2.2 Le modèle d'Airy (1855)

Airy considère les masses superficielles comme ayant une densité constante, ce qui conduit à les prolonger vers le bas d'autant plus que l'anomalie gravimétrique est négative, c'est-à-dire à dessiner des racines sous les montagnes. Ces masses de densité constante reposent sur des roches de masse volumique plus importante.

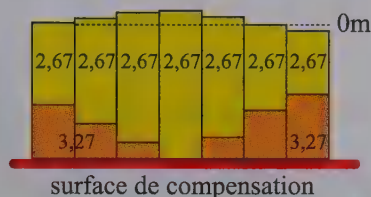


Figure 6.2 – Modèle de compensation isostatique selon George Biddell Airy (les valeurs numériques indiquent la densité des matériaux)

À RETENIR

Le concept d'isostasie était déjà un objet d'étude au XIX^{ème} siècle, où deux grands modèles furent proposés pour expliquer les anomalies du champ de gravité à la surface de la Terre. Reformulée dans le langage géologique actuel, l'isostasie désigne l'état d'équilibre de la lithosphère sur l'asthénosphère.

Voir exercices 1, 6 et 7.

PROBLÉMATIQUE

De nos jours, où en est-on de l'explication de l'équilibre de la lithosphère continentale sur l'asthénosphère ?

3 La variation de la profondeur du Moho sous les continents : une confirmation du modèle d'isostasie

3.1 Méthode de détermination de la profondeur du Moho en domaine continental

3.1.1 Rappel sur l'histoire de la découverte du Moho

En 1909, Andrija Mohorovicic, géophysicien croate, fit une observation étonnante en comparant les enregistrements réalisés dans différentes stations sismologiques à l'occasion d'un séisme survenu au sud de Zagreb. Sur certains sismogrammes, il observe non seulement les ondes P et S mais également un deuxième train d'ondes P, qu'il interprètera comme des ondes réfléchies à la limite entre deux entités : la croûte et le manteau.

Il est possible de reproduire les observations de Mohorovicic en travaillant sur un séisme montrant des caractéristiques similaires. On peut prendre l'exemple du séisme qui a touché le sud-est de la France, en Savoie, le 19 janvier 1991 et qui a été enregistré par la station sismologique OG02 située à 63,3 km de l'épicentre.

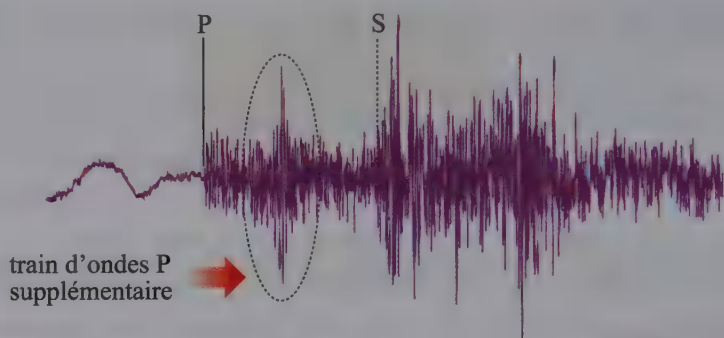


Figure 6.3 – Sismogramme enregistré par la station OG02

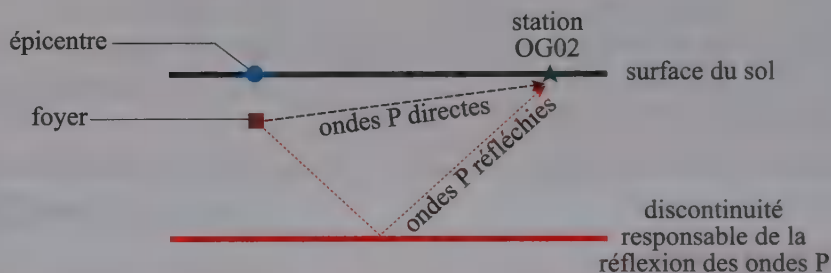


Figure 6.4 – Interprétation de l'arrivée d'un deuxième train d'ondes P : existence d'une discontinuité en profondeur

À RETENIR

Historiquement, la découverte en profondeur d'un « miroir sismique » qui réfléchit les ondes sismiques et les renvoie vers la surface a permis la mise en évidence de la limite croûte-manteau. Il s'agit de la discontinuité de Mohorovicic, dite Moho.

3.1.2 Données sismiques et méthode de calcul de la profondeur du Moho

Pour déterminer l'épaisseur H de la croûte, c'est-à-dire la profondeur du Moho, il convient de se baser sur une figure géométrique représentant le trajet des deux trains d'ondes P recueillis par certaines stations : les ondes P directes (notées P_g car elles se propagent dans la croûte continentale de nature granitique) et les ondes P indirectes (notées P_mP car elles ont subi une réflexion sur la discontinuité de Mohorovicic).

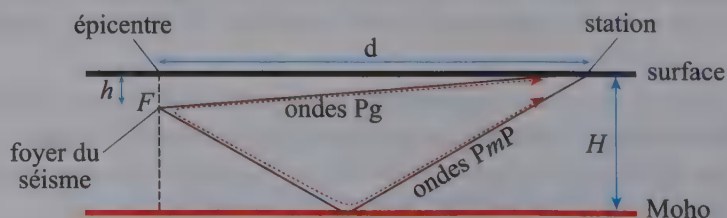


Figure 6.5 – Figure géométrique de base utilisée pour le calcul de la profondeur du Moho

Notations :

- h est la profondeur du foyer.
- $TPmP$ et TPg désignent respectivement les temps d'arrivée des ondes PmP et des ondes Pg .
- δt ($TPmP - TPg$) représente le retard des ondes PmP , en secondes, par rapport aux ondes Pg .
- V est la vitesse des ondes P dans la croûte. On admettra que dans les régions étudiées la croûte continentale propage les ondes P à la vitesse de $6,25 \text{ km.s}^{-1}$
- d est la distance épacentrale.

À partir de la figure géométrique de base, on repère un premier triangle rectangle correspondant aux trois points épiscentre-foyer-station, puis un second triangle rectangle en prolongeant la deuxième portion du trajet des sondes PmP afin de croiser l'axe vertical à l'aplomb du foyer. Il devient alors possible d'appliquer le théorème de Pythagore à deux reprises ce qui, compte-tenu du fait que le retard des ondes PmP correspond au temps mis pour effectuer le trajet « supplémentaire » parcouru par les ondes PmP , conduit à la formule :

$$H = \frac{1}{2} \left[h + \sqrt{(\sqrt{h^2 + d^2} + V \delta t)^2 - d^2} \right]$$

En mettant en relation pour chaque station, l'altitude de la station et la profondeur calculée du Moho, on obtient un graphique à deux ordonnées d'où l'on retire le constat que le Moho est plus profond à l'aplomb des reliefs élevés.

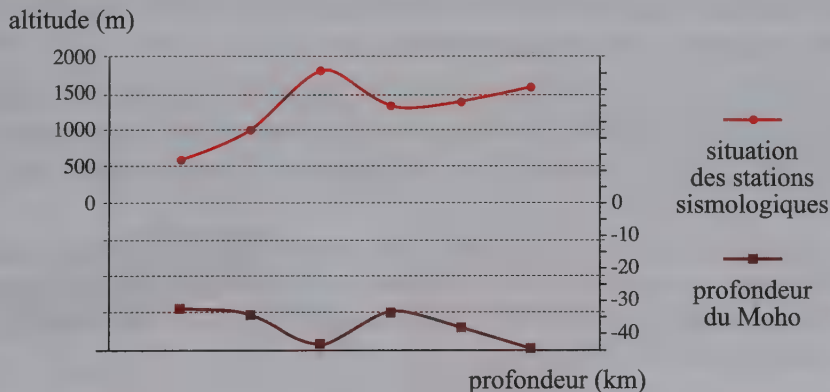


Figure 6.6 – Corrélation entre le relief positif et la profondeur du Moho pour 6 stations sismologiques du réseau alpin

Des données complémentaires rapportent que le Moho se situe à une profondeur maximale de 55 km sous les Alpes (au lieu de 30 km dans les régions non montagneuses) et jusqu'à 70 km sous l'Himalaya. Tout semble donc indiquer la présence d'une racine crustale à l'aplomb des reliefs, à l'instar de ce que prévoyait Airy dans son modèle d'isostasie.

À RETENIR

La croûte continentale est d'une épaisseur plus grande que la croûte océanique. Une chaîne de montagnes représente un relief positif auquel répond, en profondeur, une importante racine crustale. Ce dispositif corrobore le modèle autrefois proposé par Airy et contribue, en domaine continental, à l'isostasie de la lithosphère sur l'asthénosphère.

Voir exercice 5.

PROBLÉMATIQUE

En dehors des données sur la profondeur calculée du Moho, quelles preuves directes a-t-on de l'épaississement crustal sous les chaînes de montagnes ?

Des preuves de l'épaississement de la croûte continentale au niveau des chaînes de montagnes

4.1 Les indices tectoniques de l'épaississement

Dans les chaînes de montagnes, différentes déformations tectoniques sont observables sur le terrain. Il s'agit de plis, de failles inverses, de chevauchement et de charriages.

Une faille est une cassure affectant un terrain, avec mouvement relatif des compartiments ainsi formés ; une faille est dite inverse lorsque le bloc qui est au-dessus de la faille surmonte le bloc qui est en dessous de la faille.

Un chevauchement est un mouvement tectonique conduisant un ensemble de terrain à en recouvrir un autre, par l'intermédiaire d'un contact anormal peu incliné (la surface de chevauchement est comparable à une très grande faille inverse presque horizontale) dont l'ordre de grandeur du déplacement est voisin du kilomètre.

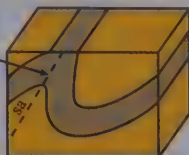
Un charriage est un chevauchement de grande amplitude (de la dizaine à la centaine de kilomètres, et au-delà). Les unités charriées sont allochtones (venues d'ailleurs), l'unité chevauchée est autochtone. On appelle nappe de charriage l'ensemble des terrains déplacés lors d'un charriage.



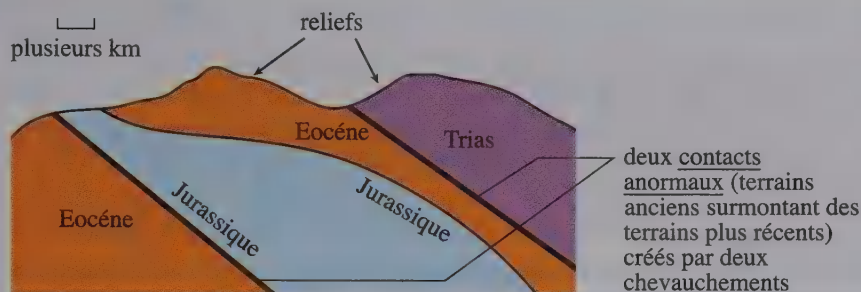
FAILLE INVERSE

le bloc au-dessus de la faille surmonte le bloc qui est en dessous de la faille

la surface axiale (sa) du pli est inclinée



PLI OBLIQUE



PAYSAGE MONTRANT DES CHEVAUCEMENTS
OU DES CHARRIAGES (col du Lautaret)

Figure 6.7 – Situation de déformations tectoniques rencontrées
dans une chaîne de montagnes : les Alpes

De telles déformations ont valeur de marqueurs montrant que la croûte continentale est le siège d'un raccourcissement et d'un épaissement.

4.2 Les indices pétrographiques de l'épaississement

4.2.1 La présence de roches métamorphiques

Les roches métamorphiques sont particulièrement présentes dans les chaînes de montagne. Il s'agit de roches provenant de la transformation à l'état solide d'une roche préexistante à la suite de changements des conditions thermodynamiques (pression et/ou température). Le gneiss et le micaschiste sont des exemples de roches métamorphiques. Les roches métamorphiques montrent une schistosité : feuilletage en plans parallèles plus ou moins serrés. Les roches métamorphiques peuvent montrer une foliation : leur structure se caractérise par une alternance de lits minéralogiques ; la foliation se superpose à la schistosité et donne un aspect rubané à la roche qui se présente sous la forme d'une succession de lits à contenu minéralogique bien défini.

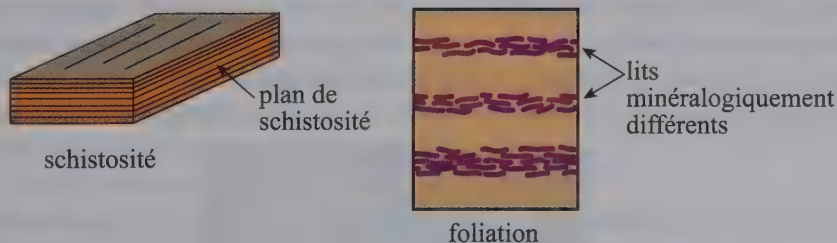
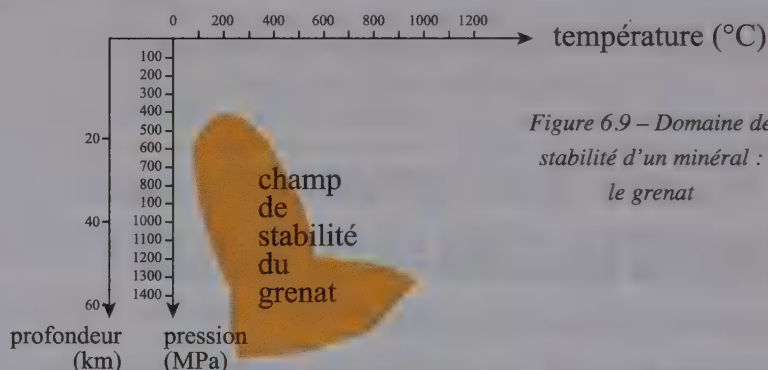


Figure 6.8 – Schématisation des caractéristiques structurales des roches métamorphiques : schistosité et foliation

La structure si particulière des roches métamorphiques (schistosité, foliation) reflète les contraintes qu'elles ont subies lors de leur formation : il s'agit de roches d'origine profonde qui se mettent en place lors de la formation des chaînes de montagnes.

4.2.2 L'observation d'une minéralogie particulière témoignant d'un enfouissement

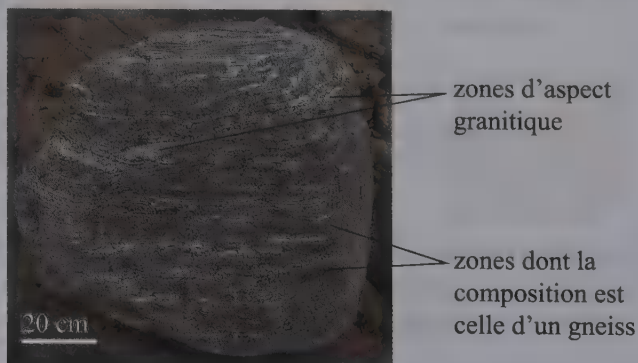
Les roches métamorphiques montrent une minéralogie particulière, car un minéral donné n'est stable que dans un certain domaine de pression et de température. Au-delà de ce domaine, le minéral se transforme, au cours de réactions métamorphiques, en un autre minéral. Le domaine de stabilité n'est pas le même selon les minéraux. Ainsi, la présence de certains minéraux ou de certaines associations minéralogiques dans une roche métamorphique va permettre de reconstituer les conditions de pression et température qui régnaient lors du métamorphisme de la roche. A titre d'exemple, la présence de grenat dans des micaschistes indique que la roche correspondante a été soumise à une pression importante, correspondant au minimum à 15 km de profondeur.



4.3 Des roches montrant des empreintes de fusion partielle : les migmatites

Dans les chaînes de montagnes, il est possible d'observer des migmatites. Il s'agit de terrains montrant des lentilles de granite (roche magmatique) contenues dans des zones ayant la composition d'un gneiss (roche métamorphique). Les lentilles de granite sont interprétées comme le résultat de la fusion partielle du gneiss au terme d'un métamorphisme très intense. On se situe dans le domaine de l'anatexis : les roches métamorphiques ont été enfouies à des conditions de température et de pression suffisantes pour initier la fusion d'une partie des minéraux du gneiss et permettre ponctuellement la production de magma. Les migmatites sont fréquentes dans les zones de racine des montagnes érodées. Elles témoignent d'un enfouissement particulièrement important.

Figure 6.10 – Aspect d'une migmatite



➔ À RETENIR

La croûte continentale des chaînes de montagnes montre des indices tectoniques (plis, failles inverses, nappes) et des indices pétrographiques (métamorphisme et traces de fusion partielle) prouvant qu'elle s'est épaissie par le jeu du raccourcissement et de l'empilement des terrains. Au gré des empilements, la racine crustale se met en place en profondeur, assurant l'équilibre isostatique.

Voir exercices 2, 8 et 9.

5 L'âge des matériaux continentaux

La radiochronologie désigne l'ensemble des méthodes de datation d'objets (minéraux, roches, fossiles..) utilisant les teneurs d'éléments radioactifs et celles de leurs produits de désintégration. On parle de radiochronomètre pour désigner un élément radioactif utilisé pour la datation.

? PROBLÉMATIQUE

Comment obtient-on l'âge absolu des roches de la croûte continentale à partir des radiochronomètres qu'elles renferment naturellement ?

5.1 Les fondements scientifiques de la radiochronologie

5.1.1 Notion de désintégration et loi de décroissance radioactive

Un noyau radioactif est un noyau instable subissant spontanément une transformation appelée désintégration permettant un retour à la stabilité. Pour un noyau donné, le phénomène de désintégration est donc aléatoire et imprévisible. Par contre, l'évolution statistique d'une population de noyaux répond à une loi de probabilité bien déterminée. Le nombre d'atomes de l'isotope radioactif décroît suivant une loi exponentielle. Ce nombre est divisé par deux chaque fois qu'il s'écoule une certaine durée appelée temps de demi-vie (période) de l'isotope radioactif : la demi-vie (notée $t_{1/2}$) est la durée au bout de laquelle la population initiale N_0 est divisée par deux.

La loi s'écrit : $N = N_0 e^{-\lambda t}$, où :

N = nombre d'atomes de l'isotope radioactif au temps t

N_0 = nombre d'atomes de l'isotope radioactif au temps 0

λ = constante de désintégration (constante radioactive) traduisant la vitesse à laquelle l'isotope radioactif se désintègre.

5.1.2 Application à la datation d'une roche

La mesure de la quantité de l'isotope père et/ou de l'isotope fils au temps t (le présent) va permettre de déterminer la durée t écoulée depuis la fermeture du système (le « système » est ici constitué par l'échantillon que l'on souhaite dater), révélant ainsi

l'âge t de l'échantillon. On appelle fermeture du système le moment où les isotopes de l'échantillon utilisé (minéral ou roche totale) ont été confinés : aucun constituant n'a pu quitter l'échantillon et aucun constituant extérieur n'a pu y rentrer.

5.2 Obtention d'un âge par la méthode de la droite isochrone

5.2.1 Principe général

Dans la majorité des situations de datation, il s'agit de trouver l'âge de la roche alors que les quantités initiales d'isotope père et d'isotope fils sont inconnues. L'exemple le plus courant est celui du couple Rubidium-Strontium. ^{87}Rb est un isotope radioactif du rubidium, qui se désintègre en strontium ^{87}Sr . Pour obtenir l'âge d'une roche en utilisant le radiochronomètre ^{87}Rb , il faudra d'une part réaliser des mesures sur plusieurs échantillons de même origine, d'autre part utiliser un isotope de référence pour comparer les mesures des différents échantillons. Il s'agira ici de l'isotope ^{86}Sr qui est stable (comme ^{87}Sr) et qui n'est pas radiogénique (contrairement à ^{87}Sr). Les mesures sont faites au spectrographe de masse pour différencier les isotopes.

5.2.2 Compréhension de la méthode à partir du modèle de vieillissement d'une roche contenant du rubidium

On prend l'exemple d'une roche contenant trois échantillons (par exemple, trois minéraux différents) hébergeant du rubidium. À partir de la fermeture du système (situation initiale à $t = 0$), dans chaque échantillon les rapports isotopiques $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ diminuent du fait de la désintégration du ^{87}Rb . Dans le même temps, les rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ augmentent du fait de l'obtention de ^{87}Sr radiogénique à partir de la désintégration du ^{87}Rb . Comme la vitesse de désintégration du rubidium est constante, les divers rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ restent alignés sur une droite dite isochrone. La pente de la droite isochrone est d'autant plus forte que les échantillons sont âgés.

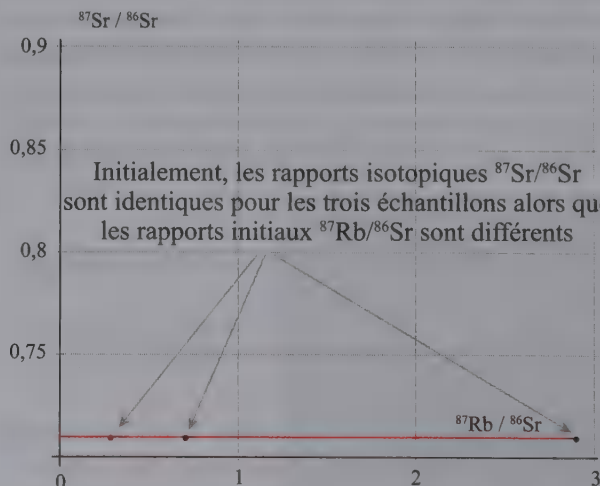


Figure 6.11 – Situation à la fermeture du système pour trois échantillons d'une même roche contenant du rubidium

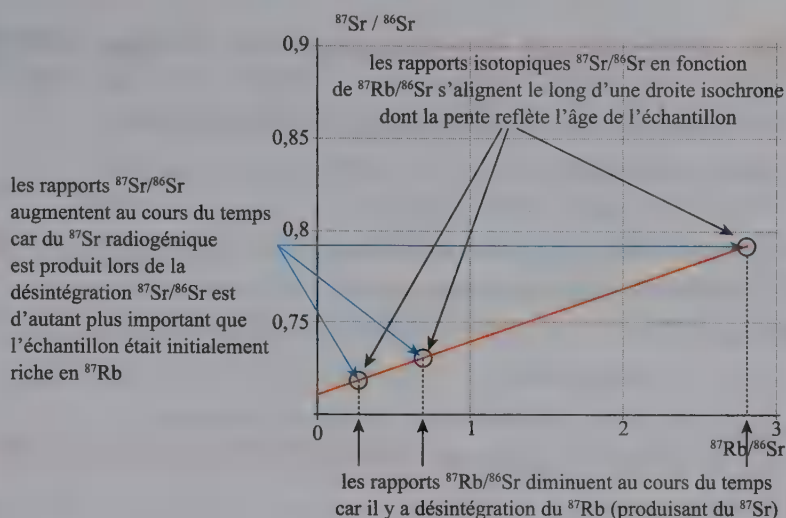


Figure 6.12 – Graphique de vieillissement pour trois échantillons d'une même roche contenant du rubidium

5.2.3 Obtention de l'âge de la roche à partir du coefficient directeur de la droite isochrone

Concrètement, on mesure, dans des minéraux de la roche qu'on souhaite dater, les rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$. Avec les mesures réalisées, on construit le graphique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = f(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})$ qui représente la droite isochrone, d'équation $y = ax + b$. Or, l'expression mathématique du rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction du rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ est : $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = (e^{\lambda t} - 1)(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}) + (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{initial}}$

Par conséquent, la pente de la droite isochrone est égale à $(e^{\lambda t} - 1)$. En connaissant la pente a de la droite isochrone, on obtient le temps t écoulé depuis la fermeture du système, c'est-à-dire l'âge de la roche : $t = \ln(1+a)/\lambda$.

5.3 Résultats : les âges des roches du domaine continental

Du fait de la demi-vie importante (48,8 Giga-années) du rubidium 87, on ne peut dater par cette méthode que des objets relativement anciens, âgés de plus de 100 Ma. L'application de la méthode Rubidium-Strontium à différentes roches de la croûte continentale nous apprend qu'elle héberge des roches d'âge variable, pouvant atteindre par endroits plus de 4 Ga. L'ancienneté de certains endroits du domaine continental contraste avec la relative jeunesse de la croûte océanique, dont l'âge n'excède jamais 180 Ma.

➔ À RETENIR

L'âge des matériaux de la croûte continentale est déterminé par radiochronologie en utilisant un outil mathématique : la méthode de la droite isochrone. On brosse ainsi le portrait d'un domaine continental porteur de roches d'âges variés et ponctuellement très anciennes, ce qui confirme le contraste océan-continent.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 143

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1** La croûte continentale est :
 - a** plus dense que la croûte océanique
 - b** moins épaisse que la croûte océanique
 - c** formée de roches voisines du granite
- 1** L'isostasie :
 - a** est un concept moderne
 - b** est une théorie non validée par les données de terrain
 - c** est interprétée par différents modèles
- 1** La gravité mesurée :
 - a** est à peu près la même en tout point de la surface du globe
 - b** est plus élevée qu'ailleurs au sommet d'une chaîne de montagnes
 - c** est moins élevée qu'ailleurs au sommet d'une chaîne de montagnes

2 V/F Vérification des connaissances

10 min

→ corrigé
p. 143

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

- 1** Dans une chaîne de montagnes :
 - a** On observe des déformations tectoniques (plis, failles inverses, nappes) qui témoignent d'un amincissement et d'une elongation des terrains
 - b** Des racines mantelliques sont présentes à l'aplomb des reliefs élevés
 - c** On observe des roches particulières témoignant d'un enfouissement
- 1** Les roches métamorphiques :
 - a** proviennent de la fusion partielle de roches préexistantes
 - b** ont la même structure que les roches magmatiques
 - c** ont une composition minéralogique qui dépend des conditions de pression et de température auxquelles elles ont été soumises
- 1** Le phénomène d'anatexis :
 - a** est à l'origine de la présence de migmatites dans les chaînes de montagne
 - b** correspond à la production de roches métamorphiques au terme d'un magmatisme très intense
 - c** peut se dérouler lorsque les roches sont profondément enfouies

3 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 144

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

- 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
- 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

4 Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé p. 144

Qui suis-je ?

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

5 Domaine continental, isostasie

★★★

20 min

→ corrigé p. 144

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Le document représente une coupe schématique des zones superficielles du globe terrestre comprenant une grande partie de terres émergées avec plaines et montagnes et une partie de zones marines (représentées en bleu). Les valeurs indiquées correspondent aux vitesses des ondes P (en km/s) mesurées en différents points dont les profondeurs vont de 0 à 70 km. On rappelle que le Moho correspond à une variation brutale de vitesse des ondes : sous cette discontinuité, la vitesse des ondes P atteint et dépasse la valeur de 8 km/s. On connaît par ailleurs la vitesse moyenne des ondes P dans la croûte continentale superficielle : $V = 5,6$ km/s et dans la croûte océanique : $V = 6,7$ km/s.

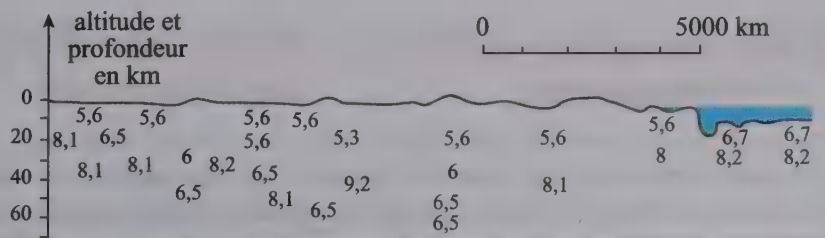


Figure 6.13 – Distribution des vitesses des ondes P en domaine océanique et continental

- Tracez une ligne continue représentant le Moho (justifier la méthode utilisée).
- Mettez en valeur les différentes zones du globe qui apparaissent sur ce schéma et nommez-les.
- Indiquez en quoi cette étude révèle les caractéristiques du domaine continental.
- Indiquez en quoi cette étude conforte l'un des modèles d'isostasie.

6 Croûtes – densités



corrigé
p. 145

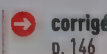
Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

À partir des données et mesures ci-après, démontrez que la croûte continentale est moins dense que la croûte océanique.

- Données :** la masse volumique est le rapport de la masse d'un échantillon sur son volume. La densité d'un objet est le rapport de sa masse volumique sur la masse volumique de l'eau exprimée dans la même unité. La masse volumique de l'eau est égale à 1 g/cm^3 ou 1 T/m^3 .
- PROTOCOLE ET RESULTATS** de mesure de la masse et du volume d'un échantillon de roche :

Matériel	Protocole	Résultats
- une balance - une éprouvette graduée - un échantillon de basalte et un échantillon de granite de taille adaptée au volume de l'éprouvette - eau	Mesure de la masse de chaque échantillon :	GRANITE
	- Chaque échantillon est pesé. Mesure du volume de chaque échantillon : - De l'eau est versée dans l'éprouvette jusqu'à une graduation repère ; - L'échantillon est immergé dans l'eau de l'éprouvette ; - On lit le niveau atteint par l'eau, une fois l'échantillon totalement immergé au cm^3 près ; - On en déduit le volume de l'échantillon.	- granite utilisé : 85g. - niveau initial de l'eau dans l'éprouvette : 150mL - niveau atteint par l'eau, une fois l'échantillon totalement immergé : 182mL BASALTE - basalte utilisé : 110g - niveau initial de l'eau dans l'éprouvette : 150mL - niveau atteint par l'eau, une fois l'échantillon totalement immergé : 188mL

7 Croûte continentale – épaisseur



corrigé
p. 146

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

En appliquant le principe d'isostasie, trouvez l'épaisseur h de la racine d'une montagne dont le relief positif est de 3000m, sachant que la densité du manteau lithosphérique est de 3,2 et qu'en zone non montagneuse la croûte continentale a une épaisseur de 30km pour une densité de 2,7. Vous vous appuierez sur un schéma explicatif.

8 Déformations – épaissement

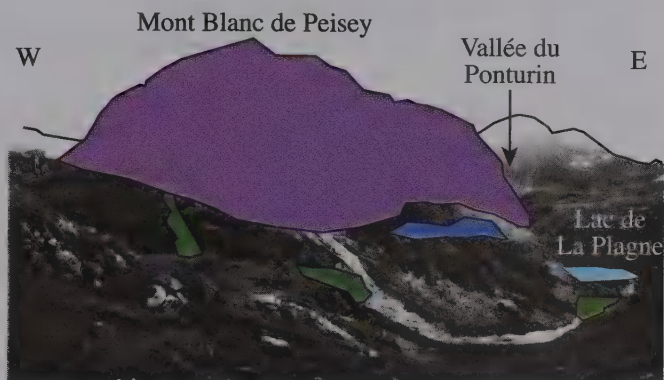


5 min

→ corrigé
p. 146

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Montrez en quoi les données de terrain visibles dans le panorama ci-après, photographié dans le Parc de la Vanoise (Lac de La Plagne), s'accordent avec l'idée de raccourcissement et d'épaississement de la croûte continentale dans les chaînes de montagnes.



- calcaires du Trias
- lambeaux d'une couverture de marbres du Jurassique supérieur reposant directement sur le socle
- micaschistes du socle, non datés mais antérieurs au Trias

Figure 6.14 – Affleurements visibles sur le panorama de la vallée du Ponturin photographié sur le sentier du col du Plan Séry (d'après des données de Jacques Debelmas : Guide géologique du Parc national de la Vanoise, Éditions du BRGM, 1994)

Secondaire	Crétacé	-65 Ma
	Jurassique	-135 Ma
	Trias	-205 Ma
Primaire	Permien	-245 Ma
		-295 Ma

Tableau 6.1 – Échelle (partielle) des temps géologiques (Ma : millions d'années)

9 Métamorphisme – Enfouissement



10 min

→ corrigé
p. 147

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Des micaschistes montrant différentes compositions minéralogiques affleurent d'Ouest en Est dans le massif de l'Agly (Pyrénées Orientales). À l'extrémité ouest de ce même massif, il est possible de rencontrer des roches métamorphiques montrant des secteurs ayant l'apparence de granite (présence de feldspath potassique et de quartz provenant d'une fusion partielle).

Situation du micaschiste	Ouest	Centre	Est
Composition minéralogique du micaschiste	quartz, muscovite, biotite, sillimanite	quartz, muscovite, biotite, andalousite	quartz, biotite

Tableau 6.2 – Situation et composition des roches métamorphiques récoltées dans le massif de l'Agly

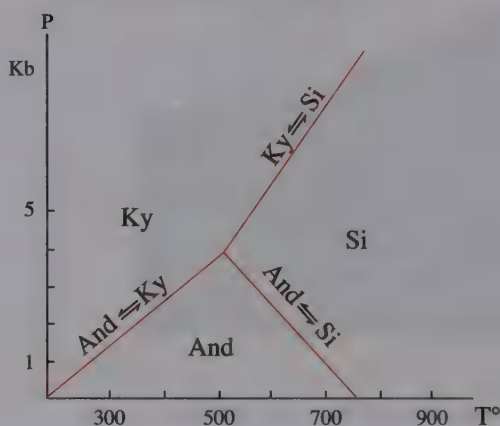


Figure 6.15 – Quelques champs de stabilité de minéraux du métamorphisme

Ky : disthène
And : Andalousite
Si : Sillimanite

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

Les informations contenues dans les documents permettent de penser que ;

1. Lorsque la température et la profondeur augmentent, la sillimanite devient instable et se transforme en andalousite.
2. Le métamorphisme des roches a été d'intensité croissante d'ouest en est.
3. Le domaine de l'anatexie a été atteint.

10 Âge –granite

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.

Page suivante : Tableau 6.3 – Mesure des rapports $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans les minéraux d'un granite

$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
1.8	0.72
5	0.74
14.6	0.82
24.2	0.9
56.2	1.15

À partir de ce document, déterminez l'âge de ce granite.

11 Âge – chondrite – granite

★★

15 min

➔ corrigé p. 147

Lycée Marseilleveyre, Marseille

À l'aide des documents A, B et C, présentez comment on peut dater de façon absolue 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. La constante de désintégration du ^{87}Rb , notée λ , est de $1.42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$. L'équation sur laquelle est fondée la méthode est : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}) (e^{\lambda t} - 1) + (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$.

Document B : Données concernant la météorite chondritique

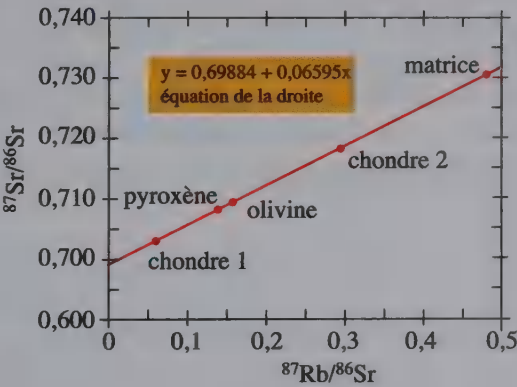


Figure 6.16 – Mesure des rapports isotopiques de différents fragments d'un météorite de type chondritique

Document C : Données concernant le granite γ

	^{87}Rb (en atomes/mg)	^{86}Sr (en atomes/mg)	^{87}Sr (en atomes/mg)
Orthose	$110 \cdot 10^{19}$	$26,8 \cdot 10^{19}$	$19,9 \cdot 10^{19}$
Mica noir	$107 \cdot 10^{19}$	$2,1 \cdot 10^{19}$	$2,4 \cdot 10^{19}$
Mica blanc	$93 \cdot 10^{19}$	$3,1 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{19}$

Tableau 6.4 – Concentrations isotopiques des minéraux du granite

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

12 Datation – granites



15 min

corrigé
p. 148

Lycée Marseilleveyre, Marseille

Dans un massif ancien érodé du domaine continental, deux granites (notés X et Y) sont présents. Exploitez méthodiquement le corpus documentaire proposé de manière à déterminer lequel des deux granites X et Y est le plus âgé.

Document a : situation en coupe

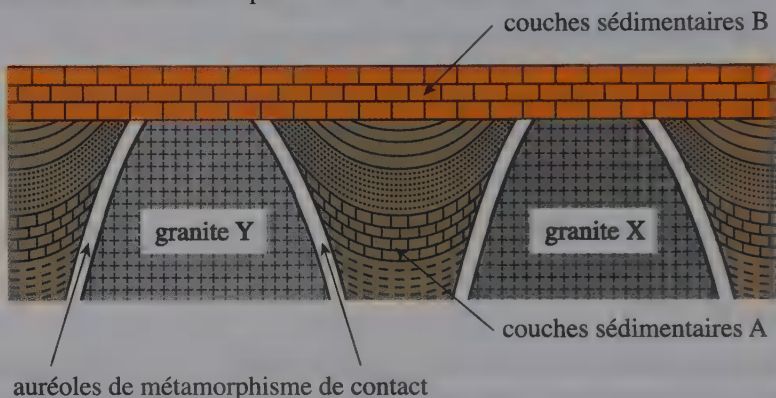


Figure 6.17 – Coupe des formations géologiques rencontrées dans une région de France

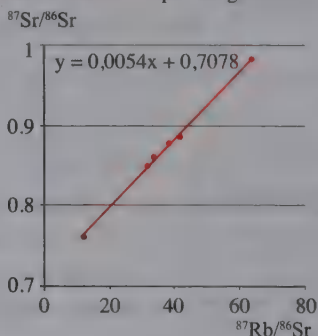
Document b : méthodes des isochrones appliquée aux granites X et Y

Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ pour les minéraux des granites ont été obtenus au spectrographe 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. 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 :

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

t = âge de la roche λ = constante de désintégration pour le couple Rb-Sr

^ Droite isochrone pour le granite Y



Droite isochrone pour le granite X

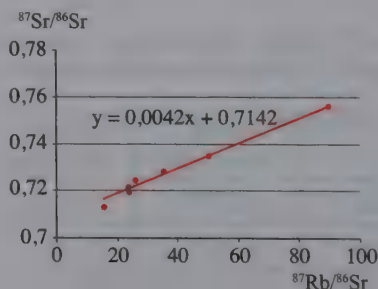


Figure 6.18 – Droites isochrones pour les granites X et Y

1 QCM Vérification des connaissances→ énoncé
p. 136Réponses exactes pour chaque série de propositions : **1** **C** ; **2** **C** et **3** **a**

Explications complémentaires :

1 La proposition a est fausse car le granite, roche représentative de la croûte continentale a une densité voisine de 2,7 tandis que le basalte, roche représentative de la croûte océanique a une densité de 2,9. La proposition b est fausse car la croûte continentale a une épaisseur moyenne de 30 km alors que celle de la croûte océanique n'excède pas 10 km.

2 La proposition a est fausse puisque des modèles d'isostasie étaient déjà proposés au XIX^{ème} siècle. La proposition b est fausse puisque l'exploitation des sismogrammes enregistrés par différentes stations a permis de calculer sous les montagnes une épaisseur de croûte continentale (révélé par la profondeur du Moho) confortant le modèle d'isostasie proposé par Airy (présence de racines crustales).

3**⚠ ATTENTION**

Ne confondez pas gravité et anomalie gravimétrique. Si l'on relève une anomalie gravimétrique négative au niveau des montagnes, c'est justement parce que la gravité n'y est pas très différente de celle mesurée en plaine alors que l'excès de relief, donc de masse, devrait induire une gravité plus élevée.

Les affirmations b et c sont fausses car à l'aplomb d'une montagne, la présence d'une racine crustale moins dense que le manteau vient compenser l'excès de masse que représente le relief positif.

2 V/F Vérification des connaissances→ énoncé
p. 136**1** Affirmation exacte : **C**

Rectifications :

a On observe des déformations tectoniques (plis, failles inverses, nappes) qui témoignent d'un épaissement et d'un raccourcissement des terrains.

b Des racines crustales sont présentes à l'aplomb des reliefs élevés.

2 Affirmation exacte : **C**

Rectifications :

a Les roches métamorphiques proviennent de la transformation à l'état solide de roches préexistantes.

b Les roches métamorphiques ont une structure différente de celles des roches magmatiques : elles peuvent montrer une schistosité, une foliation.

3 Affirmation exacte : **a** et **c**

Rectification :

a Le phénomène d'anatexie correspond à la production de roches magmatiques au terme d'un métamorphisme très intense.

3 QCM Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 136

1 Réponse exacte : **c**

2 Réponses exactes : **b** et **c**

L'exactitude de la proposition **2 c** tient au fait que l'élément ^{86}Sr est à la fois stable et non radiogénique.

4 QCM Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 137

- a** Le strontium.
- b** L'isotope ^{86}Sr .
- c** Une droite isochrone.
- d** Le temps de demi-vie.

5 Domaine continental, isostasie

→ énoncé
p. 137

Lycée Richelieu, RUEIL-MALMAISON

1.

MÉTHODE

Il est indiqué que sous le Moho, la vitesse des ondes P atteint et dépasse la valeur de 8 km/s. Il s'agit donc de tracer sur le document une ligne qui passe au-dessus des zones où la vitesse des ondes P est supérieure à 8 km/s et au-dessous des zones où la vitesse des ondes P est inférieure à 8 km/s

2. On sait que le Moho est la limite croûte-manteau. Il est indiqué que les zones marines sont représentées en bleu sur la coupe. On peut donc définir trois zones sur le document : la croûte continentale, la croûte océanique et le manteau.
3. Un fois le tracé du Moho effectué, on peut identifier sur le document les caractéristiques suivantes :
 - l'épaisseur de la croûte continentale est d'une part variable d'un endroit à un autre, d'autre part nettement supérieure à celle de la croûte océanique ;
 - la croûte océanique et la croûte continentale ne sont pas constituées des mêmes matériaux, puisqu'elles ne propagent pas les ondes P à la même vitesse.
4. Une fois le tracé du Moho effectué, on peut mettre en relation sa profondeur et le

relief observé en surface. On observe que le Moho est plus profond à l'aplomb des reliefs positifs. Il existe donc des racines crustales sous les montagnes. Sachant que la croûte continentale est moins dense que le manteau sous-jacent, les racines crustales représentent un dispositif qui permet l'équilibre isostatique en domaine continental. Ce dispositif conforte l'un des modèles autrefois proposés : celui d'Airy en 1855.

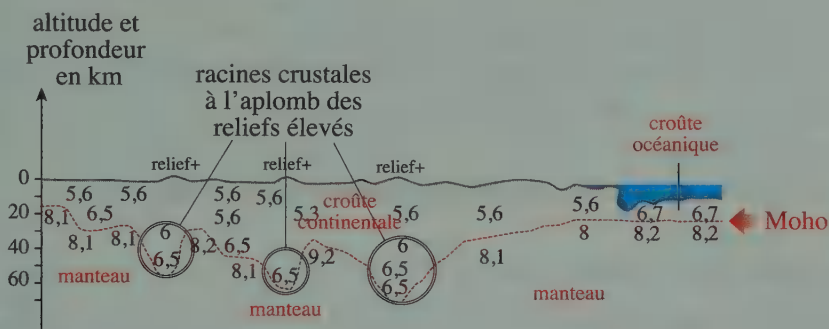


Figure 6.19 – Document annoté de manière complète en réponse à l'exercice

6 Croûtes – densités

→ énoncé
p. 138

Lycée Richelieu, RUEIL-MATMAISON

MÉTHODE

Il s'agit dans un premier temps de calculer la densité des deux roches proposées, puis dans un second temps de les associer à l'une des deux croûtes afin de répondre au sujet.

Calcul de la densité d'un granite et d'un basalte

L'échantillon de granite occupe un volume de $182 - 150$ soit 32 mL . Cet échantillon pèse 85 g . Sa masse volumique vaut donc $85/32$ soit $2,6\text{ g/mL}$. Comme la masse volumique de l'eau est de 1 g/cm^3 c'est-à-dire 1 g/mL , on détermine une densité de $2,6$ pour ce granite.

L'échantillon de basalte occupe un volume de $188 - 150$ soit 38 mL . Cet échantillon pèse 110 g . Sa masse volumique vaut donc $110/38$ soit $2,9\text{ g/mL}$. On détermine donc une densité de $2,9$ pour ce basalte.

De la densité des roches à celle de la croûte

On sait que la croûte océanique est essentiellement formée de basaltes et de gabbros alors que la croûte continentale comporte entre autres des granites. On peut donc, en forçant le trait, assimiler la densité de la croûte océanique à celle d'un basalte et la densité de la croûte continentale à celle d'un granite. Comme on a calculé que le granite est une roche moins dense que le basalte, on arrive à la conclusion que la croûte continentale est moins dense que la croûte océanique.

7 Croûte continentale – épaisseur

énoncé
p. 138

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Le principe d'isostasie postule qu'un état d'équilibre est réalisé à une profondeur dite profondeur ou niveau de compensation, pour laquelle la pression de charge est la même en tout point.

Il doit donc y avoir, à partir de la base de la racine (niveau de compensation), un équilibre des masses verticales que l'on soit dans un domaine avec ou sans montagne.

Sous la plaine, au niveau de compensation, la pression de charge est :

$$(h \times 3,2) + (30 \times 2,7)$$

Sous la montagne, au niveau de compensation, la pression de charge est :

$$2,7 \times (30+3+h)$$

On a donc, selon l'équilibre isostatique : $(h \times 3,2) + (30 \times 2,7) = 2,7 \times (30+3+h)$

Cette équation équivaut à : $3,2h + 81 = 89,1 + 2,7h$, d'où l'on tire $h = 16,2$ km.

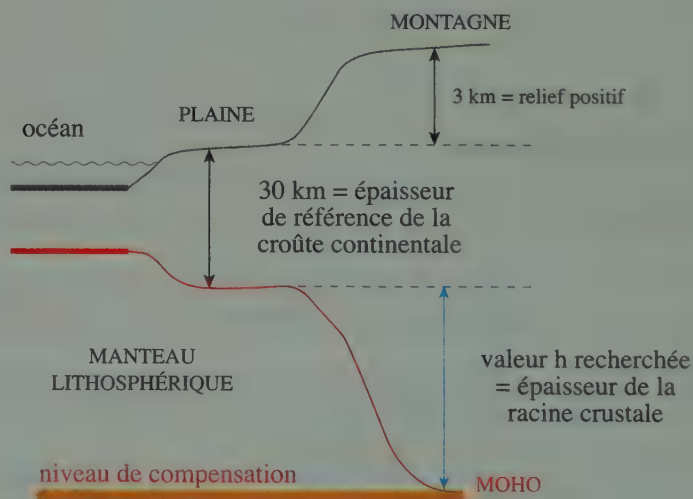


Figure 6.20 – Schéma représentant la situation à étudier sur la base du principe d'isostasie

8 Déformations – épaississement

énoncé
p. 139

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Dans le panorama de la vallée du Ponturin, on identifie une superposition anormale de terrains. Les calcaires du Trias, formant le Mont Blanc de Peisey, reposent sur un socle sur lequel figurent des marbres du Jurassique supérieur. Comme l'échelle des temps géologiques indique que le Trias est antérieur au Jurassique, on peut imaginer que les terrains datant du Trias ont été charriés postérieurement à leur formation. Le Mont Blanc de Peisey représenterait une nappe de charriage. On est bien en

présence d'un marqueur tectonique montrant que la croûte continentale est le siège d'un raccourcissement et d'un épaississement.

9 Métamorphisme – Enfouissement

→ énoncé
p. 139

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

La proposition 1 est fausse : la lecture du diagramme de stabilité des minéraux montre au contraire que c'est l'andalousite qui se transforme en sillimanite lorsque la température et la profondeur augmentent.

La proposition 2 est fausse : la présence de micaschiste à andalousite au centre et de micaschistes à sillimanite à l'ouest indique que les terrains situés à l'ouest ont été soumis à une profondeur et une température plus importante, ce qui correspond à un métamorphisme plus intense.

La proposition 3 est exacte. En effet, le texte révèle la présence, à l'extrémité ouest du massif, de « roches métamorphiques montrant des secteurs ayant l'apparence de granite (présence de feldspath potassique et de quartz provenant d'une fusion partielle) ». De telles roches, évocatrices de migmatites, correspondent bien à un phénomène d'anatexie.

10 Âge – granite

→ énoncé
p. 140

Lycée Bachelard, Chelles

On observe que les points correspondants aux minéraux sont alignés selon une droite isochrone :

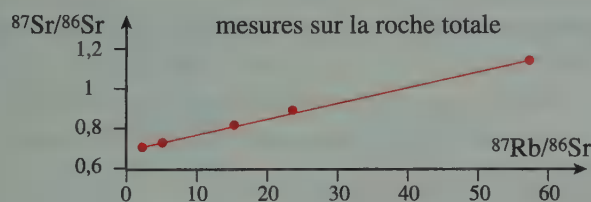


Figure 6.21 – Datation du granite par la méthode Rubidium Strontium

On sait que la pente de la droite isochrone permet de déterminer l'âge du granite. En effet, la pente est égale à $(e^{\lambda t} - 1)$.

La mesure donne une pente λ égale à 0,008 donc
 $t = \ln(a+1) / \lambda = \ln(1,008) / (1,4 \cdot 10^{-11}) = 569 \cdot 10^6 \text{ ans.}$

Le granite a donc 569 Ma.

11 Âge – chondrite – granite

→ énoncé
p. 141

Lycée Marseilleveyre, Marseille

Pour la météorite chondritique, on observe dans le document B que les points correspondant aux minéraux sont alignés suivant une droite isochrone. D'après le document A, on sait que les rapports isotopiques varient proportionnellement selon l'équation $y = ax+b$,

avec $y = {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$ et $x = {}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr}$. On peut donc dire, d'après ces deux documents, que la pente de la droite isochrone permet de déterminer l'âge de l'échantillon : $a = e^{\lambda t} - 1$. On connaît $a : 0.06595$ et on connaît λ , d'où l'obtention de l'âge.

Pour le granite γ : il suffit de calculer les rapports isotopiques ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$ et ${}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr}$ et de représenter graphiquement le premier en fonction du second. Les points correspondant aux trois minéraux seront alignés sur une droite isochrone dont la pente est égale à $(e^{\lambda t} - 1)$. Il faut ensuite calculer graphiquement cette pente et on obtiendra alors l'âge du granite.

Remarque : l'énoncé demande de ne pas effectuer de calcul, donc on se limite à l'explication de la méthode d'obtention de l'âge sans donner le résultat.

12 Datation – granites

énoncé
p. 142

Nouveau programme

MÉTHODE

Dans un premier temps, expliciter la méthode de la droite isochrone à partir des mesures de rapports isotopiques. Ensuite, résoudre l'étude de cas (lequel des deux granites est le plus âgé ?) sans sortir du sujet (le calcul des âges n'est pas demandé)

Présentation de la méthode de la droite isochrone :

Pour les différents minéraux de chaque granite, les valeurs des rapports isotopiques (${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$) en fonction de (${}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr}$) s'alignent sur une droite isochrone d'équation générale $y = ax + b$.

En nous donnant la formule exprimant (${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$) en fonction de (${}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr}$), on nous donne l'équation de la droite isochrone :

${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} =$	$(e^{\lambda t} - 1)$	$({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})$	$+ ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}) \text{ initial}$
$y =$	a	x	$+ b$

La pente « a » de la droite isochrone vaut donc « $(e^{\lambda t} - 1)$ ». De l'expression $a = e^{\lambda t} - 1$ on tire $t = [\ln(1+a)]/\lambda$. La pente de la droite isochrone permet donc d'obtenir l'âge, et plus la pente de la droite isochrone est forte, plus les échantillons qui la représentent sont vieux.

Le cas des granites X et Y :

Les rapports isotopiques des minéraux du granite X s'alignent sur une droite isochrone dont la pente vaut 0,0042.

Les rapports isotopiques des minéraux du granite Y s'alignent sur une droite isochrone dont la pente vaut 0,0054.

La pente de la droite isochrone étant plus forte dans le cas du granite Y que dans le cas du granite X, on en déduit que le granite Y est plus âgé que le granite X.

La convergence lithosphérique : contexte de formation des chaînes de montagnes

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Des traces d'un ancien domaine océanique dans les chaînes de montagnes de collision
3. Des indices d'une subduction passée
4. La cause de la subduction

1 Introduction

En classe de première S, les différents mouvements des plaques lithosphériques ont été abordés : divergence au niveau de l'axe des dorsales océaniques où de la lithosphère océanique nouvelle est créée, coulissage au niveau des failles transformantes et convergence au niveau des zones de subduction. Néanmoins, une autre situation de convergence existe : celle où, au terme de la subduction d'une lithosphère océanique, les deux marges bordant l'océan entrent en collision.

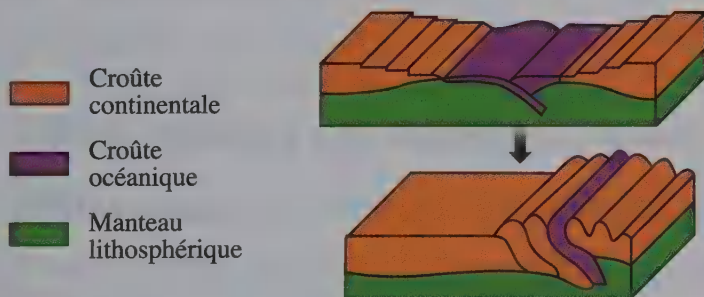


Figure 7.1 –
Convergence et
collision

? PROBLÉMATIQUE

Quels indices d'une collision entre deux lithosphères continentales, et de la subduction qui la précède nécessairement, peut-on reconnaître dans une chaîne de montagnes ?

2 Des traces d'un ancien domaine océanique dans les chaînes de montagnes de collision

2.1 Traces d'un océan disparu

Des complexes ophiolitiques présents en altitude montrent une séquence de roches semblable à celle des roches des lithosphères océaniques actuelles. On interprète donc un complexe ophiolitique comme une portion de lithosphère océanique charriée sur un continent lors de la collision.

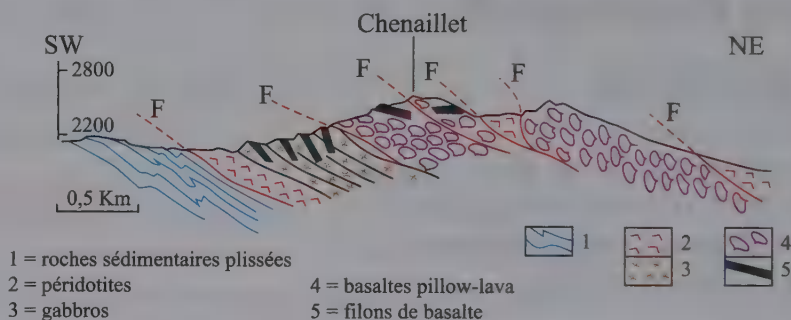


Figure 7.2 – Structure du complexe ophiolitique du Chenaillet (Hautes-Alpes)

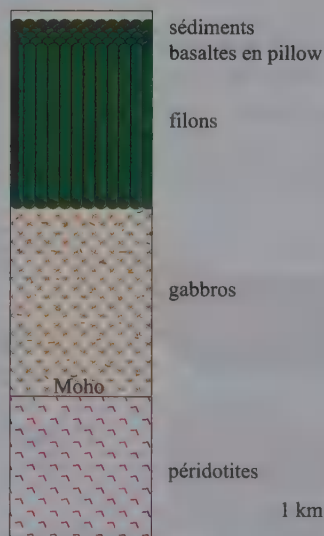


Figure 7.3 – Structure d'une lithosphère océanique actuelle

2.2 Traces d'anciennes marges continentales passives

Dans certains secteurs des chaînes de collision, on reconnaît des panneaux de socle fracturés par des failles normales associés à des séries sédimentaires dont la géomé-

trie trahit des structures de type « blocs basculés ». De tels dispositifs correspondent à d'anciennes marges passives mises en place lors de la phase d'ouverture de l'océan par fracturation (rifting) d'un continent.

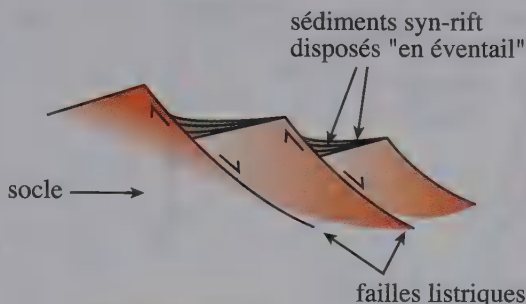


Figure 7.4 – Blocs basculés rencontrés dans une chaîne de collision

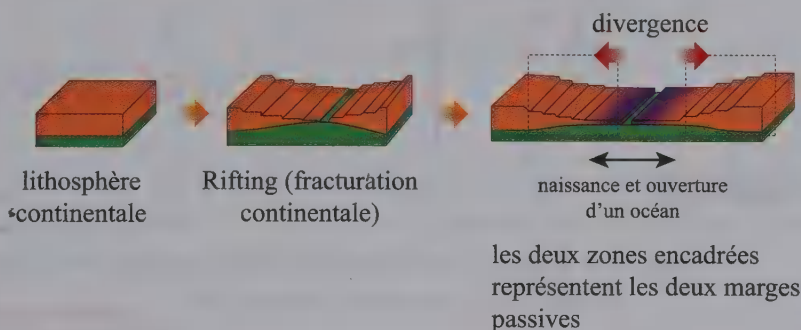


Figure 7.5 – Mise en place de deux marges passives lors de l'océanisation

Remarque : la suture de matériaux océaniques, matérialisée par les ophiolites, résulte de l'affrontement des deux marges appartenant respectivement aux deux lithosphères continentales impliquées dans la collision.

Voir exercices 5 et 7.

Des indices d'une subduction passée

3.1 Les traces d'une subduction de la lithosphère océanique

Parmi les complexes ophiolitiques, certains comportent des gabbros métamorphisés (métagabbros) de type schistes bleus ou élogites dans lesquels on trouve des associations minéralogiques (jadéite, grenat) caractérisant un métamorphisme de type « haute pression/basse température ». Ces minéraux marqueurs dévoilent que les gabbros de la croûte océanique, qui les héberge, ont été entraînés en profondeur lors d'une subduction. L'histoire d'une chaîne de collision a donc comporté une phase de fermeture d'un océan par subduction.

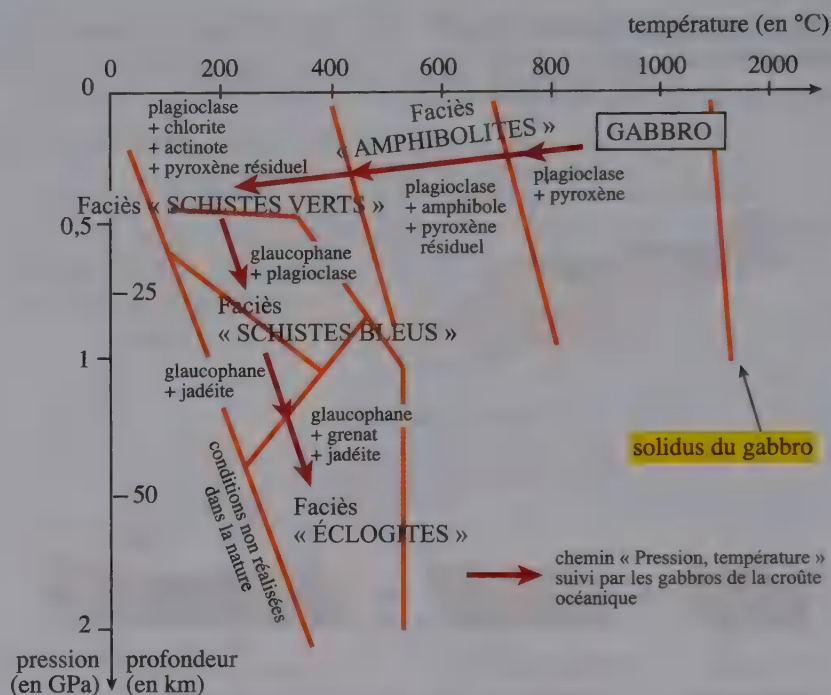


Figure 7.6 – Diagramme pression/température et conditions de réalisation des associations minéralogiques

3.2 Les traces d'une subduction de la lithosphère continentale

Certains des matériaux continentaux présents dans une chaîne de collision montrent la présence d'un minéral particulier : la coésite. Il s'agit d'une variété de la silice produite au cours d'un métamorphisme de très haute pression (correspondant à 100 km de profondeur) qui indique que des portions de croûte continentale ont été entraînées anormalement en profondeur. La coésite représente une forme particulière et stable du quartz à des profondeurs anormales.

Voir figure page suivante.

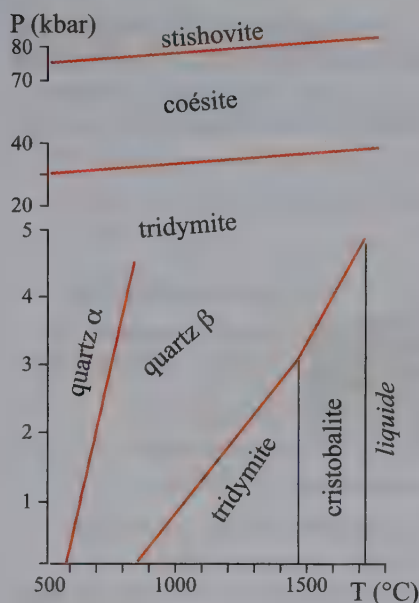


Figure 7.7 – Champs de stabilité des diverses formes de la silice en fonction de la pression et de la température

Remarque : alors que l'essentiel de la lithosphère continentale continue de subduire, la partie supérieure de la croûte connaît un épaississement par empilement de nappes dans la zone de contact entre les deux plaques.

➔ À RETENIR

Les chaînes de montagnes dites de collision expriment les traces d'un ancien domaine océanique disparu ainsi que d'anciennes marges continentales passives. Dans ces chaînes, les roches de la croûte océanique comme celles de la croûte continentale montrent une minéralogie réalisée à une grande profondeur, témoignant d'une subduction.

Voir exercices 2, 3, 6 et 8.

? PROBLÉMATIQUE

La subduction est une étape incontournable dans le scénario de formation d'une chaîne de collision. Comment se déclenche une subduction ?

La cause de la subduction

Lorsqu'elle s'éloigne de la dorsale, la lithosphère océanique se refroidit. L'isotherme 1300°C devient de plus en plus profond, or il représente la limite lithosphère-asthénosphère. Il y a donc épaississement du manteau lithosphérique. Comme ce dernier

est le composant le plus dense de la lithosphère, il y a augmentation de la densité moyenne de la lithosphère océanique. Par conséquent, il y a enfoncement de la lithosphère océanique à mesure qu'elle s'éloigne de la dorsale où elle s'est formée. On parle de subsidence thermique du fond océanique pour désigner son enfoncement causé par son refroidissement.

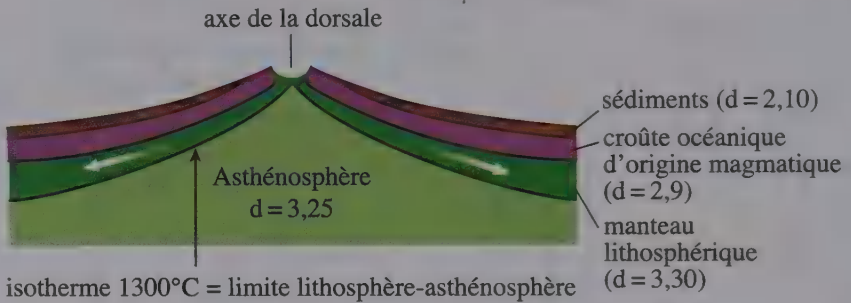


Figure 7.8 – Devenir de la lithosphère océanique postérieurement à sa formation

Lorsque la densité de la lithosphère océanique devient supérieure à celle du manteau asthénosphérique (de densité $3,25$), la lithosphère océanique n'est plus en équilibre isostatique sur l'asthénosphère. Elle exerce alors une traction qui joue un rôle moteur dans son plongement dans l'asthénosphère lors de la subduction, et d'une manière générale, dans le déplacement des plaques lithosphériques. Pour cette raison, il n'existe pas en surface du globe de lithosphère océanique d'âge supérieur à 200 millions d'années.

➔ À RETENIR

Postérieurement à sa formation, la lithosphère océanique connaît une subsidence thermique dont l'aboutissement est la subduction. La différence de densité entre la lithosphère océanique et l'asthénosphère est la principale cause de la subduction.

Voir exercices 1 et 9.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 163

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1** La convergence lithosphérique :
- a** s'exprime uniquement par la subduction.
 - b** se décline sous la forme d'une subduction ou d'une collision.
 - c** a lieu à l'axe des dorsales océaniques.
- 2** La cause de la subduction :
- a** est en rapport avec l'augmentation de densité de la lithosphère océanique à mesure que les sédiments s'y déposent.
 - b** est en rapport avec l'augmentation de densité de la croûte océanique magmatique à mesure de son vieillissement.
 - c** est en rapport avec l'épaississement de la partie mantellique de la lithosphère océanique à mesure de son refroidissement.

2 V/F Vérification des connaissances

10 min

→ corrigé
p. 163

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

- 1** Dans une chaîne de collision :
- a** on observe des traces d'anciennes marges actives.
 - b** on observe une croûte continentale amincie.
 - c** on observe des indices de la présence d'une lithosphère océanique.
- 2** Les métagabbros présents dans une chaîne de collision :
- a** attestent de la présence d'une croûte océanique.
 - b** sont des roches magmatiques.
 - c** peuvent contenir de la coésite.

3 Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 163

- 1** Expliquez pourquoi on peut affirmer qu'un océan alpin a autrefois existé à l'emplacement actuel des Alpes.
- 2** Expliquez pourquoi on peut affirmer qu'une subduction océanique a eu lieu à l'emplacement actuel des Alpes.

4 Vérification des connaissances

10 min

→ corrigé
p. 164

Qui suis-je ?

- a** Une séquence de roches de nature océanique perchée en altitude.

- b** Un minéral d'une roche de croûte continentale présent seulement à de fortes profondeurs.
- c** Un minéral d'une roche de croûte océanique présent seulement à de fortes profondeurs.
- d** Le phénomène d'enfoncement de matériaux qui refroidissent.

5 Collision – Marges passives



15 min

corrigé
p. 164

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 montre la coupe simplifiée de la marge continentale actuelle de l'océan Atlantique Nord.

Le document 2, réalisé à partir d'une coupe dans le Massif du Prégénitil (Alpes), est une reconstitution de la structure de cet ensemble avant le 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.

Comparez ces deux coupes et indiquez quelles informations apporte cette comparaison sur l'histoire des Alpes.

Document 1

Profondeur en mètre



Figure 7.9 – Coupe de la marge de l'océan Atlantique Nord

Document 2

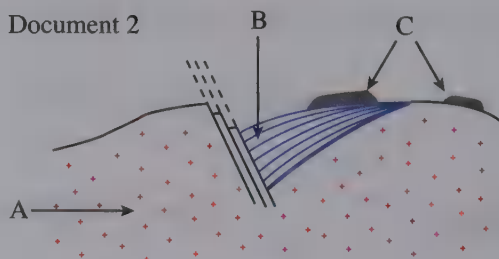


Figure 7.10 – Reconstitution du Massif du Prégénitil avant le plissement

6 Déformations – Tectonique

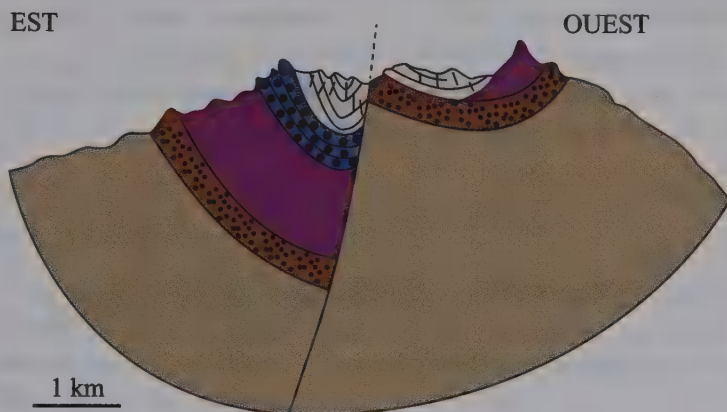


5 min

→ corrigé
p. 164

Lycée Charlemagne, Paris

Le document proposé est une coupe dans le massif des Cerces



-  Calcaire du Crétacé supérieur (–70 Ma)
-  Roches carbonatées du Jurassique et du Crétacé contenant des fossiles d'êtres planctoniques et des conglomérats de blocs anguleux du Trias
-  Calcaire du Jurassique inférieur (–200 Ma)
-  Calcaire et dolomies du Trias moyen (–230 Ma)
-  Quartzites du Trias inférieur (–250 Ma)
-  Socle primaire constitué de schistes et grès (–300 Ma)

Figure 7.11 – 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 une compression
 - 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

7 Etapes – collision



20 min

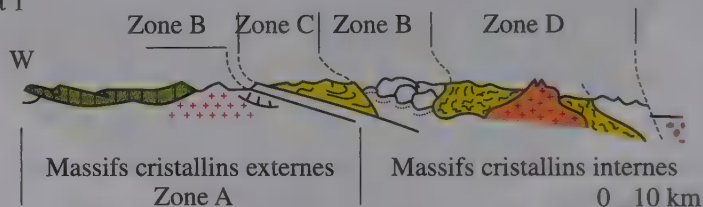
 corrigé
p. 165

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 qui ont présidé à sa formation.

Document 1



Zone A : roches sédimentaires d'origine océanique et roches plutoniques (massifs cristallins externes)

Zone B : roches sédimentaires d'origine océanique, certaines montrant un métamorphisme haute pression - basse température

Zones C : roches sédimentaires de même origine que celles de la zone D

Zones D : roches sédimentaires d'origine océanique et roches plutoniques (massifs cristallins internes)

Figure 7.12 – Coupe simplifiée de la chaîne des Alpes

Document 2



Figure 7.13 –

Observation au microscope
d'une séquence
de roches rencontrée dans
les Alpes

V : verre
O : olivine
P : pyroxène
F : feldspath
m : microlites
de feldspath

Document 3

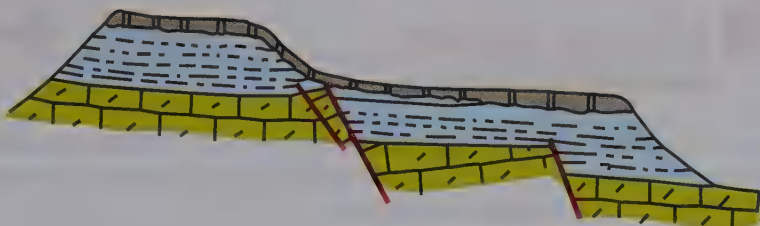


Figure 7.13 – Reconstitution des terrains dans la région de Briançon il y a 200 millions d'années

8 Traces – Collision

★★★

20 min

→ corrigé p. 166

Lycée des Arènes, Toulouse

À partir des informations fournies par les documents, 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.

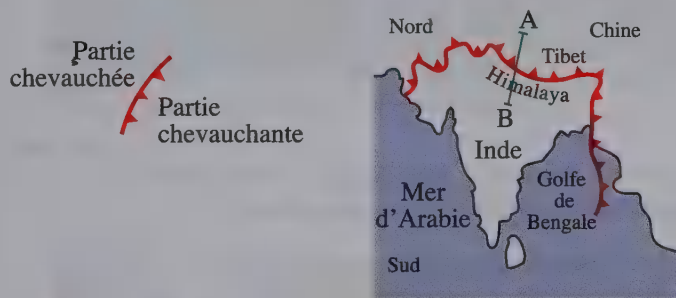


Figure 7.15 – Situation de la chaîne himalayenne

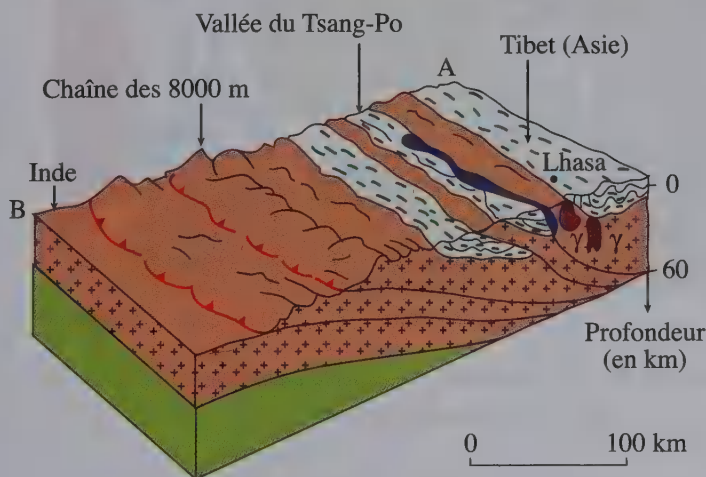


Figure 7.16 – Bloc diagramme correspondant à la coupe AB

Crôûte continentale

Granodiorites et andésites (γ)

Ophiolites

Sédiments

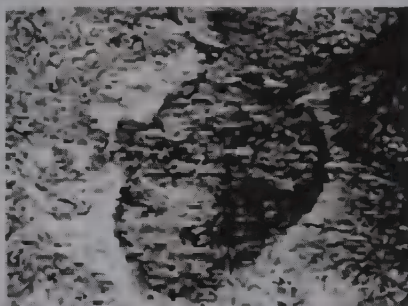
Manteau lithosphérique

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

La chaîne alpine est actuellement considérée comme résultant de la fermeture d'un domaine océanique à la suite de la convergence de deux plaques lithosphériques, la plaque africaine et la plaque européenne.

À partir des informations extraites des documents 1, 2, et 3, mises en relation avec vos connaissances, recherchez les indices de l'existence d'un ancien océan disparu par subduction.

Document 1 :

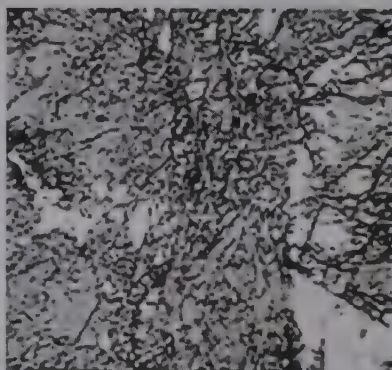


0,7mm

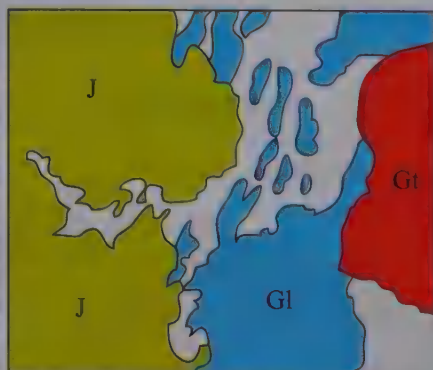


Pl : plagioclase Ac : actinote Gl : glaucophane

Figure 7.17 – Document 1a : Observation microscopique d'un métagabbro A de la région du Queyras et son schéma interprétatif.



0,7mm



Gt : grenat Gl : glaucophane J : jadéite

Figure 7.18 – Document 1b : Observation microscopique d'un métagabbro B du Mont Viso et son schéma interprétatif.

Document 2 :

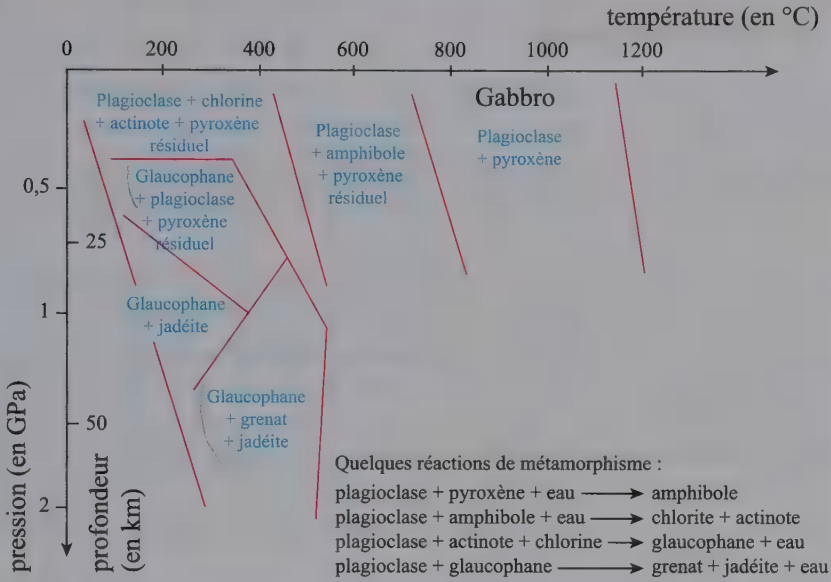


Figure 7.19 – Diagramme pression-température présentant les champs de stabilité des différentes associations minérales.

Document 3 :

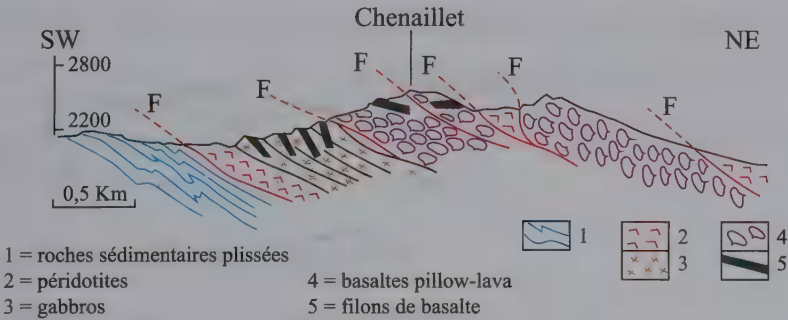


Figure 7.20 – Coupe schématique de la série ophiolitique du massif du Chenaillet (d'après Métamorphisme et roches métamorphiques – Jacques Komprobst)

10 Subduction – Cause

15 min

→ corrigé
p. 169

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

À partir des informations apportées par l'étude du document, retrouvez la principale cause de la subduction.

Distance à l'axe de la dorsale (km)		160	800	2000	4800	8000
Âge de la lithosphère océanique (en 10 ⁶ ans)		2	10	25	60	100
Flux thermique (en 10 ⁻² W.m ⁻²)		20	11	7	5	5
Epaisseur de la lithosphère océanique (en km)	Croûte*	5	5	5	5	5
	Manteau litho- sphérique	8	24	41	66	87
Masse volumique de la lithosphère océanique (en 10 ³ kg. m ⁻³)		3,127	3,222	3,25	3,268	3,275
Masse volumique de l'asthénosphère (en 10 ³ kg. m ⁻³)		3,25	3,25	3,25	3,25	3,25

*Les sédiments ne sont pas pris en compte dans le calcul de l'épaisseur.

Tableau 7.1 – Propriétés de quelques enveloppes terrestres en fonction
de la distance à l'axe de la dorsale

Informations complémentaires :

Flux thermique = quantité de chaleur dégagée par unité de temps pour 1 m^2 de surface terrestre.

Masse volumique de la croûte = $2,85.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

Masse volumique du manteau lithosphérique = $3,3.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

1 QCM Vérification des connaissances→ énoncé
p. 155Réponses exactes **1 b** et **2 c**

Justifications :

- 1** La proposition « a » est fausse car au terme de la subduction d'une lithosphère océanique, les deux marges bordant l'océan entrent en collision. La proposition « c » est fausse car c'est une divergence (et non une convergence) qui a lieu à l'axe des dorsales.
- 2** La proposition « a » est fausse car les sédiments qui se déposent au sommet de la lithosphère postérieurement à sa formation ont une faible densité (2,2), inférieure à celle de ses autres composants (croûte océanique d'origine magmatique de densité 2,9 et manteau lithosphérique de densité 3,3) : l'ajout de sédiments ne contribue donc pas à l'augmentation de la densité moyenne de la lithosphère océanique. La proposition « b » est fausse car la densité de la croûte océanique d'origine magmatique ne varie pas lors de son vieillissement : elle reste égale à 3,3 depuis l'axe de la dorsale jusqu'à son point d'entrée en subduction.

2 V/F Vérification des connaissances→ énoncé
p. 155Réponses exactes **1 c** et **2 a**

Rectifications :

- 1 a** On observe des traces d'anciennes marges passives.
- 1 b** On observe une croûte continentale épaissie par empilement de nappes.
- 2 b** Les métagabbros présents dans une chaîne de collision sont des roches métamorphiques.
- 2 c** Les métagabbros présents dans une chaîne de collision peuvent contenir du glaucophane, de la jadéite et du grenat.

3 Vérification des connaissances→ énoncé
p. 155

1 On reconnaît dans les Alpes trois grandes signatures de la présence passée d'un océan :

- des dispositifs de type « blocs basculés » correspondant à d'anciennes marges passives mises en place lors de la phase d'ouverture de l'océan alpin par fracturation (rifting) d'un continent ;
- des complexes ophiolitiques présents en altitude démontrant la présence d'une ancienne lithosphère océanique ;
- dans certains de ces complexes ophiolitiques, la présence de métagabbros hébergeant des minéraux marqueurs d'un métamorphisme de type « haute pression/basse température » démontrant que l'histoire des Alpes a comporté une phase de fermeture de l'océan alpin par subduction.

- Dans une chaîne de collision, les témoins d'une subduction océanique sont les suivants : parmi les complexes ophiolitiques, certains comportent des gabbros métamorphisés (métagabbros) de type schistes bleus ou éclogites dans lesquels on trouve des associations minéralogiques (jadéite, grenat) caractérisant un métamorphisme de type « haute pression/basse température ». Ces minéraux marqueurs dévoilent que les gabbros de la croûte océanique qui les héberge ont été entraînés en profondeur lors d'une subduction. Les témoins d'une subduction continentale sont les suivants : certains des matériaux continentaux présents dans la chaîne montrent la présence d'un minéral particulier : la coésite. Il s'agit d'une variété de la silice produite au cours d'un métamorphisme de très haute pression (correspondant à 100 km de profondeur) qui indique que des portions de croûte continentale ont été entraînées à des profondeurs « anormales » lors d'une subduction.

Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 155

- ☐ a Un complexe ophiolitique.
- ☐ b La coésite.
- ☐ c Le grenat, la jadéite.
- ☐ d La subsidence thermique.

5 Collision – Marges passives

→ énoncé
p. 156

Lycée Albert Camus, Bois Colombes

La coupe de la marge de l'océan Atlantique Nord présentée dans le document 1 fait apparaître un socle fracturé par des failles listriques délimitant des blocs basculés. Ce dispositif témoigne de l'épisode de fracturation continentale (rifting) à l'origine des marges passives de l'Atlantique. Trois sortes de sédiments sont associés aux blocs : le niveau inférieur correspond à des sédiments disposés parallèlement au sommet des blocs. Le niveau moyen correspond à des sédiments d'épaisseur irrégulière déposés au creux des blocs. Le niveau supérieur correspond à des sédiments recouvrant indifféremment toutes les formations précédentes.

Sur la reconstitution du Massif de Prégentil présentée dans le document 2, on reconnaît un socle fracturé en deux blocs basculés (partie A) associés à différents dépôts sédimentaires (B et C). Cette disposition très comparable à celle observée au niveau de la marge Atlantique permet d'imaginer que l'histoire des Alpes a comporté une phase de fracturation continentale à l'origine d'un océan. L'origine marine des sédiments B et C conforte ce scénario.

Déformations – Tectonique

→ énoncé
p. 157

Lycée Charlemagne, Paris

Bonnes réponses : 1a, 1b et 1c, 2a, 2c et 2d.

Justifications :

- 1a. La faille observée montre un abaissement du toit par rapport au mur, il s'agit donc bien d'une faille normale.
- 1b. On voit bien des plis (signature d'une compression) et une faille normale (signature d'une extension).
- 1c. Parmi les formations citées, les quartzites sont effectivement assimilables à des roches métamorphiques.
- 2a. On sait que les marges passives montrent un socle fracturé par des failles normales. C'est le cas ici, même si d'autres indices manquent.
- 2b. On ne reconnaît pas de séquence ophiolitique « type » : péridotites –basaltes-gabbros.
- 2c. Les calcaires sont bien des roches sédimentaires.
- 2d. On observe bien, à l'Ouest de la coupe, une discordance entre les calcaires et dolomies du Trias moyen et les quartzites du Trias inférieur.

7 Etapes – collision

→ énoncé
p. 158

Lycée Assomption, Rennes

MÉTHODE

Rechercher dans les documents les différentes caractéristiques d'une chaîne de collision puis rédiger une synthèse répondant aux deux aspects du libellé de l'énoncé (ce dernier exige non seulement un inventaire des caractéristiques d'une chaîne de collision mais aussi la reconstitution des étapes ayant présidé à sa formation).

Le premier document présente les grandes unités rencontrées dans la chaîne des Alpes. On y repère :

- des déformations importantes (plis, failles et chevauchements) pouvant témoigner d'un mouvement de convergence ;
- la présence de roches sédimentaires océaniques (zones A, B, C et D) témoignant de la présence passée d'un océan alpin ;
- la présence de roches métamorphisées (zone B) dans le faciès haute pression/basse température témoignant de transformations subies par la croûte océanique lors d'une subduction.

Le deuxième document présente une séquence de roches rencontrées dans les Alpes, comportant de bas en haut :

- des roches à texture grenue comportant des olivines et des pyroxènes : ces roches sont des péridotites ;
- des roches à texture grenue comportant des olivines, des pyroxènes et des feldspaths : ces roches sont des gabbros ;

- des roches à texture microlitique comportant des olivines, des pyroxènes et des microlites de feldspaths: ces roches sont des basaltes.

Une telle succession de roches est caractéristique d'une structure de lithosphère océanique dans laquelle les péridotites sont représentatives du manteau lithosphérique tandis que les gabbros et les basaltes représentent les roches de la croûte océanique. Cette séquence de roches rencontrée en altitude est un complexe ophiolitique qui révèle qu'un océan alpin surmontant une lithosphère océanique a existé, et que cette lithosphère océanique a été portée en altitude au moment de la collision de deux masses continentales, au terme d'une subduction.

Le troisième document présente une reconstitution de la disposition des terrains dans la région de Briançon, au Jurassique. On y reconnaît des structures semblables à celles rencontrées au niveau d'une marge passive : des panneaux de socle se sont effondrés entre des failles normales et des sédiments se sont déposés en quantité importante au creux et au sommet des blocs. Cette disposition ne peut s'expliquer que par un processus d'éirement qui caractérise une phase de fracturation continentale (rifting).

En résumé, les roches et les dispositifs recensés dans les Alpes permettent d'établir que les Alpes se sont édifiées par collision. Les témoins de ce processus sont :

- la présence (en altitude) d'une ancienne lithosphère océanique ;
- des déformations importantes de la croûte, témoignant d'une convergence des plaques ;
- des traces des anciennes marges passives qui bordaient l'océan alpin.

Les étapes de la formation des Alpes ont comporté :

- une phase d'ouverture de l'océan alpin par fracturation continentale ;
- une phase de fermeture de l'océan alpin par subduction ;
- une phase de collision entre deux masses continentales, au cours de laquelle il y a eu charriage de lithosphère océanique entre les deux marges continentales.

8 Traces – Collision

énoncé
p. 159

Lycée des Arènes, Toulouse

MÉTHODE

Rechercher dans les documents les différents témoins de la collision puis rédiger une synthèse répondant aux deux aspects du libellé de l'énoncé (ce dernier exige un inventaire des marqueurs de la collision mais aussi la reconstitution de la chronologie des différentes étapes et l'orientation du déplacement des plaques).

Le premier document présente la situation de la chaîne himalayenne : elle se localise à la frontière entre l'Inde et le Tibet, dans un secteur concerné par un chevauchement de grande ampleur où la lithosphère continentale portant le Tibet est chevauchante par rapport à la lithosphère continentale portant l'Inde. Cette situation évoque une frontière de plaques où s'effectue la collision entre deux masses continentales.

Le deuxième document est un bloc diagramme où l'on retrouve des chevauchements affectant des panneaux de croûte jusqu'à plus de 60 km de profondeur. On repère de hauts reliefs dépassant 8000 m et la présence d'une racine crustale en profondeur. Du côté du Tibet, on note la présence de roches magmatiques que l'on rencontre habituellement dans des zones de subduction : les andésites et les granodiorites. On note également la présence d'ophiolites dont on sait qu'elles représentent du plancher océanique créé antérieurement à la collision et charrié au moment de la collision. En résumé, l'Himalaya présente toutes les caractéristiques d'une chaîne de collision :

- on y trouve des traces morphologiques (les reliefs élevés) et tectoniques (les chevauchements) d'une collision ;
- on y trouve des traces d'une histoire océanique ayant précédé la collision : présence d'ophiolites témoignant de l'existence passée d'une lithosphère océanique, présence d'andésites et de granodiorites témoignant de la disparition de lithosphère océanique par subduction.

La présence et la localisation de ces marqueurs permet de reconstituer les étapes de la formation de la chaîne himalayenne et le sens de déplacement des masses continentales :

- l'Inde et l'Asie étaient initialement séparées par un domaine océanique ;
- une subduction a entraîné le plongement de la lithosphère océanique de la plaque portant l'Inde sous la plaque Asiatique (l'orientation de la subduction est déductible de la localisation des andésites et des granodiorites) ;
- lorsque la majorité du plancher océanique a été résorbé par subduction, les deux marges continentales sont entrées en collision. Au cours de la collision, des lambeaux de lithosphère océanique (actuellement représentés par des ophiolites) ont été charriés sur la marge continentale indienne. Les ophiolites marquent la suture entre les deux plaques qui se sont affrontées après la disparition de l'océan.
- lors de la collision, les terrains de la plaque eurasiatique ont chevauché très largement ceux de la plaque indienne.

9 Subduction – Collision

→ énoncé
p. 160

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

MÉTHODE

Résoudre l'exercice comme si on avait affaire à l'exercice 2 de la partie 2 de l'épreuve écrite : « Pratique du raisonnement scientifique et de l'argumentation ». Être transparent et logique dans la démarche de résolution de la problématique. Rechercher l'ordre le plus pertinent dans l'utilisation des documents. La rédaction d'une petite introduction et d'une synthèse finale sera appréciée.

Les géologues admettent que la chaîne alpine s'est formée de la fermeture d'un domaine océanique lors de la convergence de deux plaques lithosphériques.

On dispose de trois documents : des images de différents métagabbros récoltés dans les Alpes, un diagramme pression-température et une coupe schématique du massif du Chenaillet. À partir des informations tirées de ces documents et de leur mise en relation avec les connaissances, on doit retrouver des arguments en faveur du scénario proposé par les géologues.

Etude du document 3

Dans la série ophiolitique du massif du Chenaillet, on observe à l'affleurement, en altitude, de haut en bas en allant vers le SW de la carte : des basaltes en coussins, des gabbros recoupés par des filons de basalte et des péridotites. Cette série ophiolitique est représentative d'une ancienne lithosphère océanique pour les raisons suivantes : les basaltes et les gabbros sont des roches représentatives d'une croûte océanique, les péridotites sont des roches du manteau et la forme en coussins des basaltes certifie son origine océanique (on sait que la forme en coussins est caractéristique d'un épanchement de la lave dans l'eau). On vient donc de démontrer l'existence d'un domaine océanique. Il reste à prouver sa disparition au cours d'une subduction.

Etude du document 1

Dans la lame mince du métagabbro A récolté dans la région du Queyras, trois minéraux sont présents : le plagioclase, l'actinote et le glaucophane. On peut remarquer, à l'aide du schéma interprétatif, que le glaucophane est situé à l'interface entre l'actinote et le plagioclase. On peut alors imaginer que la croissance du glaucophane a résulté d'une réaction entre le plagioclase et l'actinote.

Dans la lame mince du métagabbro B récolté au Mont Viso, trois minéraux sont présents : le grenat, la jadéite et le glaucophane. On peut remarquer, à l'aide du schéma interprétatif, l'aspect dégradé du glaucophane. On peut alors imaginer que la croissance la jadéite et du grenat s'est effectuée au détriment du glaucophane.

Etude du document 2

À l'aide du diagramme pression-température et des équations associées, on peut confirmer la réalité des transformations suggérées par l'observation du document 1. Lors d'une réaction de métamorphisme, le plagioclase interagit avec l'actinote et la chlorite pour former du glaucophane et de l'eau. Lors d'une autre réaction de métamorphisme, le glaucophane réagit avec le plagioclase pour former de la jadéite et de l'eau. On peut alors situer les conditions de pression et de température révélées par les associations minéralogiques rencontrées :

- on lit sur le graphe que la formation de glaucophane à partir d'actinote et de chlorite se déroule à environ 12 km de profondeur et à une température inférieure à 400°C. On en déduit que le métagabbro A, au cours de son histoire a été porté au minimum à 12 km de profondeur.
- on lit sur le graphe que l'association glaucophane-grenat-jadéite est stable en dessous de 25 km de profondeur et à une température inférieure à 500°C. On en déduit que le métagabbro B, au cours de son histoire, a été porté à plus de 25 km de profondeur.

On vient de prouver que les métagabbros récoltés dans les Alpes franco-italiennes ont été portés à des profondeurs de plus en plus importantes sans subir de modification notable de température, ce qui montre que la croûte océanique hébergeant ces métagabbros a participé à une subduction.

Une synthèse...

La série ophiolitique qui affleure au Chenaillet est la preuve de l'existence passée d'un domaine océanique, tandis que les différentes associations minéralogiques observées dans les métagabbros récoltés dans le Queyras et au Mont Viso sont la preuve de leur participation à une subduction, c'est-à-dire de la fermeture du domaine océanique. Les observations de terrain faites dans les Alpes franco-italiennes fournissent donc bien des arguments en faveur du scénario proposé par les géologues.

10 Subduction- Cause

énoncé
p. 162

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

On observe que le flux thermique diminue à mesure que la lithosphère océanique s'éloigne de l'axe de la dorsale, c'est-à-dire à mesure de son vieillissement. Cela signifie, qu'en s'éloignant de son lieu de formation, la lithosphère océanique se refroidit. On observe en parallèle une augmentation de l'épaisseur du manteau lithosphérique (alors que l'épaisseur de la croûte océanique d'origine magmatique reste constante) qui peut être corrélée au refroidissement. Du fait du refroidissement de la lithosphère océanique, l'isotherme 1300°C , qui représente la limite lithosphère/asthénosphère, s'abaisse, donc du manteau asthénosphérique « devient » manteau lithosphérique. En refroidissant la lithosphère océanique s'épaissit donc « par le dessous » en gagnant du manteau lithosphérique au détriment de l'asthénosphère. On observe en parallèle une augmentation de la masse volumique de la lithosphère océanique à mesure de son éloignement de son lieu de formation. Il est indiqué dans les informations complémentaires que le manteau lithosphérique est un constituant dont la masse volumique est élevée ($3,3 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), plus élevée que celle de la croûte océanique. On comprend donc qu'en s'épaississant par gain de manteau lithosphérique qui est son composant dont la masse volumique est la plus élevée, la lithosphère océanique va connaître une augmentation de sa propre masse volumique. Pour finir, on nous donne la masse volumique de l'asthénosphère ($3,25 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). On observe que cette masse volumique est inférieure à celle d'une lithosphère océanique d'âge supérieur à 25 Ma. On comprend donc que, par gain de manteau lithosphérique à mesure de son vieillissement, la lithosphère océanique a fini par acquérir une masse volumique dépassant celle de l'asthénosphère. Il y a alors rupture de l'équilibre isostatique, ce qui peut déclencher le plongement de la lithosphère océanique dans l'asthénosphère.

Pour résumer, la principale cause de la subduction est la différence de masse volumique entre la lithosphère océanique et l'asthénosphère. Cette différence est progressivement acquise lors du vieillissement de la lithosphère océanique et est initiée par son refroidissement.

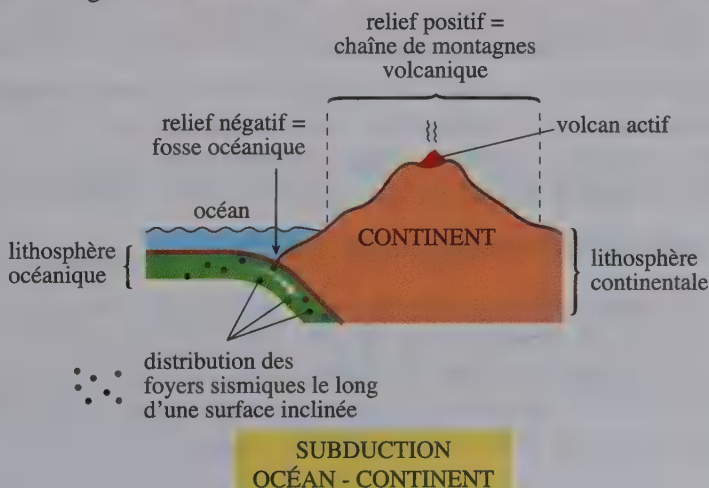
Le magmatisme en zone de subduction : une production de nouveaux matériaux continentaux

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Les caractéristiques du magmatisme des zones de subduction
3. La genèse d'un magma en zone de subduction

1 Introduction

En zone de subduction, la lithosphère océanique disparaît dans le manteau asthénosphérique par plongement sous une lithosphère continentale ou océanique. De manière plus visible, les zones de subduction sont le siège d'un magmatisme remarquable, à l'origine des alignements de volcans actifs répartis parallèlement à la fosse, dans une chaîne de montagnes ou dans un arc insulaire.



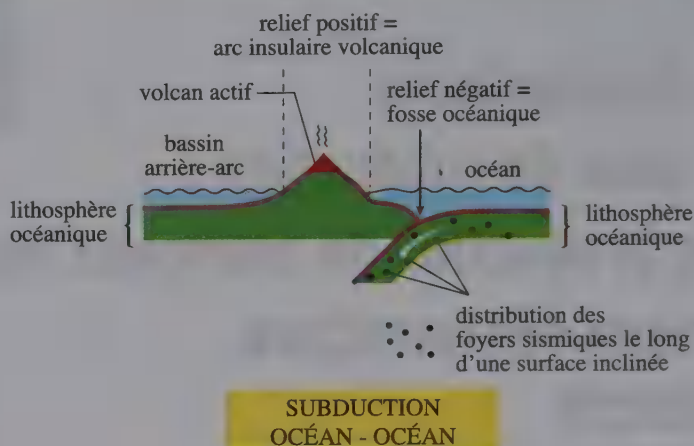


Figure 8.1 – Position de l'activité magmatique dans deux zones de subduction

PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les caractéristiques et les causes de l'activité magmatique des zones de subduction ? En quoi le magmatisme de subduction peut-il contribuer à la croissance du domaine continental ?

Les caractéristiques du magmatisme des zones de subduction

2.1 Les caractéristiques du magma

Les zones de subduction sont le siège d'un volcanisme explosif. Les volcans émettent des laves souvent visqueuses, riches en silice, associées à des gaz. Différentes manifestations sont la signature de ce volcanisme explosif : des nuées ardentes (grand volume de gaz brûlants, transportant à très forte pression des masses considérables de projections solides – des cendres aux blocs – et se déplaçant à grande vitesse) et des écoulements pyroclastiques (débris de roches magmatiques éjectés par les volcans).

2.2 Les roches magmatiques mises en place

Les roches volcaniques issues du refroidissement du magma en zone de subduction sont des andésites, des basaltes et des rhyolites. Elles sont associées à la mise en place de roches plutoniques de type granitoides (roches de la famille des granites au sens large) telles que les granodiorites. Les roches produites présentent la particularité d'être riches en minéraux hydroxylés (amphiboles, micas)

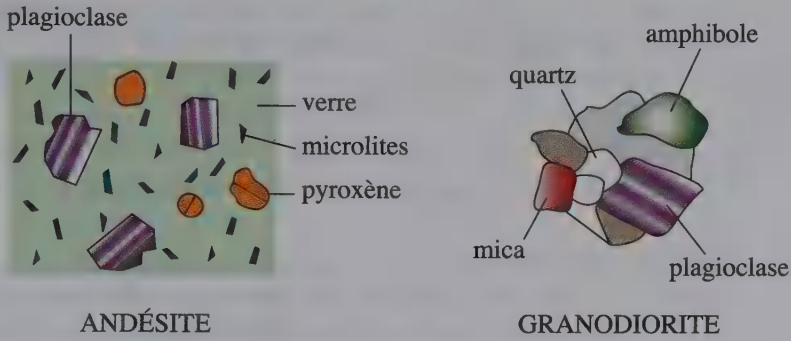


Figure 8.2 – Lames minces d'une roche volcanique (andésite) et d'une roche plutonique (granodiorite) fréquemment rencontrées dans les zones de subduction

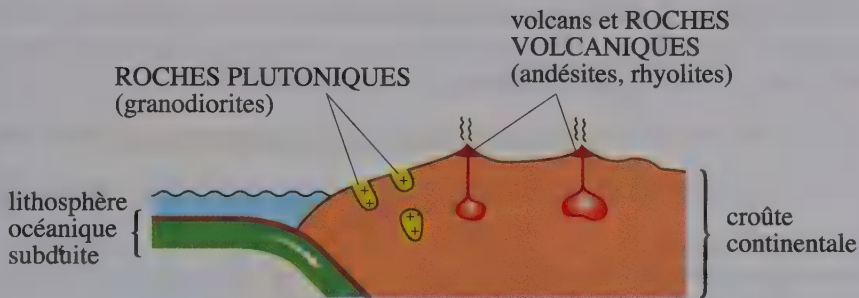


Figure 8.3 – Coupe présentant les associations de roches magmatiques dans une zone de subduction

À RETENIR

Le magma et les roches mises en place en zone de subduction montrent des particularités : le volcanisme est explosif et les minéraux hydroxylés sont abondants dans les roches obtenues.

Voir exercices 2 et 6.

La genèse d'un magma en zone de subduction

3.1 Le contexte de production du magma

Dans chaque cas de subduction, quelque soit le pendage de la lithosphère océanique subduite et quelle que soit la position de la fosse, l'arc volcanique se situe toujours sur la lithosphère chevauchante et à environ 100 kilomètres de distance verticale par rapport au toit de la lithosphère océanique subduite.

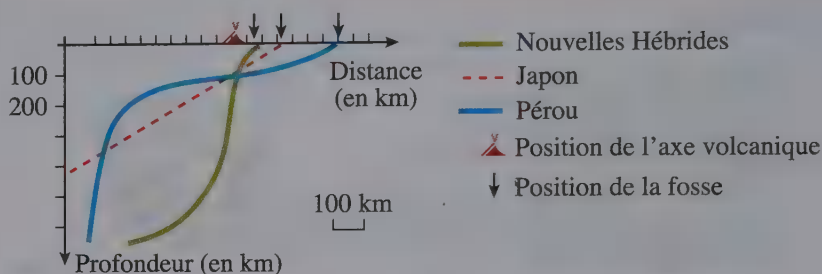
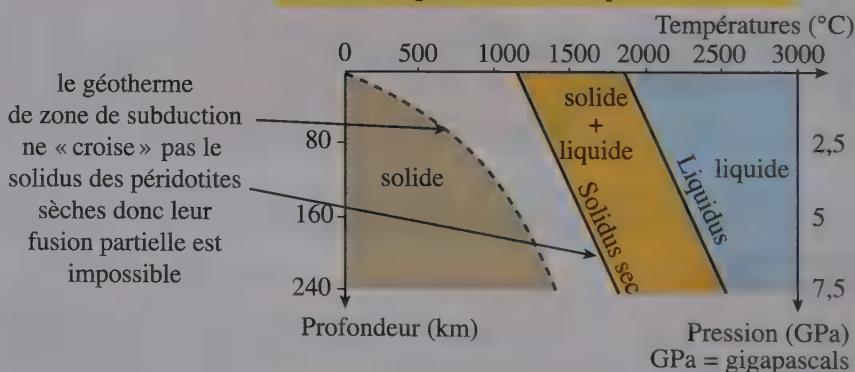


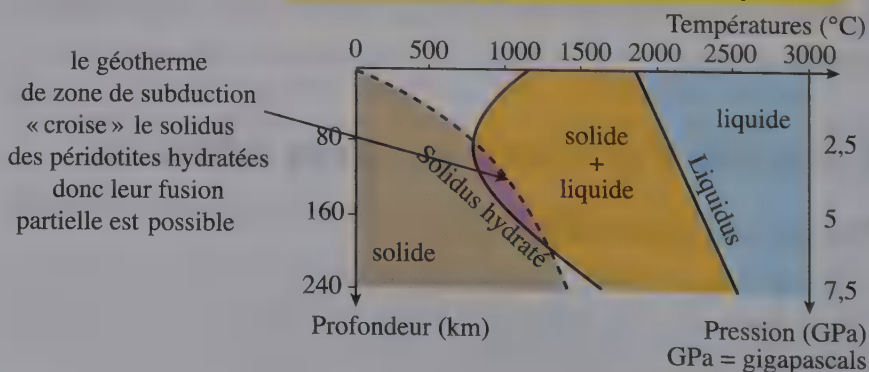
Figure 8.4 – Position des volcans par rapport au toit de la lithosphère subduite dans trois zones différentes de subduction

Des conditions doivent donc être réunies à environ 100 kilomètres de profondeur pour permettre la production d'un magma. La détermination de ces conditions nécessite de connaître d'une part le géotherme (tracé donnant l'évolution de la température avec la profondeur) d'une zone de subduction, d'autre part le solidus des matériaux susceptibles de fondre, c'est-à-dire celui des péridotites du manteau.

a. fusion expérimentale de la péridotite sèche



b. fusion expérimentale de la péridotite hydratée



----- Géotherme de zone de subduction :
variations de la température en fonction
de la profondeur dans la plaque chevauchante

Figure 8.5 – Géotherme d'une zone de subduction et solidus des péridotites

Le géotherme d'une zone de subduction ne permet pas la fusion des péridotites sèches. La fusion partielle des péridotites peut être induite par une hydratation du manteau à partir de 80 kilomètres de profondeur et à environ 800°C de température, sans modification des conditions de pression et de température des matériaux affectés par la fusion. En effet, l'apport exogène d'eau a pour effet de décaler le solidus des péridotites vers les basses températures, abaissant ainsi la température nécessaire à la fusion partielle des péridotites.

Les péridotites affectées par la fusion partielle sont celles appartenant au manteau lithosphérique de la plaque chevauchante, situé immédiatement au dessus de la lithosphère océanique en subduction.

À RETENIR

L'eau joue le rôle de « fondant » pour les roches. La production d'un magma dans une zone de subduction est obtenue par fusion partielle des péridotites situées au dessus du plan de Wadati-Benioff après hydratation de ces dernières.

3.2 L'origine de l'eau nécessaire à la production du magma

La lithosphère océanique qui entre en subduction est une lithosphère océanique préalablement hydratée et transformée. En effet, les roches qui la composent ont subi un métamorphisme hydrothermal près de l'axe de la dorsale puis un métamorphisme lié à la diminution de la température lors de leur éloignement de l'axe de la dorsale. Cette évolution a permis de créer des minéraux hydroxylés à partir de minéraux non hydroxylés.

Situation de la lithosphère océanique	Modifications de la composition de la croûte océanique
À proximité de l'axe de la dorsale	Formation de minéraux hydroxylés (hornblende) par métamorphisme hydrothermal. Facteur de ce métamorphisme : circulation d'eau de mer dans la croûte océanique chaude fracturée
Lors de l'éloignement par rapport à l'axe de la dorsale	Formation de minéraux hydroxylés (actinote, chlorite). Facteur de ce métamorphisme : diminution de température liée au refroidissement de la lithosphère océanique lors de son vieillissement

Tableau 8.1 – Changements dans la composition minéralogique des roches de la croûte océanique postérieurement à sa formation et avant l'entrée en subduction

Lorsqu'elles s'enfoncent dans le manteau par subduction, les roches de la croûte océanique sont soumises à de nouvelles conditions de pression et de température. Elles se transforment tout en restant à l'état solide (métamorphisme contemporain de la subduction) et se déshydratent. Des minéraux caractéristiques de conditions de haute pression et de basse température apparaissent.

Situation de la lithosphère océanique	Modifications de la composition de la croûte océanique
Lors de la subduction	Nouvelles transformations minéralogiques (glaucophane puis grenat et jadéite) conduisant à l'apparition progressive de minéraux non hydroxylés. Facteurs de ce métamorphisme : la lithosphère océanique subduite se réchauffe lentement et est soumise à des profondeurs de plus en plus importantes : métamorphisme de basse température et de haute pression

Tableau 8.2 – Changements dans la composition minéralogique des roches de la croûte océanique au cours de la subduction

La déshydratation des roches de la croûte océanique lors de la subduction libère l'eau qui déclenche la fusion partielle des péridotites du manteau sous-jacent, à l'origine du magma.

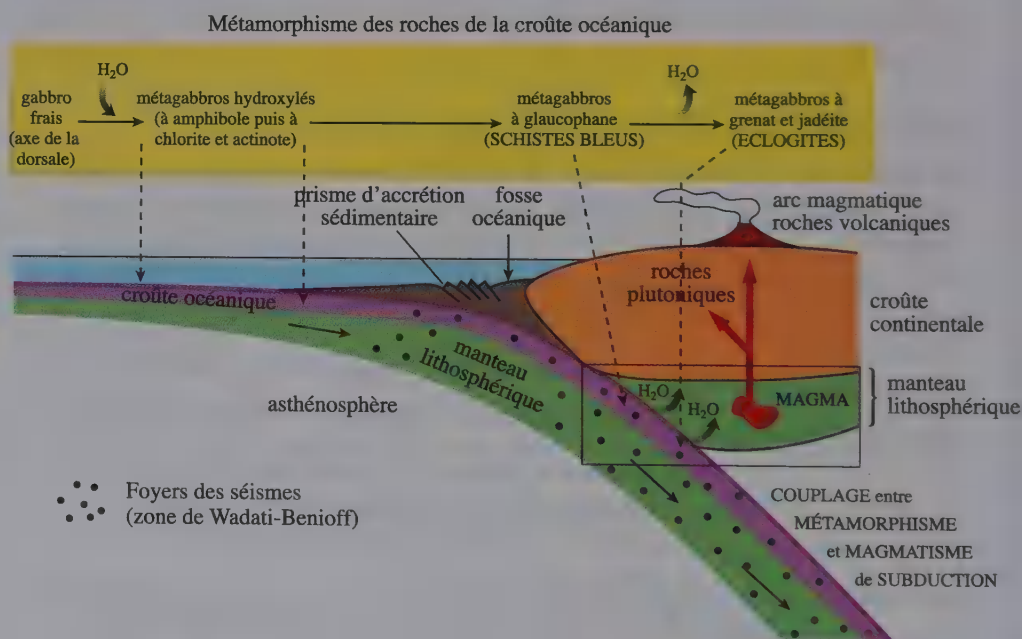


Figure 8.6 – Vue d'ensemble du phénomène magmatique en zone de subduction

➔ À RETENIR

Au cours de son histoire antérieure à la subduction, la croûte océanique a emmagasiné de l'eau. Lors de la subduction, les matériaux de la croûte océanique subduite se déshydratent ce qui induit la fusion partielle des péridotites du manteau sus-jacent.

Voir exercices 1, 3, 4, 7, 8 et 9.

3.3 Le devenir du magma produit et sa contribution à l'accrétion continentale

Le magma produit, moins dense que le manteau qui lui a donné naissance, migre à travers les matériaux de la plaque chevauchante. Le refroidissement brutal du magma en surface est à l'origine des roches volcaniques de type andésites, à texture micro-litique. La plus grande partie du magma cristallise en profondeur et donne les granitoïdes à texture grenue. Dans le contexte d'une subduction océan-continent, le magmatisme de subduction est ainsi un mode d'accrétion (augmentation du volume d'un corps par apport de matière extérieure) de la croûte continentale.

Remarque : bien qu'issues d'un même magma initial, d'origine mantellique, les roches formées montrent des différences de composition chimique. Cela s'explique en partie par la différenciation magmatique qui accompagne la cristallisation fractionnée : les minéraux les plus pauvres en silice cristallisent en premier, le magma voit donc sa composition chimique évoluer à mesure que les minéraux cristallisent. Cela s'explique d'autre part par une possible contamination crustale du magma lors de son séjour dans la croûte continentale riche en silice.

➔ À RETENIR

En relation avec le mode de refroidissement des magmas, il y a coexistence de roches volcaniques et plutoniques dans la croûte de la plaque chevauchante. Le magma, d'origine mantellique, alimente la production de nouveaux matériaux continentaux dans les zones de subduction.

Voir exercices 5 et 10.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 184

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1** Le magma qui est produit dans les zones de subduction :
 - a** provient de la fusion partielle des roches de la lithosphère plongeante
 - b** a pour origine une augmentation de la température des matériaux
 - c** a pour origine une diminution de la pression subie par les matériaux
 - d** a pour origine une hydratation des matériaux
- 2** À l'aplomb des volcans dans une zone de subduction :
 - a** Le géotherme croise le solidus des péridotites sèches
 - b** Le solidus des péridotites hydratées est décalé vers les basses températures par rapport à celui des péridotites sèches
 - c** Le magma prend naissance à 10 kilomètres de distance verticale par rapport au volcan
 - d** Il y a fusion partielle des péridotites de la partie supérieure de la lithosphère subduite

2 Vérification des connaissances

10 min

→ corrigé
p. 184

Répondez brièvement aux questions suivantes :

- 1** Présentez les types de roches magmatiques produites dans les zones de subduction.
- 2** Présentez les particularités du volcanisme des zones de subduction.

3 V/F Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 184

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

- 1** Dans une zone de subduction océan-continent :
 - a** Il y a production uniquement de roches volcaniques.
 - b** De nouveaux matériaux continentaux sont produits.
 - c** Il y a genèse d'un magma à partir de la fusion partielle des roches de la croûte continentale.
- 2** Un magma prend naissance en zone de subduction ...
 - a** lorsque la lithosphère océanique plongeante a atteint une certaine profondeur.
 - b** du fait de la fusion partielle des péridotites de la plaque plongeante.
 - c** du fait de l'apport d'eau issu de la plaque chevauchante.

4 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 185

Qui suis-je ?

- ☐ a Un agent de fusion des roches en zone de subduction.
- ☐ b Une famille de roches plutoniques produites dans les zones de subduction.
- ☐ c La forme géométrique dessinée par la disposition des volcans dans les zones de subduction.
- ☐ d Une manifestation phénoménologique du volcanisme explosif des zones de subduction.

5 Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 185

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions.

☐ Si le magma généré au niveau d'une zone de subduction n'arrive pas en surface, il donne naissance à des roches :

- ☐ a à structure grenue de type andésitique
- ☐ b à structure microlitique de type andésitique
- ☐ c à structure grenue de type gabbros
- ☐ d à structure grenue de type granite

☐ Une rhyolite est une roche :

- ☐ a volcanique à structure grenue
- ☐ b volcanique à structure microlitique
- ☐ c qui provient du refroidissement lent d'un magma
- ☐ d pauvre en silice

☐ Le volcanisme explosif se caractérise par :

- ☐ a une lave visqueuse formant peu de coulée
- ☐ b une nuée ardente provenant d'une grande coulée de lave
- ☐ c une faible viscosité de la lave facilitant l'échappement des gaz
- ☐ d des coulées pyroclastiques de faible température

☐ Le magma des zones de subduction :

- ☐ a s'appauvrit en silice dans la croûte continentale
- ☐ b permet la formation de la croûte continentale
- ☐ c provient de la fusion partielle de la croûte océanique

6 Magmatisme - Etapes

Lycée Dupuy de Lôme, Lorient



10 min



corrigé
p. 185

1. Le schéma ci-après résume les principaux événements survenant lors d'une convergence océan/continent. Mettez les légendes rendant compte des phénomènes essentiels repérés par les flèches.

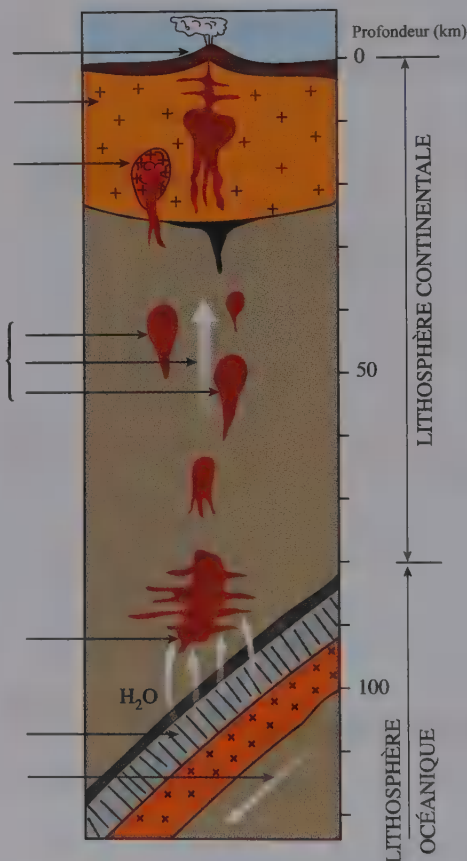


Figure 8.7 – Magmatisme au niveau d'une zone de subduction

2. Les roches A et B, dont les observations microscopiques sont figurées ci-après, se mettent en place dans de telles zones.

Identifiez ces deux roches et placez-les sur le schéma précédent en justifiant votre réponse.

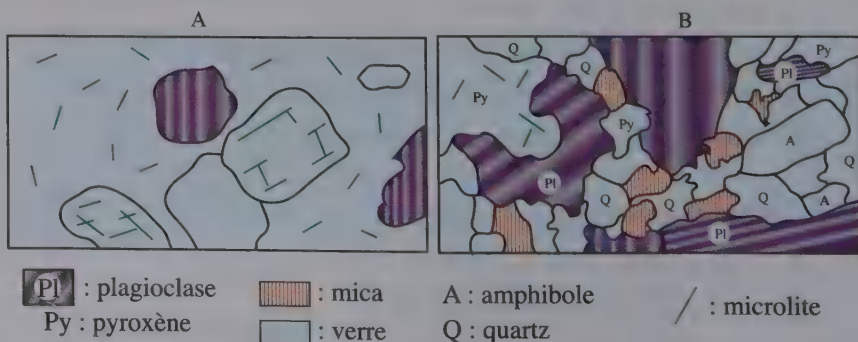


Figure 8.9 – Deux lames minces de roches rencontrées dans une zone de subduction océan/continent

7 Subduction – Volcanisme



20 min

→ corrigé
p. 186

Dupuy de Lôme, Lorient

Parmi les Petites Antilles, les îles (G= Guadeloupe, D= Dominique, M=Martinique, SL=Sainte-Lucie, SV= Saint-Vincent et GR= Grenade) présentent un volcanisme andésitique de même que les volcans côtiers d'Amérique centrale (désignés par un point rouge sur la figure ci-après).

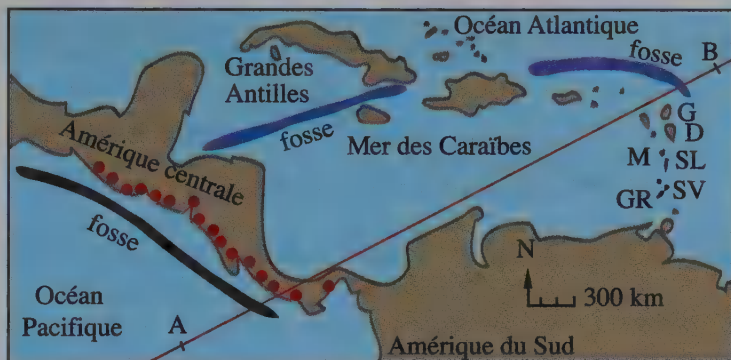


Figure 8.10 – Localisation du volcanisme et des fosses dans le secteur des petites Antilles

Quelle information vous apporte l'association géographique d'un volcanisme andésitique et d'une fosse océanique ?

Illustrez votre réponse en réalisant une coupe simplifiée de A à B. Indiquez sur votre schéma la nature des plaques lithosphériques mises en jeu.

8 Subduction – Collision



10 min

→ corrigé
p. 187

Lycée Evariste Galois, Sartrouville

Dans l'Himalaya, on trouve les deux types de roches dont les lames minces sont schématisées dans le document proposé.

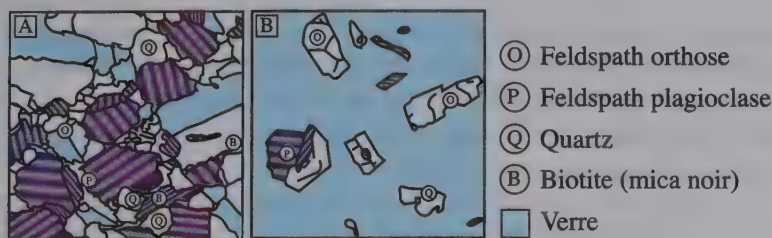


Figure 8.11 – Schéma de deux lames minces de roches

Indiquez quelle(s) information(s) apportent ces roches sur un moment de l'histoire de la formation de la chaîne himalayenne.

9 Magma - Origine



15 min

→ corrigé
p. 187

Lycée Victor Hugo, Besançon

Extrayez du document proposé les informations permettant d'expliquer le volcanisme au niveau des arcs volcaniques.

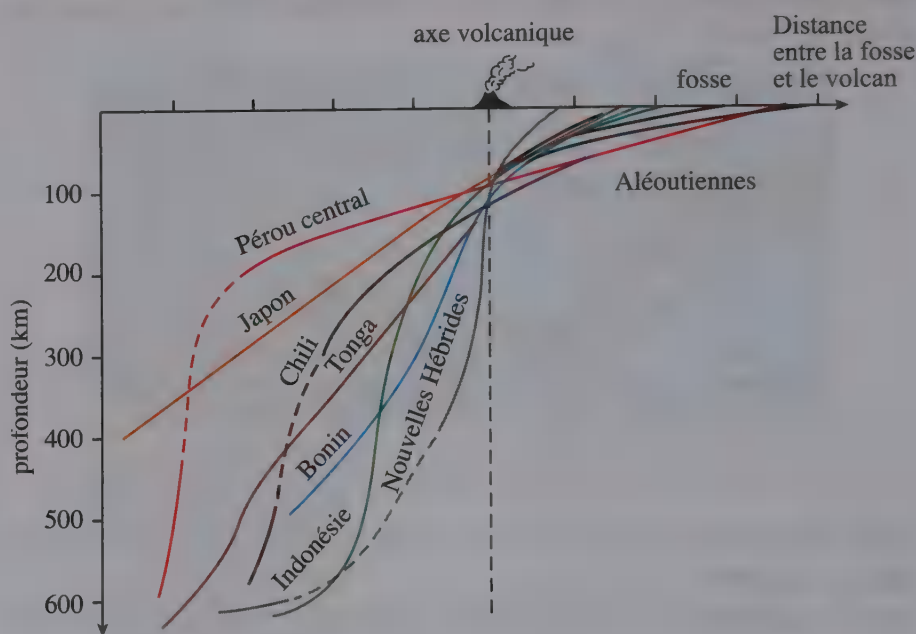


Figure 8.12 – Localisation du volcanisme orogénique par rapport aux surfaces de subduction

10 Solidus - Géotherme



10 min

→ corrigé
p. 188

Lycée Saint-Martin, Rennes

Les diagrammes pression/température ci-après représentent les courbes de fusion d'une péridotite (de composition voisine des roches du manteau terrestre). En A, on a figuré les courbes de fusion à sec, et en B, les courbes avec 5,7% d'eau. La courbe du gradient géothermique représente les conditions de pression et de température que l'on rencontre en s'enfonçant dans la Terre.

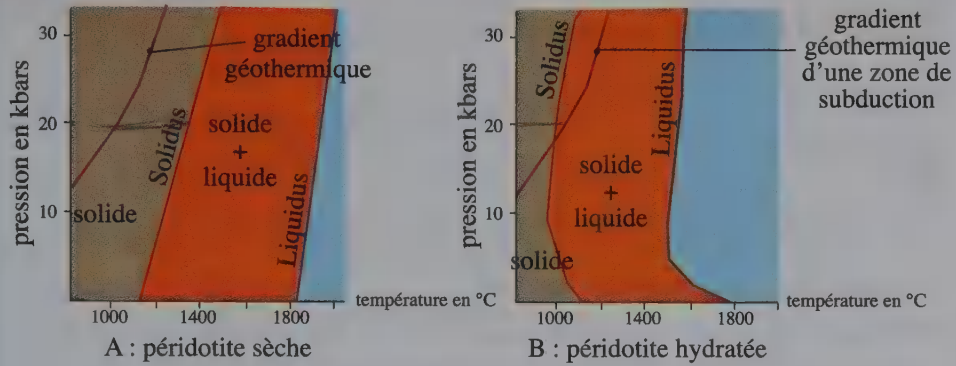


Figure 8.13 – Représentations du géotherme et du solidus sur un diagramme pression/température

1. À quelle température la péridotite sèche commence-t-elle à fondre à une pression de 20 kbars ? Même question pour la péridotite avec 5,7% d'eau.
2. Expliquez en quoi ces courbes traduisent l'existence d'un important volcanisme dans les zones de subduction.

11 Accrétion – croûte continentale



5 min

→ corrigé p. 188

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Le volume total de la croûte continentale du globe est estimé à 7 milliards de km^3 . Dans le tableau ci-après, les valeurs sont exprimées en $\text{km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$.

	zones de subduction	autres contextes (dorsales, points chauds)	Total
Roches volcaniques	0,4 – 0,6	3,33 – 3,5	3,73 – 4,1
Roches plutoniques			
- granitoïdes	2,1 – 6,8	0,72 – 1,4	2,82 – 8,2
- autres	0,4 – 1,3	18,88 – 20,46	19,28 – 21,76
Total magma	2,9 – 8,6	22,93 – 25,36	25,83 – 33,96

Tableau 8.3 – Volumes de magma et de roches magmatiques actuellement produits à l'échelle globale

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

Les informations contenues dans le document permettent de penser que :

1. L'essentiel de la production globale de magma s'effectue au niveau des zones de subduction.
2. La subduction contribue à la croissance de la croûte continentale.
3. En zone de subduction, la production de roches volcaniques l'emporte sur celle de roches plutoniques
4. L'accrétion océanique est quantitativement plus importante que l'accrétion continentale.

1 QCM Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 178

Les réponses exactes sont **1** **d** et **2** **b**

Justifications :

- 1** Les propositions « a », « b » et « c » sont fausses pour les raisons suivantes :
- une augmentation de pression s'oppose à la fusion des matériaux
 - bien qu'une augmentation de température favorise la fusion, cette condition n'est pas réalisée dans les zones de subduction.
- 2** Les propositions « a », « c » et « d » sont fausses pour les raisons suivantes :
- le géotherme d'une zone de subduction est entièrement situé dans le domaine où les péridotites sèches sont solides ;
 - c'est à environ 100 kilomètres de distance verticale à l'aplomb du volcan que le magma prend naissance ;
 - ce sont les péridotites de la plaque chevauchante qui fondent.

2 Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 178

- 1** Les roches magmatiques produites dans les zones de subduction sont d'une part des roches volcaniques comme les andésites et les rhyolites, d'autre part des roches plutoniques de type granitoïdes (roches de la famille des granites au sens large) telles que les granodiorites.
- 2** Le volcanisme des zones de subduction est un volcanisme explosif. Les volcans émettent des laves souvent visqueuses, riches en silice, associées à des gaz. Différentes manifestations sont la signature de ce volcanisme explosif : des nuées ardentes (grand volume de gaz brûlants, transportant à très forte pression des masses considérables de projections solides – des cendres aux blocs – et se déplaçant à grande vitesse) et des écoulements pyroclastiques (débris de roches magmatiques éjectés par les volcans).

3 V/F Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 178

- 1** Affirmations inexactes : **a** et **c**. Rectifications :
- a** Dans une zone de subduction océan-continent, il y a production de roches volcaniques et *de roches plutoniques*.
- c** Dans une zone de subduction océan-continent, il y a genèse d'un magma à partir de la fusion partielle des roches (*péridotites*) *du manteau de la lithosphère continentale*.
- 2** Affirmations inexactes : **b** et **c**. Rectifications :
- b** Un magma prend naissance en zone de subduction du fait de la fusion partielle des péridotites de la *plaque chevauchante*.

- c** Un magma prend naissance en zone de subduction du fait de l'apport d'eau issu de la *plaque plongeante*.

4 Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 179

- a** L'eau. **c** Un arc volcanique.
b Les granitoïdes. **d** Les nuées ardentes.

5 QCM Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 179

Réponses exactes sont **1 b**, **2 b**, **3 a** et **4 b**

6 Magmatisme - Etapes

→ énoncé
p. 180

Lycée Dupuy de Lôme, Lorient

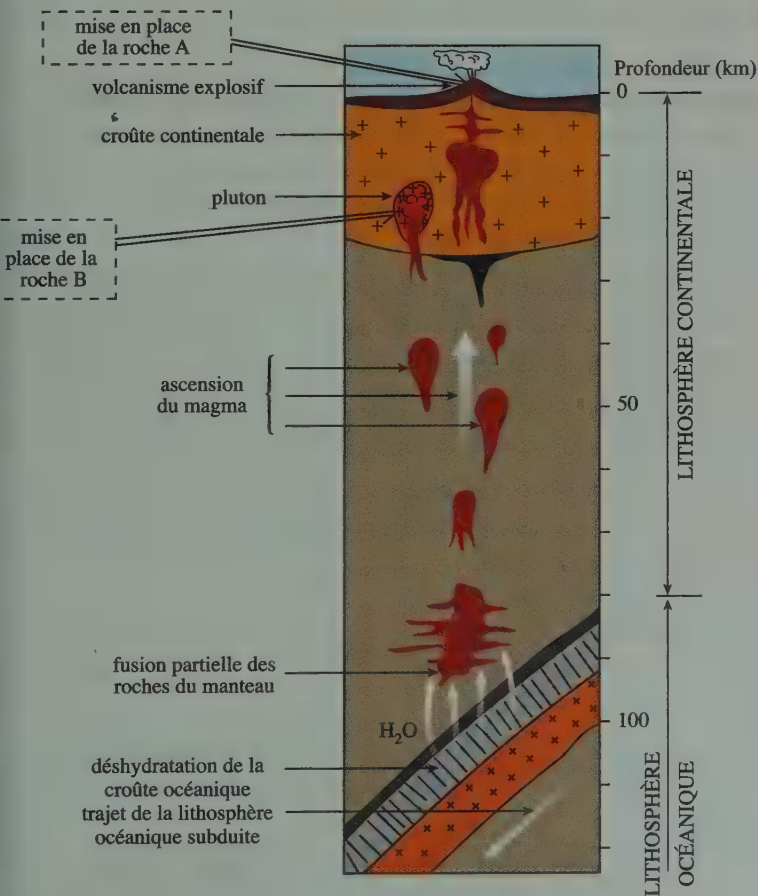


Figure 8.16 –
Principaux événements
survenant lors
d'une convergence
océan/continent

2. L'observation microscopique de la roche A permet d'identifier des phénocristaux de plagioclase, d'amphibole et de pyroxène ainsi que des microlites noyés dans une pâte amorphe : il s'agit d'une roche à texture microlitique (c'est donc une roche volcanique) dont la composition minéralogique évoque celle de l'andésite. Sur le schéma précédent, on doit placer cette roche là où se situe le volcan.

L'observation microscopique de la roche B permet d'identifier la présence exclusive de phénocristaux : plagioclase, amphibole, pyroxène, et quartz. Il s'agit d'une roche à texture grenue (c'est donc une roche plutonique) dont la composition minéralogique évoque celle d'une granodiorite. Sur le schéma précédent, on doit placer cette roche au sein de la croûte, là où le magma refroidit en profondeur pour former un pluton.

7 Subduction – Volcanisme

énoncé
p. 181

Dupuy de Lôme, Lorient

MÉTHODE

À la différence de ce que vous avez eu l'habitude de faire en Première S lors de la mise en évidence historique de la subduction, il va falloir ici identifier et orienter une ou plusieurs subductions sans aucune donnée sur la distribution des foyers sismiques en profondeur. Il va falloir utiliser les fosses pour repérer les limites de plaques en subduction et, pour chaque couple de plaques, la position des volcans pour reconnaître la plaque chevauchante.

L'association géographique d'un volcanisme andésitique et d'une fosse océanique caractérise une zone de subduction. Une fosse océanique marque la zone de flexion d'une plaque qui commence à plonger. L'emplacement des volcans andésitiques permet d'identifier la lithosphère non subduite (c'est-à-dire la lithosphère chevauchante). La figure proposée permet donc de reconnaître deux zones de subduction : l'une située à l'Ouest de la carte, où la plaque des Cocos plonge sous la plaque des Caraïbes, l'autre située à l'Est de la carte, où la plaque Sud-Américaine plonge sous la plaque des Caraïbes.

2

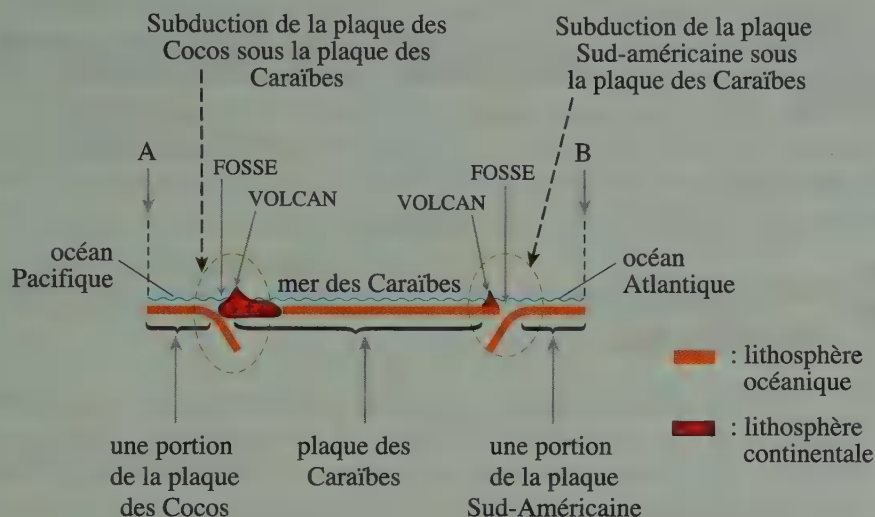


Figure 8.15 – Comportement des plaques lithosphériques le long du profil (AB)

8 Subduction – collision

➔ énoncé
p. 181

Lycée Evariste Galois, Sartrouville

L'observation microscopique de la première roche permet d'identifier la présence exclusive de phénocristaux : feldspaths de type plagioclase et de type orthose, biotite et quartz. Il s'agit d'une roche à texture grenue (c'est donc une roche plutonique) dont la composition minéralogique (en particulier la présence de quartz) évoque celle d'une granodiorite.

L'observation microscopique de la deuxième roche permet d'identifier des phénocristaux de feldspaths de type plagioclase et de type orthose, des phénocristaux de biotite ainsi qu'une abondante pâte amorphe : il s'agit d'une roche à texture microlitique (c'est donc une roche volcanique) dont la composition minéralogique (en particulier la présence de quartz) évoque celle d'une rhyolite.

On sait que de telles roches sont habituellement produites dans des zones de subduction. La présence actuelle de rhyolites et de granodiorites au niveau de l'Himalaya nous indique que l'histoire de la formation de la chaîne himalayenne a comporté une phase de subduction d'une plaque sous une autre plaque, précédant la collision.

9 Magma – Origine

➔ énoncé
p. 182

Lycée Victor Hugo, Besançon

MÉTHODE

Il faut se limiter aux seules informations tirées du document sans apport de connaissances personnelles. En particulier, les conditions permettant la production d'un magma en profondeur ne doivent pas être explicitées.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

La figure proposée permet d'observer que pour n'importe quelle zone de subduction, quelle que soit la position de la fosse par rapport au volcan et quel que soit le pendage de la subduction, le volcan observé en surface se situe toujours à environ 100 km de distance verticale par rapport au toit de la lithosphère océanique subduite. On en déduit que dans une zone de subduction, des conditions particulières sont réalisées à 100 km de profondeur pour permettre la production d'un magma à l'origine du volcanisme se manifestant au niveau de l'arc volcanique.

10 Solidus – Géotherme

→ énoncé
p. 182

Lycée Saint-Martin, Rennes

1. Pour trouver à quelle température la péridotite sèche commence à fondre à une pression de 20 kbars, on trace sur le graphique un trait horizontal à 20 kbars et on lit à quelle température ce trait horizontal « rencontre » le solidus de la péridotite sèche. On détermine ainsi qu'à cette pression, la fusion partielle de la péridotite sèche est réalisable à partir de 1300°C.

En effectuant le même travail sur le second graphique pour une péridotite hydratée contenant 5,7% d'eau, on détermine que pour une pression de 20 kbars, la fusion partielle de la péridotite hydratée est réalisable à partir de 1000°C.

Cette lecture graphique permet de saisir que l'hydratation d'une roche a pour conséquence de décaler son solidus vers les basses températures.

2. On peut expliquer, d'après les graphiques, l'important volcanisme qui caractérise les zones de subduction : on observe que le géotherme d'une zone de subduction ne croise pas le solidus d'une péridotite sèche, tandis que le géotherme d'une zone de subduction recoupe le solidus d'une péridotite hydratée. La fusion partielle des péridotites du manteau est donc possible dans les zones de subduction à condition que les péridotites aient subi une hydratation préalable. Le magma produit alimente l'important volcanisme observable en surface.

11 Accrétion – croûte continentale

→ énoncé
p. 183

Lycée Richelieu, RUEIL-MALMAISON

Les propositions exactes sont les propositions 2 et 4.

La proposition 1 est fausse car les données du tableau indiquent une production de roches magmatiques majoritaire en domaine océanique (dorsales et points chauds).

La proposition 3 est fausse car les données du tableau indiquent, en zone de subduction, une production modeste de roches volcaniques ($0,4$ à $0,6 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$) par rapport à la production de roches plutoniques ($2,5$ à $8,1 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$).

La disparition des reliefs

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Les apports de la comparaison des chaînes de montagnes anciennes et récentes
3. Les mécanismes d'effacement des reliefs
4. L'implication de phénomènes tectoniques dans l'atténuation des reliefs

1 Introduction

La convergence lithosphérique provoque, aux frontières des plaques, des orogénèses (formation de chaînes de montagnes) ce qui explique la présence de hauts reliefs – jusqu'à plus de 8000 mètres – en domaine continental. Néanmoins, l'étude de la distribution statistique des altitudes à l'échelle du globe montre que l'altitude moyenne du domaine continental est de l'ordre de 800 mètres seulement, avec un pic de fréquence entre 0 et 1000 mètres.

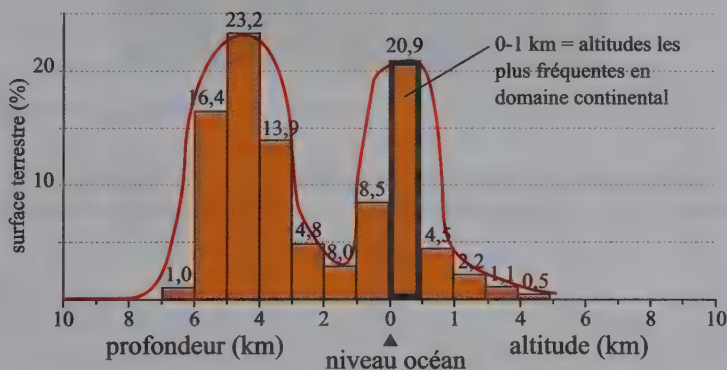


Figure 9.1- Pourcentage de la surface terrestre solide occupé par des terrains d'altitudes données

Sachant que les épisodes orogéniques ont été nombreux dans l'histoire de la Terre, on doit reconnaître l'existence de mécanismes chargés d'abasser la surface du domaine continental.

? PROBLÉMATIQUE

Comment disparaissent, au cours du temps, les reliefs positifs qui caractérisent les chaînes de montagnes ?

2 Les apports de la comparaison des chaînes de montagnes anciennes et récentes

2.1 Comparaison des reliefs

Si l'on compare la topographie d'une chaîne de montagnes récentes (par exemple les Alpes, formées il y a 40 millions d'années) et d'une chaîne de montagnes ancienne (par exemple le Massif central, formé il y a plusieurs centaines de millions d'années lors de l'orogénèse hercynienne), on relève des altitudes plus élevées dans le cas des chaînes récentes.

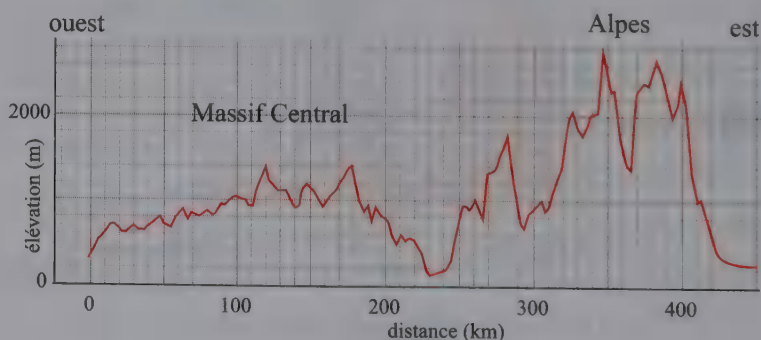


Figure 9.2 – Profil topographique au travers du Massif central et des Alpes

2.2 Comparaison des matériaux présents à l'affleurement

Si l'on compare la représentation des roches à l'affleurement, on relève une abondance de granite (roche plutonique) et de gneiss (roche métamorphique) dans le cas des chaînes anciennes. Dans le cas des chaînes récentes, la proportion de ces roches d'origine profonde est plus modeste et ce sont surtout les roches sédimentaires qui affleurent.

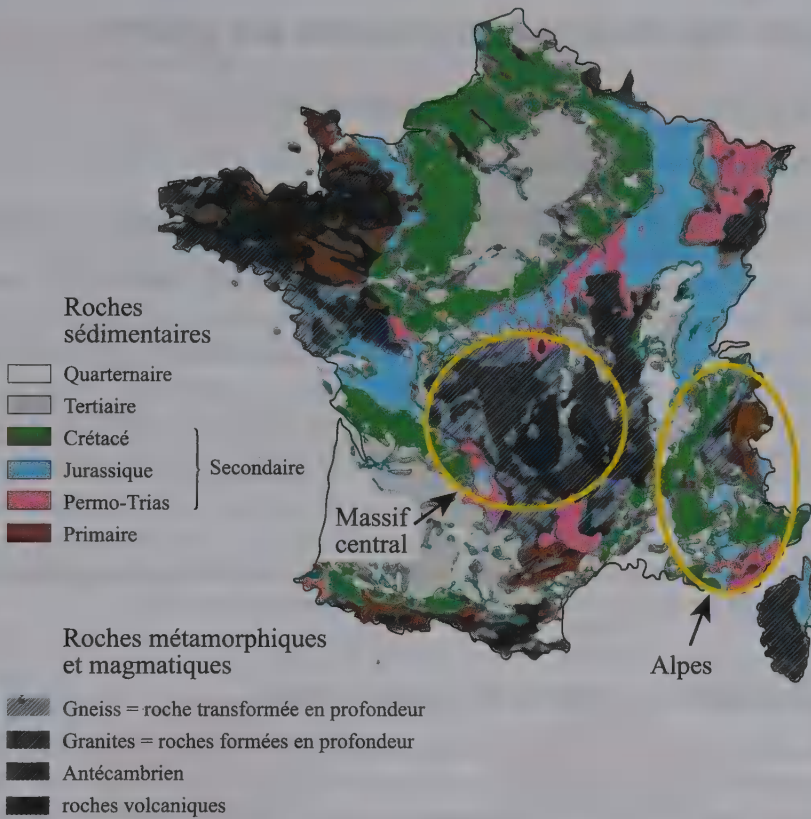


Figure 9.3 – Carte géologique très simplifiée de la France montrant des affleurements différents dans le Massif central (chaîne ancienne) et dans les Alpes (chaîne récente)

De cette comparaison, on retire l'idée que les parties superficielles des reliefs ont tendance à disparaître au cours du temps, ce qui met à nu des roches d'origine profonde comme le granite et le gneiss.

À RETENIR

Dans les chaînes de montagnes anciennes, les reliefs sont moins élevés que dans les chaînes de montagnes récentes. La proportion de roches formées en profondeur (roches magmatiques plutoniques) ou transformées en profondeur (roches métamorphiques) et visibles à l'affleurement y est plus importante.

Voir exercice 4.

PROBLÉMATIQUE

Quels sont les mécanismes faisant disparaître les parties superficielles des reliefs et exhumant les roches d'origine profonde ?

3 Les mécanismes d'effacement des reliefs

3.1 Altération, érosion et démantèlement de reliefs

3.1.1 La notion d'érosion

On parle d'érosion pour désigner l'ensemble des phénomènes externes qui, à la surface du globe, enlèvent tout ou une partie des terrains existants et modifient ainsi le relief. L'érosion consiste en deux grands types de phénomènes, dont les effets s'additionnent : les processus chimiques avec altération et dissolution par les eaux plus ou moins chargées de CO_2 , et les processus physiques ou mécaniques avec désagrégation des roches et enlèvement des débris par un fluide. Les facteurs de l'érosion sont extrêmement variés : climat, pente, caractéristiques physico-chimiques de la roche (dureté, solubilité), présence ou non de couverture végétale, nature des végétaux.

3.1.2 La notion d'altération

On parle d'altération pour désigner la modification des propriétés physico-chimiques des minéraux, et donc des roches, par des agents externes (eau, gel...).

3.2 Transport des produits de démantèlement

Le transport des matériaux issus de la désagrégation de la roche s'effectue soit sous forme dissoute via la circulation des eaux continentales, soit sous forme solide. Dans ce dernier cas, il peut s'agir d'un transport gravitaire à faible distance, ou d'un transport sur une plus longue distance dès lors que les matériaux sont pris en charge par un agent de transport : glacier, eau, vent.

➔ À RETENIR

Altération et érosion participent à l'effacement des reliefs. Les produits de démantèlement, obtenus sous l'effet de ces deux mécanismes, sont transportés sous forme solide ou soluble, le plus souvent par l'eau. Ils se déposent, c'est-à-dire sédimentent, en des lieux plus ou moins éloignés du lieu de démantèlement.

Voir exercices 2 et 5.

Des études portant sur le volume des débris d'érosion montrent que la seule érosion n'est pas capable d'expliquer la disparition des montagnes. Si les mécanismes d'érosion et d'altération étaient les seuls à intervenir, la durée d'abrasion des chaînes demanderait plusieurs centaines de millions d'années. Or, les géologues établissent que cette durée est plutôt de l'ordre de quelques dizaines de millions d'années.

? PROBLÉMATIQUE

En dehors du couple altération-érosion, quels autres mécanismes participent à la disparition des reliefs ?

L'implication de phénomènes tectoniques dans l'atténuation des reliefs

4.1 Un réajustement isostatique

Au fur et à mesure de la destruction du relief, on assiste à une remontée progressive de la racine crustale de la chaîne. Cela permet de compenser en profondeur, par de la masse mantellique plus dense, la masse disparue en surface par le jeu de l'érosion. Il y a ainsi rétablissement de l'équilibre gravitaire. On parle de réajustement isostatique. Ce mouvement vertical au fur et à mesure de l'érosion explique les affleurements de terrains profonds granitiques et gneissiques dans les chaînes anciennes.

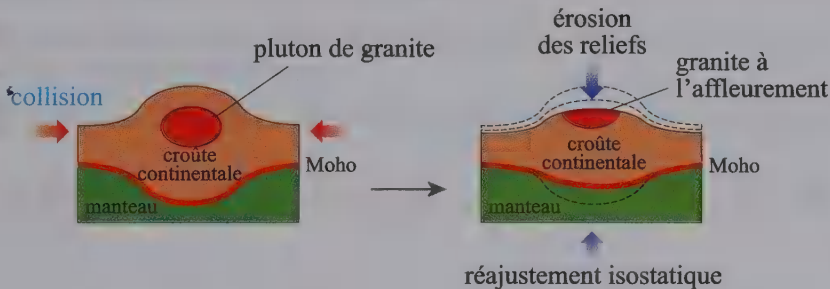


Figure 9.4 – Schématisation de la remontée de roches d'origine profonde en relation avec le rééquilibrage isostatique

4.2 Failles normales et désépaississement crustal

Des mesures géodésiques effectuées dans les Alpes indiquent qu'une tectonique en extension affecte les zones internes, c'est-à-dire le cœur de la chaîne. Il s'agit d'un rééquilibrage post-collisionnel. Dans ces zones en extension, de nombreuses failles normales récentes sont identifiables. Le déplacement relatif des terrains de part et d'autre d'une faille normale a pour bilan un amincissement des terrains qu'elle affecte. L'ensemble des effets de toutes ces failles normales est donc responsable d'un désépaississement crustal.

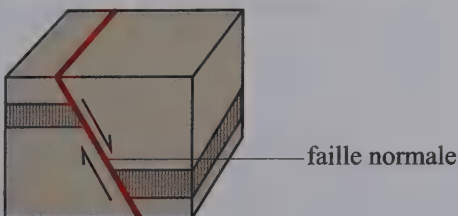


Figure 9.5 – Jeu d'une faille normale

➔ À RETENIR

Une chaîne de montagnes est un système dynamique et instable, qui tend à disparaître dès qu'il se forme. Si les reliefs superficiels s'effacent lentement sous le jeu de l'érosion, des phénomènes additionnels interviennent. Des mécanismes d'équilibrage horizontal (extension de la chaîne postérieurement à sa formation) ou vertical (réajustement isostatique) participent au recyclage des matériaux continentaux.

Voir exercices 6, 7 et 8.

Remarque : à l'instar de la lithosphère océanique, la lithosphère continentale est recyclée. Toutefois, les mécanismes de recyclage du domaine continental (disparition au cours d'une subduction continentale dans le contexte de la collision, érosion-altération du domaine continental) sont différents. Pour cette raison, le domaine continental est amené à abriter, par endroits, les roches les plus anciennes de la Terre.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 201

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

1 Lors du vieillissement d'une chaîne de montagnes, la racine crustale :

- ☐ a est inchangée
- ☐ b devient plus profonde
- ☒ c devient moins profonde

2 L'abrasion complète d'une chaîne de montagnes :

- ☐ a demande quelques milliers d'années
- ☐ b demande quelques dizaines de milliers d'années
- ☐ c demande quelques centaines de milliers d'années

2 Vérification des connaissances

10 min

→ corrigé
p. 201

Répondez brièvement aux questions suivantes :

- 1** Présentez les mécanismes généraux permettant le démantèlement d'un relief. Aucun exemple n'est exigé.
- 2** Comparez les caractéristiques des chaînes anciennes et des chaînes récentes.

3 Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 201

Qui suis-je ?

- ☐ a L'ensemble des phénomènes externes qui enlèvent tout ou une partie des terrains existants et modifient ainsi le relief.
- ☐ b Une réaction chimique qui modifie les minéraux d'une roche lors de son altération.
- ☐ c Le processus responsable de la remontée de la racine d'une chaîne de montagnes à mesure qu'elle s'érode.
- ☐ d Un agent de l'altération des roches.

4 Chaîne ancienne

10 min

→ corrigé
p. 201

Lycée Richelieu, Rueil-Matmaison

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

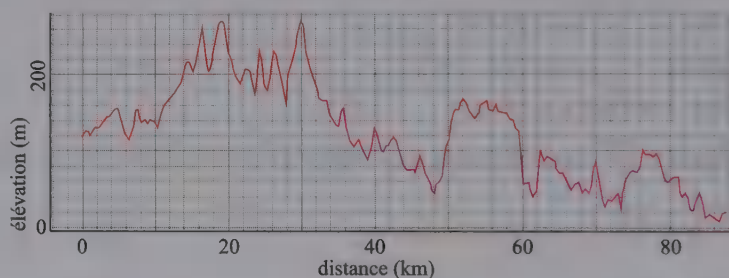
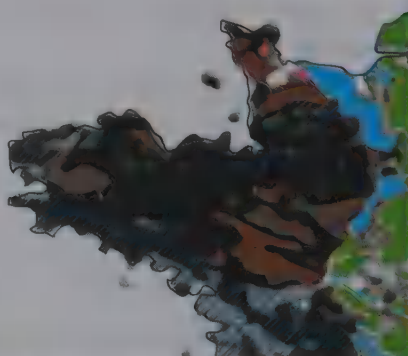


Figure 9.6 – Profil topographique au travers du Massif armoricain

Roches
sédimentaires

- | | | |
|--|-------------|--------------|
| | Quaternaire | } Secondaire |
| | Tertiaire | |
| | Crétacé | |
| | Jurassique | |
| | Permo-Trias | |
| | Primaire | |



Roches métamorphiques
et magmatiques

- | | |
|--|--|
| | Gneiss = roche transformée en profondeur |
| | Granites = roche formées en profondeur |
| | Antécambrien |
| | roches volcaniques |

Figure 9.10 – Carte géologique très simplifiée du Massif armoricain

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

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

- a. le Massif armoricain a subi une longue érosion.
- b. les reliefs du Massif armoricain sont très élevés.
- c. les roches sédimentaires abondent à la surface du Massif armoricain.
- d. les granites ont été érodés et altérés dans le Massif armoricain.

2. Version « question ouverte » :

Après avoir relevé dans les documents les caractéristiques du Massif armoricain montrant qu'il s'agit bien d'un massif ancien, expliquez l'abondance de granites et de roches métamorphiques à l'affleurement dans ce massif.

5 Sédiments – Flux



10 min

corrigé
p. 202

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 environ 50 millions d'années des plaques continentales 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.

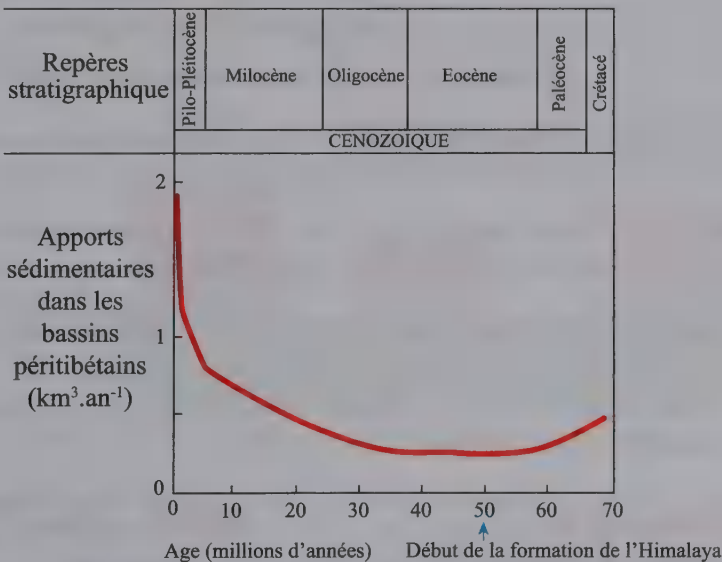


Figure 9.8 – Variations des apports de sédiments par les rivières dans les bassins péritybétains depuis 70 millions d'années

Décrivez les variations observées puis expliquez-les à l'aide de vos connaissances géologiques sur la disparition des reliefs.

6 Erosion – Isostasie

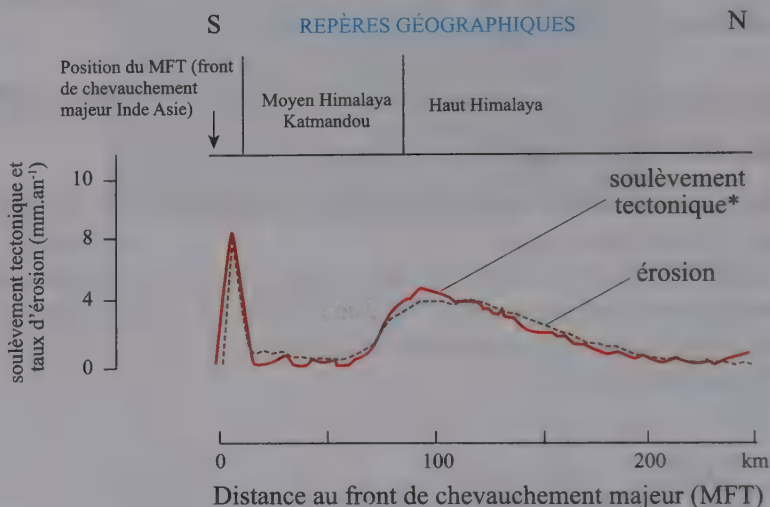
★★

10 min

→ corrigé
p. 203

Lycée Richelieu, RUEIL-MALMAISON

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. Les géologues accordent beaucoup d'attention au dynamisme du domaine continental dans ce secteur. Des modèles numériques sont élaborés afin de rendre compte des variations d'altitude des chaînes himalayennes, dont la formation a démarré il y a 50 millions d'années.



* Le soulèvement tectonique amène en surface des roches profondes riches en silicates. Ce phénomène est accentué par l'action de l'érosion.

Figure 9.9 – Couplage entre tectonique et érosion pour la chaîne himalayenne (estimé par une modélisation numérique, validée par des mesures de terrain)

1. Imaginez quels types de mesures de terrain sont utilisés pour valider ce genre de modèle.
2. À partir des variations livrées par le modèle, justifiez l'affirmation : « les chaînes de montagnes sont des systèmes dynamiques ».

7 Vitesse- Erosion

★★★

15 min

→ corrigé
p. 204

Lycée Richelieu, RUEIL-MALMAISON

En évaluant la masse de sédiments accumulés depuis le début de la collision Inde-Asie (il y a 50 millions d'années) dans les bassins sédimentaires péri-himalayens, les scientifiques ont estimé que la masse de chaîne érodée atteignait $70 \cdot 10^{15}$ tonnes.

Calculez 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 $1 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ et que la masse

volumique moyenne des sédiments est de $2,5 \text{ T} \cdot \text{m}^{-3}$ (T = tonne). Vous vous appuyerez sur le schéma ci-après, 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.

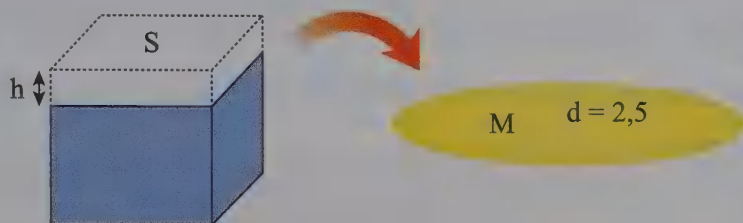


Figure 9-10 – Schéma présentant les données utiles pour le calcul de la vitesse d'érosion

8 Réajustement isostatique – Moho

★★★

15 min

→ corrigé
p. 204

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

On dit que : « tout relief est un système instable qui tend à disparaître aussitôt qu'il se forme ». On cherche à illustrer cette affirmation en exploitant le principe de l'isostasie.

1. Le départ de matière des zones montagneuses soumises à l'érosion provoque un réajustement isostatique. Expliquez-en le principe en vous appuyant sur le schéma ci-après.

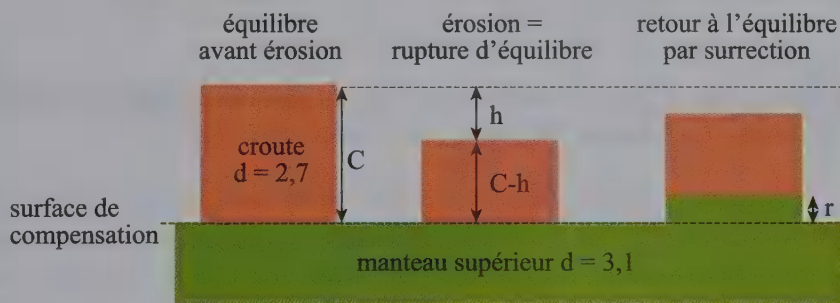


Figure 9-11 – Représentation schématique du réajustement isostatique

2. L'Himalaya est un vaste ensemble de chaînes de montagnes, montrant de très hauts reliefs, dont la formation a démarré il y a 50 millions d'années. Calculez de combien est remonté le Moho sous l'Himalaya par le processus de réajustement isostatique depuis 50 millions d'années. Vous considérerez une vitesse d'érosion de $0,069 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$. Utilisez $d_{\text{croûte}} = 2,7$ et $d_{\text{manteau}} = 3,1$.

9 Erosion – Isostasie

5 min

→ corrigé
p. 204

Lycée Richelieu, RUEIL-Malmaison

Les Alpes s'étendent sur une longueur d'un millier de kilomètres, avec une largeur comprise entre 100 et 400 kilomètres. L'altitude moyenne du massif alpin est d'environ 1700 m.

On considère que son érosion se fait actuellement à une vitesse de 0.18 mm.an^{-1}

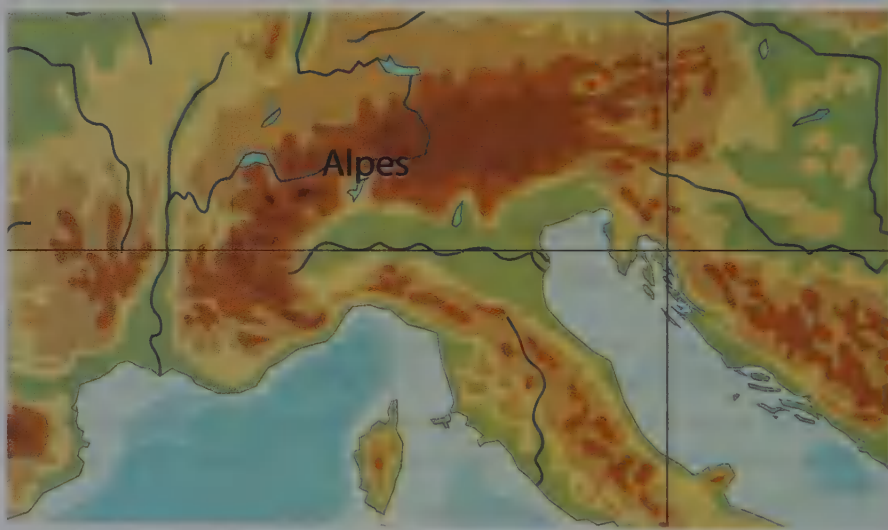


Figure 9.12 – Situation des Alpes

Que pensez-vous de l'affirmation disant que dans 10 millions d'années les Alpes seront pratiquement aplanies ? Justifiez votre réponse.

1 QCM Vérification des connaissances→ énoncé
p. 195Réponses exactes **1 c** et **2 b****2 Vérification des connaissances**→ énoncé
p. 195

1 Le démantèlement d'un relief repose sur le processus d'érosion qui, à la surface du globe, enlève tout ou une partie des terrains existants. L'érosion consiste en deux grands types de phénomènes, dont les effets s'additionnent : les processus chimiques avec altération et dissolution par les eaux, et les processus physiques ou mécaniques avec désagrégation des roches et enlèvement des débris par un fluide. Les produits de démantèlement, obtenus sous l'effet de ces deux mécanismes, sont transportés sous forme solide ou soluble, le plus souvent par l'eau. Ils se déposent, c'est-à-dire sédimentent, en des lieux plus ou moins éloignés du lieu de démantèlement.

2 Dans les chaînes de montagnes anciennes, les reliefs sont moins élevés que dans les chaînes de montagnes récentes. La proportion de roches formées en profondeur (roches magmatiques plutoniques) ou transformées en profondeur (roches métamorphiques) et visibles à l'affleurement y est plus importante.

3 Vérification des connaissances→ énoncé
p. 195

- | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| a L'érosion. | c Le réajustement isostatique. |
| b L'hydrolyse des minéraux. | d L'eau, le gel. |

4 Chaîne ancienne→ énoncé
p. 195

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1. Version QCM : les propositions exactes sont les propositions a et d.

La proposition b est fausse : la coupe topographique montre des reliefs peu élevés, n'excédant pas 300 mètres ce qui est très inférieur aux altitudes relevées dans les chaînes récentes (Alpes par exemple).

La proposition c est fausse : les affleurements du Massif armoricain, lisibles sur la carte géologique, montrent au contraire une toute petite proportion de roches sédimentaires.

La proposition d ne pouvait qu'être vraie : si des granites, roche plutoniques d'origine profonde, sont visibles à l'affleurement, c'est parce qu'ils ont été mis au jour par l'érosion.

2. Version « question ouverte » :

MÉTHODE

Bien repérer les deux instructions contenues dans la consigne globale, et organiser la réponse conformément à ces deux instructions.

« Après avoir relevé dans les documents les caractéristiques du Massif armoricain montrant qu'il s'agit bien d'un massif ancien ... »

Le profil topographique du Massif armoricain montre des altitudes peu élevées n'excédant pas 300 mètres. Avec la carte géologique qui renseigne sur la représentation des roches à l'affleurement, on relève une abondance de granite (roche plutonique) et de gneiss (roche métamorphique). Les roches sédimentaires sont peu représentées.

On est bien en présence de toutes les caractéristiques d'une chaîne de montagnes ancienne : les reliefs sont moins élevés que dans les chaînes de montagnes récentes. La proportion de roches formées en profondeur (roches magmatiques plutoniques) ou transformées en profondeur (roches métamorphiques) et visibles à l'affleurement y est plus importante.

« ... expliquez l'abondance de granites et de roches métamorphiques à l'affleurement dans ce massif ».

On sait que l'altération et l'érosion participent à l'effacement des reliefs. Par conséquent, dans une chaîne de montagnes ancienne, l'abrasion des reliefs contribue dans une certaine mesure à porter à l'affleurement des roches formées en profondeur, comme le granite et le gneiss. De plus, le départ de matière engendré par l'érosion des zones montagneuses appelle un réajustement isostatique. La pression de charge à l'aplomb du relief tendant à diminuer du fait de l'allègement de la chaîne, on assiste à un mouvement vertical ascendant de la croûte (remontée de la racine crustale, cédant de la place au manteau sous-jacent plus dense) la ramenant ainsi à l'équilibre. Cette remontée progressive, au fur et à mesure de l'érosion, explique les affleurements de terrains profonds granitiques et gneissiques dans les chaînes anciennes.

5 Sédiments - Flux

→ énoncé
p. 197

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.

« Décrivez les variations observées ... »

On observe, à partir du début de la formation de l'Himalaya il y a 50 millions d'années, une légère augmentation des apports sédimentaires par les rivières dans les bassins tibétains (de $0,5 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ à $1 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ entre -50 et -20 Ma) puis une augmentation beaucoup plus marquée (de $1 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ à pratiquement $2 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$) entre -20 Ma et l'époque actuelle.

« ... puis expliquez-les à l'aide de vos connaissances géologiques sur la disparition des reliefs »

On sait que les sédiments apportés par les rivières dans les bassins sédimentaires

contiennent les produits de démantèlement issus de l'érosion du domaine continental. Une chaîne de montagnes qui s'érige représente une source importante de matériel à éroder. Pour cette raison, les apports sédimentaires par les rivières dans les bassins tibétains ont sensiblement augmenté depuis le début de la formation de l'Himalaya. Ces apports sont encore très importants de nos jours, car le réajustement isostatique engendre la surrection des montagnes en érosion, ce qui amène vers la surface du matériel à éroder.

6 Erosion - Isostasie

→ énoncé
p. 198

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

⚠ ATTENTION

Un soulèvement peut être orogénique (résultat de la convergence des plaques lithosphériques aboutissant à des chaînes de montagnes) ou isostatique (soulèvement progressif suivant l'érosion qui enlève de la matière à une chaîne de montagnes). Dans le document, il est question de « soulèvement tectonique » et il est précisé que : « le soulèvement tectonique amène en surface des roches profondes ». Il s'agit donc du soulèvement isostatique.

1. Le modèle quantifie d'une part le soulèvement, d'autre part la vitesse d'érosion. Pour connaître la vitesse d'érosion réelle, on peut s'appuyer sur la mesure du volume des débris d'érosion, pris en charge par les rivières ou déposés dans des bassins sédimentaires. Pour connaître la valeur du soulèvement isostatique en un lieu, des mesures du déplacement vertical à l'aide de balises GPS sont réalisables. Si les points de mesure (vitesses d'érosion et soulèvement en différents endroits de la chaîne) coïncident avec celles calculées par le modèle, ce dernier a une validité.
2. Le modèle indique que l'érosion est très variable d'un endroit à l'autre des chaînes himalayennes. L'érosion est particulièrement importante dans la partie sud, à l'emplacement du MFT (front de chevauchement) où la vitesse d'érosion atteint 8 mm.an^{-1} , ainsi que dans le Haut Himalaya où la vitesse d'érosion atteint 4 mm.an^{-1} . D'autre part, le modèle indique que le soulèvement tectonique, à l'instar de l'érosion, est très variable d'un endroit à l'autre des chaînes himalayennes. Le fait remarquable est que la courbe quantifiant le soulèvement épouse fidèlement celle quantifiant l'érosion. Pour interpréter cette similitude, on s'appuie sur le principe d'isostasie. Par le jeu de l'érosion qui enlève du matériel en surface de la chaîne, il y a allègement de la chaîne. La pression de charge à l'aplomb du relief tendrait donc à diminuer. On assiste en compensation à un mouvement vertical ascendant de la croûte (remontée de la racine crustale, cédant de la place au manteau sous-jacent plus dense) la ramenant ainsi à l'équilibre. On parle de réajustement isostatique. Par ce mécanisme, plus l'érosion est importante, plus le soulèvement est important. L'érosion « active » l'isostasie, ce qui accrédite l'idée : « les chaînes de montagnes sont des systèmes dynamiques ».

7 Vitesse- Erosion

→ énoncé
p. 198

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Le volume de « montagne » abrasé par l'érosion en 50 millions d'années est égal à $S \times h$. La vitesse d'érosion recherchée se calculera à partir de h et en ramenant l'échelle de temps à une année. On postule que la matière prélevée par l'érosion se retrouve intégralement sous la forme de sédiments dans les bassins sédimentaires péri-himalayens. On connaît la quantité de sédiments déposés ($M = 70.10^{15}$ tonnes) et leur masse volumique vaut $2,5 \text{ T/m}^3$. Le volume (en m^3) de sédiments déposés en 50 Ma vaut donc $M/2,5$. On a donc $S \times h = M/2,5$ si on exprime S en m^2 , M en tonnes et h en mètres. On recherche h . De l'équation $S \times h = M/2,5$ on tire $h = M/(S \times 2,5)$ d'où $h = (70.10^{15}) / (10^{12} \times 2,5)$ d'où $h = 28\,000 \text{ m}$. Il ya donc eu érosion de l'Himalaya à la vitesse de $28\,000/50.10^6$ mètres par an soit $0,00056 \text{ m/an}$ soit $0,56 \text{ mm/an}$.

8 Réajustement isostatique – Moho

→ énoncé
p. 199

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

On dit que : « tout relief est un système instable qui tend à disparaître aussitôt qu'il se forme ». On cherche à illustrer cette affirmation en exploitant le principe de l'isostasie.

1. Lorsqu'une montagne se fait éroder, elle perd tout le volume de la croûte continentale représenté sur le schéma par la hauteur h . Cela crée donc un déficit de masse. Pour assurer l'équilibre isostatique, il faut créer un excès de masse en profondeur. Cela est réalisé par un mouvement vertical ascendant de la croûte (remontée de la racine crustale, cédant de la place au manteau sous-jacent plus dense) la ramenant ainsi à l'équilibre. On parle de réajustement isostatique.
2. Si la vitesse d'érosion est de $0,069 \text{ mm.an}^{-1}$, l'érosion aura abrasé une hauteur de $50.10^6 \times 0,069 \text{ mm}$ en 50 millions d'années soit une hauteur de $3,45 \text{ km}$. Pour établir l'équilibre, il faut que la remontée r génère en profondeur un excès de masse équivalent au déficit de masse engendré par l'érosion de la hauteur h de terrains.

Le déficit de masse engendré par l'érosion est représenté par $2,7 \times h$. La remontée r de la racine crustale génère un excès de masse représenté par $3,1 \times r$. On a donc $2,7 \times h = 3,1 \times r$ d'où $r = (2,7 \times h)/3,1$. En prenant $h = 3,45 \text{ km}$ on obtient $r = 3,0 \text{ km}$.

On vient de calculer que le processus de réajustement isostatique a engendré depuis 50 millions d'années une remontée du Moho de 3 km sous l'Himalaya.

9 Erosion – Isostasie

→ énoncé
p. 200

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

La vitesse d'érosion des Alpes étant $0,18 \text{ mm.an}^{-1}$, en 10 millions d'années l'érosion aura décapé une hauteur de $0,18 \times 10^6 \text{ mm}$ soit 180 mètres . Comme l'altitude moyenne du massif alpin est d'environ 1700 mètres , cela n'aura pas suffi à aplanir les Alpes.

Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Le flux thermique
3. L'inégale répartition du flux thermique et ses conséquences
4. Utilisation de l'énergie géothermique par l'Homme

1 Introduction

Il existe, par exemple en Islande, des sources d'eau très chaude. Cela montre que, contrairement à une idée répandue, le sous-sol n'est pas plus froid que la surface, au moins dans ces endroits de sources chaudes. Cette chaleur ne provient pas du soleil, mais a une origine interne.

? PROBLÉMATIQUE

Quels sont l'origine de cette chaleur et son lien avec le fonctionnement de la planète Terre ?

2 Le flux thermique

2.1 Qu'est-ce que le flux thermique ?

Les mesures dans les forages et les mines montrent que la température s'accroît quand on s'enfonce dans le sous-sol. On appelle gradient géothermique l'augmentation de la température par unité de profondeur. Le gradient est mesuré en tous les endroits de la Terre. Il a une valeur moyenne de 3 degrés pour 100 mètres.

Il y a dans le sous-sol un flux de chaleur ou flux géothermique qui correspond à une quantité de chaleur par unité de surface traversée : il s'exprime en watts par mètre carré. Il a pour conséquence l'existence d'un flux de chaleur en surface : c'est le flux thermique. Sa valeur moyenne est de 60 milliwatts par mètre carré.

2.2 Origine du flux géothermique

Le flux géothermique a pour origine essentielle la radioactivité : en effet, les enveloppes du globe contiennent des éléments radioactifs tels que l'uranium et le thorium. Leur désintégration donne d'autres éléments chimiques et de l'énergie. En raison de son volume, le manteau est le principal générateur d'énergie radioactive.

2.3 Transfert de l'énergie thermique créée

La chaleur produite dans les enveloppes internes du globe arrive en surface grâce à deux processus physiques : la conduction et la convection.

- La conduction est le transfert de chaleur par contact direct sans mouvement de matière : la chaleur traverse les roches de proche en proche. Cependant, les roches sont de mauvais conducteurs de chaleur.
- La convection est le transfert de chaleur grâce à des mouvements de matière à la manière de l'air chauffé qui s'élève en altitude à l'équateur puis redescend au sol une fois qu'il est refroidi. Le manteau et la croûte étant solides, ce sont les roches elles-mêmes qui se déplacent.

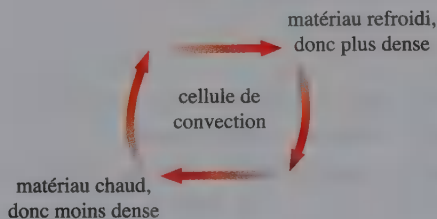


Figure 10.1 – Schéma d'une cellule de convection

L'inégale répartition du flux thermique et ses conséquences

Le flux thermique n'est pas homogène à la surface du globe : il existe des zones à flux thermique élevé comme les dorsales – jusqu'à 350 mW.m^{-2} – et des zones à faible flux thermique comme les zones de subduction – flux quasiment nul.

Cette inégale répartition du flux est un argument en faveur des mouvements de convection des roches. La convection concerne les roches du manteau ductile situé sous la lithosphère. La lithosphère plongeant au niveau des zones de subduction du fait de sa densité apporte du matériel froid dans le manteau, vraisemblablement jusqu'à la limite manteau-noyau. Du matériel mantellique chaud d'origine plus superficielle monte au niveau des dorsales. Des endroits très localisés à l'échelle du globe, les points chauds, correspondent à la montée de matériel chaud depuis la limite entre le manteau et le noyau, appelée couche d".

Les conséquences des mouvements de roches du manteau sont multiples :

- La remontée de matériel asthénosphérique au niveau des dorsales océaniques a pour

conséquence des anomalies positives du flux thermique. Les anomalies du flux thermique sont les écarts (positifs ou négatifs) entre la valeur moyenne de flux et la valeur réellement mesurée.

- La descente de matériel asthénosphérique au niveau des zones de subduction a pour conséquence des anomalies négatives du flux thermique. Le flux y est quasiment nul.
- Les mouvements horizontaux des plaques lithosphériques.

Remarque : les plaques les plus rapides – par exemple les plaques Pacifique, Indo-australienne, Nazca – sont celles qui ont des frontières en subduction, ce qui permet de penser que la traction exercée par le plongement de la lithosphère froide est la force motrice principale d'une cellule de convection et que ce n'est pas la poussée au niveau des dorsales

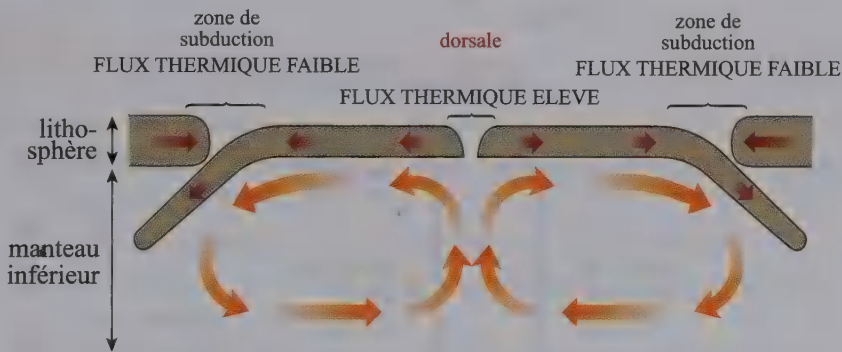


Figure 10.2 – Les mouvements lithosphériques : conséquences de l'inégale répartition du flux géothermique

Voir exercices 1, 3, 4 .

Utilisation de l'énergie géothermique par l'Homme

L'énergie géothermique représente pour l'Homme une source de chaleur directe par récupération d'eau provenant de forages. Elle peut également être une source de chaleur indirecte si on utilise la chaleur du sous-sol pour chauffer des fluides qui sont ensuite récupérés. En fonction de la profondeur atteinte, l'eau a une température plus ou moins importante : environ 15°C pour les canalisations superficielles à usage domestique, jusqu'à 250°C pour les forages les plus profonds.

Ainsi, l'eau chaude des nappes profondes (au-delà de 1500 mètres, l'eau atteint 65°C) est utilisée dans des échangeurs pour chauffer de l'eau domestique. La première installation ayant fonctionné en France se trouvait à Melun en Seine et Marne en 1969.

Dans les régions à fort flux géothermique comme le fossé rhénan ou les zones volcaniques, l'eau est beaucoup plus chaude : environ 200°C à 2000 mètres de profondeur dans le cirque de Salazie de l'île de la Réunion.

La technique d'injection d'eau de surface dans des roches fissurées est appliquée en

Alsace à Soultz la Forêt : l'eau à température ambiante est injectée par un puits jusqu'à 5000 mètres puis récupérée, chauffée à 200 degrés environ. L'objectif est d'obtenir de la vapeur d'eau pouvant faire tourner des turbines et produire de l'électricité. Le procédé est utilisé depuis 2008.

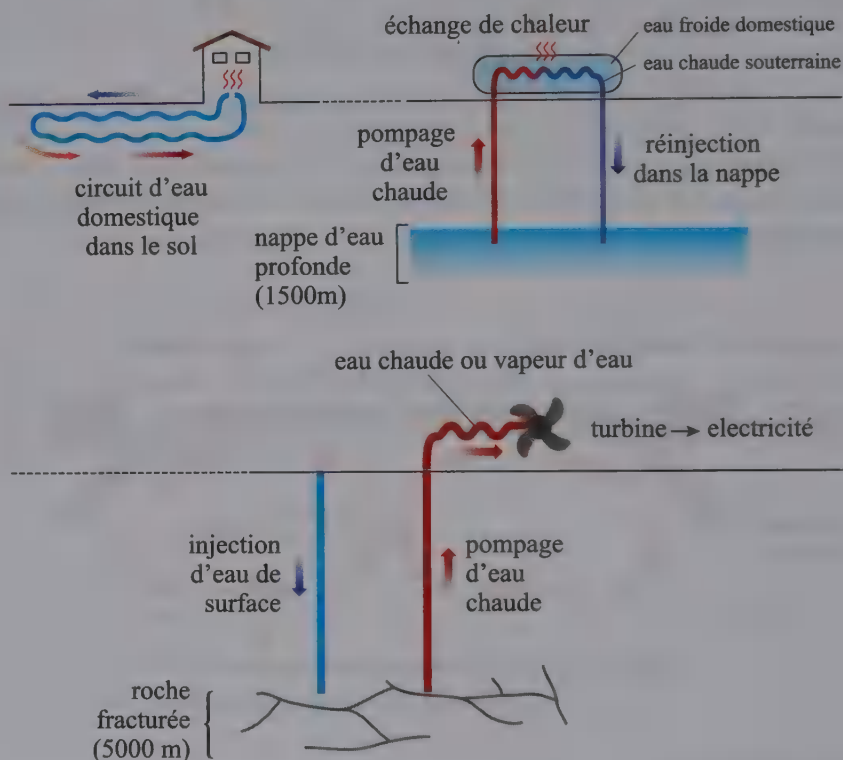


Figure 10.3 – Les différents modes d'utilisation de l'énergie géothermique

Dans tous les cas, la proportion de l'énergie géothermique prélevée par l'Homme est très faible et l'énergie géothermique représente une très faible proportion des besoins énergétiques humains totaux (moins de 3% au niveau mondial).

Voir exercices 2 et 5 .

➔ À RETENIR

A l'intérieur du globe terrestre, il existe une source de chaleur à cause de la désintégration des éléments radioactifs. La chaleur se dissipe par conduction dans les roches, et essentiellement par convection, et on mesure en surface un flux thermique. L'inégale répartition du flux thermique est le témoin de mouvements de convection dans le manteau, à l'origine du mouvement des plaques lithosphériques. L'Homme utilise une petite partie de l'énergie géothermique pour ses besoins en eau chaude et en électricité.

1 Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 214

Les affirmations suivantes sont erronées. Corrigez-les.

- 1 Le flux géothermique est la cause de la production d'énergie interne de la Terre.
- 2 Le flux géothermique, identique en tous les points de la surface du globe terrestre, a une valeur moyenne de l'ordre du watt par mètre carré.
- 3 La convection dans les roches correspond au déplacement de la chaleur par conduction sans déplacement de matière.
- 4 L'inégale répartition de la production de chaleur dans le globe crée une remontée de matériel chaud dans les zones de subduction et une descente de matériel refroidi sous les continents.

2 V/F Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 214

Répondez par vrai ou faux et justifiez si nécessaire :

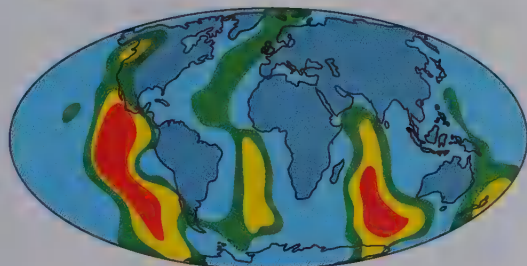
- 1 La radioactivité des éléments du noyau est la cause principale de la production de chaleur interne du globe,
- 2 Le flux thermique est inégalement réparti à la surface terrestre.
- 3 La convection et la conduction sont les deux modes de dissipation de la chaleur interne.
- 4 En général, l'eau chaude du sous-sol alimente directement les installations de chauffage en géothermie.
- 5 La production d'électricité est possible grâce à la chaleur du sous-sol.

3 Flux géothermique

10 min

→ corrigé
p. 214

Lycée Hoche, Versailles

 mW m^{-2}

0 85 120 180 350

Les lignes noires représentent
les contours continentaux

Figure 10.4 – Carte mondiale des flux thermiques exprimés en milliwatts par mètre carré (mW.m^2)

Cochez la seule proposition exacte pour chaque question :

1. Les zones rouges et jaunes visibles sur la carte représentent :
a) un flux thermique élevé

- b) un flux thermique faible
 - c) des différences de température océanique
 - d) des courants océaniques chauds
2. Les zones de flux fort visibles sur la carte :
- a) sont liées à une plus forte énergie solaire arrivant à la surface de la Terre
 - b) sont liées à un volcanisme de point chaud
 - c) sont en relation avec des dorsales
 - d) sont liées à la présence des océans à la surface du globe
3. Les zones de fort flux sont associées :
- a) aux zones de subduction
 - b) à la création de lithosphère océanique
 - c) à la création d'asthénosphère
 - d) à la création de lithosphère continentale

4 Température



20 min

→ corrigé
p. 215

Lycée Pablo Picasso, Fontenay sous Bois

A l'aide des documents et de vos connaissances, exposez comment évolue la température en profondeur dans le globe terrestre.

Remarque : quelques évaluations chiffrées du gradient géothermique, même approximatives, sont attendues.

Rappel : le gradient géothermique moyen de la Terre est de $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Tableau 10.1 – Document A : Mesure de profils de température dans des forages superficiels (Canada)

Profondeur (m)	Température ($^{\circ}\text{C}$)	
	Forage 1 - 1 ^{er} août 2005 altitude du sol 669 m	Forage 2 - 2 août 2005 altitude du sol 630 m
0	20,22	28,07
10	19,59	27,34
20	18,11	19,87
30	12,80	9,89
40	6,52	6,14
50	4,98	4,19
60	3,39	2,99
70	3,39	2,99
80	2,99	2,99
90	3,39	2,99
100	3,39	3,39
120	3,79	3,39
140	4,19	3,79
160	4,19	4,19
180	4,58	4,58
200	4,98	4,58
220	4,98	4,98
240	5,37	5,37
260	5,75	5,37
280	5,75	5,75

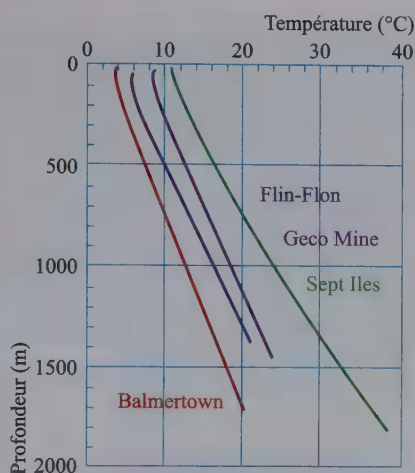


Figure 10.5 –
Document B : Profils de
température mesurés dans
des forages profonds du
continent nord américain
(Canada)

Bouillante est un des seuls sites géothermiques de haute énergie en France. Il se trouve en Guadeloupe, près du volcan de la Soufrière. La centrale géothermique de Bouillante produit de l'électricité depuis plus de 20 ans. La capacité de l'usine était de 15 MW en 2009, soit 6% de la production électrique de l'île.

Larderello est un site géothermique italien où a eu lieu en 1904 le premier essai de production d'électricité à partir de vapeur géothermique. L'exploitation du site et la production d'électricité se sont considérablement développées depuis.

Soultz-sous-Forêts est une station géothermique expérimentale située au nord est de la France. Elle exploite des granites à 200°C situés à 5 km de profondeur, pour produire de la vapeur d'eau qui produira ensuite de l'électricité.

Le site KTB se trouve en Allemagne. Il a été choisi pour y réaliser un des forages scientifiques les plus profonds. La profondeur de 9101 m a été atteinte en octobre 1994. Le principal objectif était d'étudier la croûte profonde du continent européen. Parmi les relevés, a été réalisé un profil thermique.

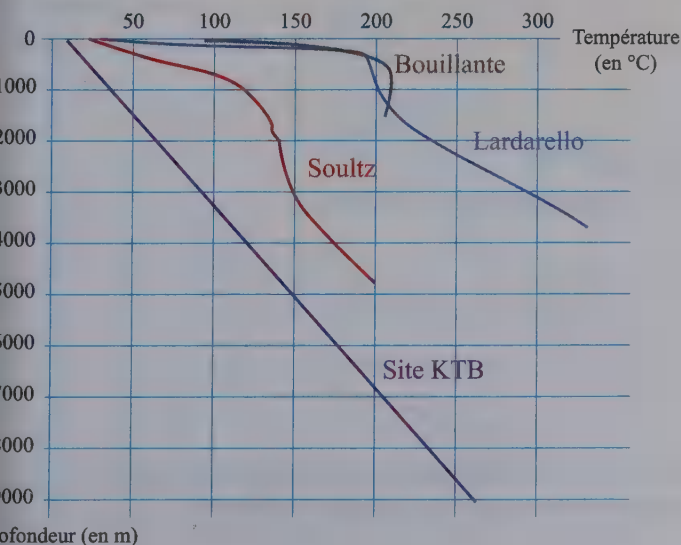
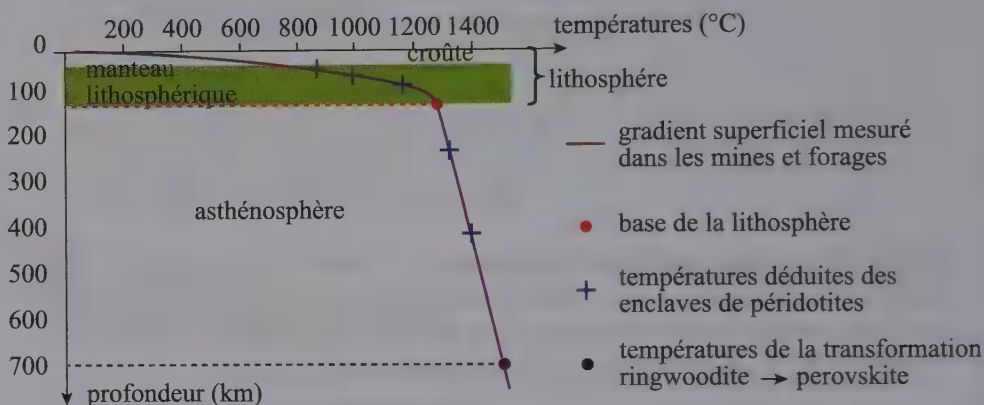


Figure 10.6 –
Document C :
relevés de température
dans des sites remar-
quables

L'observation des enclaves de péridotites, amenées en surface par le volcanisme profond, donne des indications sur leurs profondeurs d'origine (lithosphère, asthénosphère). La base de la lithosphère est estimée à 1300 °C. Enfin, on a identifié à 670 km de profondeur, par analyse sismique, une transformation minéralogique (la transformation de ringwoodite en pérovskite) dont on sait qu'elle se produit à 1550°C. Ces différents points sont représentés sur le graphique ci-dessous.



5 Production – géothermie



15 min

corrigé
p. 216

Lycée Jules Ferry, Paris

Situé aux frontières des plaques Philippines, Pacifique et Eurasie, le Japon est le lieu d'une intense activité sismique. Par ailleurs ce pays est le 8ème producteur mondial d'électricité d'origine géothermique.

A partir de l'exploitation des documents et en mobilisant vos connaissances, montrez que le contexte géodynamique du Japon est propice à la production d'électricité géothermique.



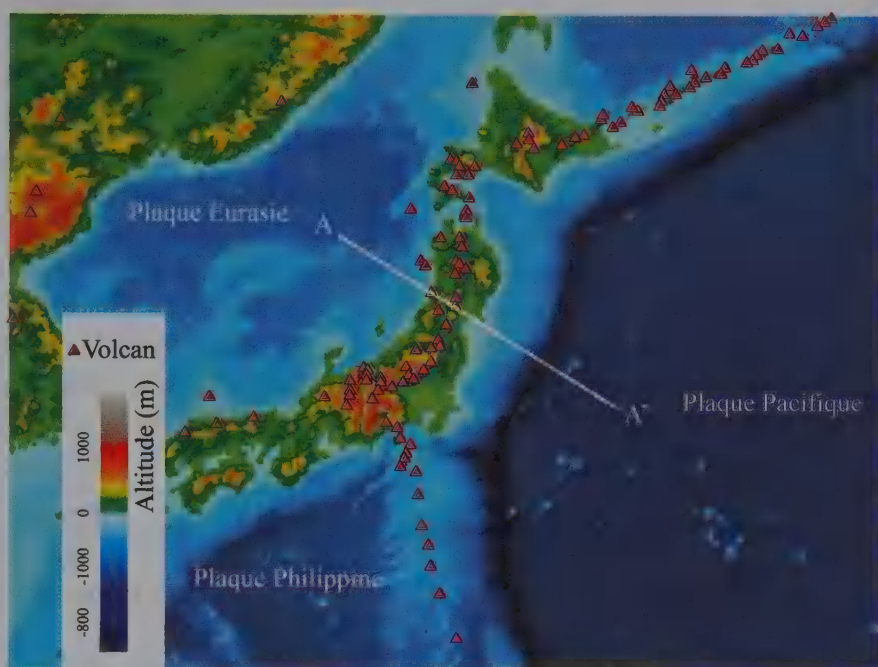


Figure 10.9 – Document B : carte topographique et volcanique aux frontières des plaques Pacifique, Eurasie et Philippines

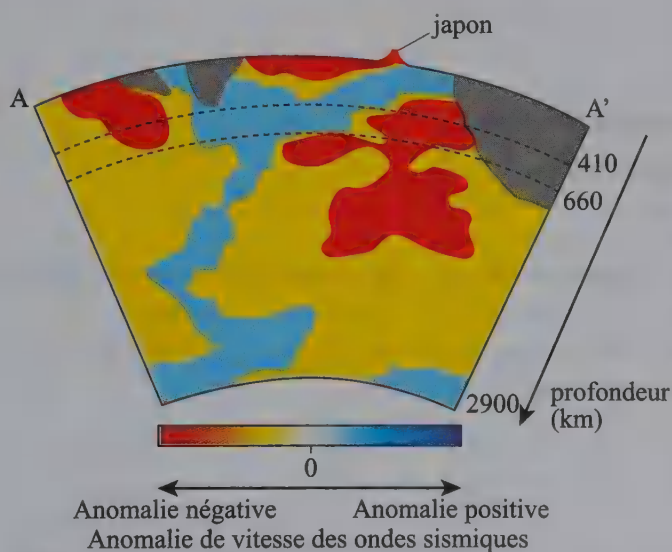


Figure 10.10 – Document C : étude du manteau sous le Japon par tomographie sismique

1 Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 209

- 1 Le flux géothermique est la manifestation (et non la cause) de la production d'énergie interne de la Terre.
- 2 Le flux géothermique, variable selon l'endroit (et non identique en tous les points) de la surface du globe terrestre, a une valeur moyenne de l'ordre de quelques dizaines de milliwatts (et non du watt) par mètre carré.
- 3 La convection dans les roches correspond au déplacement de matière transportant de la chaleur (et non de la chaleur par conduction sans déplacement de matière).
- 4 L'inégale répartition de la production de chaleur dans le globe crée une remontée de matériel chaud dans les zones de dorsales océaniques (et non de subduction) et une descente de matériel refroidi dans les zones de subduction (et non sous les continents).

2 V/F Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 209

- 1 Faux. C'est le manteau qui, par son volume, crée le plus de chaleur d'origine radioactive.
- 2 Vrai.
- 3 Vrai.
- 4 Faux. En général, l'eau chaude du sous-sol passe dans un échangeur de chaleur et réchauffe de l'eau à son contact.
- 5 Vrai.

3 Flux géothermique

→ énoncé
p. 209

Lycée Hoche, Versailles

1. Réponse a
2. Réponse c. A cette échelle, seules les zones de dorsale montrent un flux géothermique important. Les zones de point chaud sont trop petites pour être représentées.
3. Réponse b : les zones de dorsale sont le lieu de l'accrétion océanique, c'est-à-dire de création de lithosphère océanique.

4 Température

→ énoncé
p. 210

Lycée Pablo Picasso, Fontenay sous Bois

MÉTHODE

Les quatre documents mis à disposition donnent des informations sur l'évolution de la température en fonction de la profondeur. Ils apportent des informations différentes. Il faut faire attention à la profondeur atteinte et au caractère général ou particulier de l'endroit étudié.

Une diminution de la température en superficie

D'après le document A, on observe que dans une zone continentale sans particularité, le Canada, la température diminue quand la profondeur augmente jusqu'à 100 mètres environ : elle passe de 20.2 ou 28.1 °C en surface à 3 °C à 100 mètres de profondeur. La température de surface ne semble pas avoir d'influence sur la température atteinte 100 mètres plus profondément.

Une augmentation de la température en profondeur dans le cas général

Au-delà des 100 premiers mètres, on observe que la température augmente régulièrement avec la profondeur : les forages profonds canadiens (doc. B) et le site KTB d'Allemagne (document C) montrent une augmentation proportionnelle de la température jusqu'à 9000 mètres de profondeur. On peut calculer l'augmentation de la température en fonction de la profondeur : il s'agit du gradient géothermique. Dans les forages canadiens, on trouve un gradient d'environ 5 °C pour 500 mètres, soit 10 °C par kilomètre dans les 1500 premiers mètres. Dans le site KTB, on trouve un gradient de 140 °C pour 5 km, soit 28 °C/km dans les 9000 premiers mètres. Ce résultat rejoint la donnée de l'énoncé (30 °C /km).

Pour des profondeurs plus élevées (doc. D), la température continue à augmenter avec la profondeur mais le gradient chute : il fait 1300 °C à 100 km de profondeur. Dans l'asthénosphère, la température augmente relativement peu par rapport à la lithosphère puisqu'il fait « seulement » 1550 °C à 670 km.

Des sites particuliers où le gradient géothermique est différent

Certains sites comme Bouillante, Larderello et Soultz sont des sites géothermiques permettant la production d'électricité à partir de vapeur d'eau (doc. C). Ils sont caractérisés par des variations de température en profondeur différentes des cas précédents. En effet, on observe que pour une profondeur donnée, la température est plus élevée dans ces trois sites que dans le site KTB d'Allemagne : à 1000 mètres de profondeur, il fait 30 °C dans le site KTB, 120 °C à Soultz et 200 °C à Bouillante et Larderello. Le gradient géothermique est beaucoup plus élevé dans les trois derniers sites : 120 ou 200 °C/km au lieu des 30 °C/km habituellement mesurés.

On peut en conclure que la température augmente avec la profondeur sur Terre, sauf

dans la zone la plus superficielle des 100 premiers mètres à l'interface avec l'atmosphère et l'hydrosphère. L'augmentation est régulière et atteint 30°C par km jusqu'à 9000 mètres de profondeur. Le gradient diminue ensuite, notamment à l'endroit de la transition lithosphère-asthénosphère. Certains sites de surface présentent des anomalies positives du gradient géothermique, ce qui autorise une utilisation de la chaleur pour la production d'électricité.

5 Production – géothermie

→ énoncé
p. 212

Lycée Jules Ferry, Paris

On sait que la production d'électricité d'origine géothermique est réalisée à partir de vapeur d'eau produite grâce à la chaleur du sous-sol. Il est nécessaire de se placer dans une zone à fort gradient géothermique, c'est-à-dire là où la température augmente fortement avec la profondeur.

On observe sur le document B que le Japon comporte une forte concentration de volcans. Or les volcans sont créés par la remontée de matériel mantellique chaud. Cela contribue donc à chauffer le sous-sol. Cette conclusion est confirmée par les autres documents à deux échelles de profondeur.

En effet, sur le document A, le flux géothermique est très variable le long d'une coupe passant par le Japon : il est anormalement élevé sous le Japon (160 mW.m^{-2}) et anormalement faible vers le Sud Est : 30 mW.m^{-2} au niveau de la fosse de subduction. De même, à une plus grande échelle, on observe dans le document C des anomalies de vitesses des ondes sismiques. On sait que la vitesse des ondes sismiques dans les roches internes du globe dépend de plusieurs paramètres, dont la température. Deux roches de même nature placées à une même profondeur propagent les ondes sismiques différemment si elles sont placées à des températures différentes : les ondes sont ralenties en cas de température élevée.

On comprend donc de ces données que sous le Japon et toute la zone Nord Ouest de la coupe il existe une zone anormalement chaude.

Finalement, le fait que le Japon soit à la frontière de plusieurs plaques avec une concentration de volcans indique que le gradient géothermique y est élevé, ce qui permet la production d'énergie géothermique.

La plante domestiquée

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Action de l'Homme sur les plantes sauvages
3. Création de nouvelles variétés à partir de plantes cultivées
4. Les apports du génie génétique pour la création de nouvelles variétés

Introduction

Nourrir l'humanité est un enjeu majeur en raison de l'accroissement de la population humaine. Cela a nécessité des cultures à grande échelle. L'agriculture existe depuis le Néolithique au moment où certains êtres humains se sont sédentarisés. L'Homme a alors « domestiqué » certaines plantes sauvages et a sélectionné des variétés adaptées aux conditions de culture et à ses besoins. Il a créé de nouvelles plantes qui n'existaient pas auparavant, comme le Maïs.

? PROBLÉMATIQUE

Comment l'Homme a-t-il procédé par le passé et actuellement pour créer de nouvelles plantes et quelles sont les implications sur le plan génétique ?

Action de l'Homme sur les plantes sauvages

De manière empirique et sans aucune connaissance des fondements génétiques des caractéristiques végétales, les êtres humains ont procédé à des séries de sélections et de croisements des plantes sauvages. Ils ont sélectionné les plantes en fonction de leurs caractères (par exemple, la capacité à avoir de grosses graines) puis ont croisé entre elles les plantes sélectionnées. Sans le savoir, ils ont réduit la diversité allélique en augmentant au fil des générations la fréquence de certains allèles dans cette nouvelle population.

La sélection et le croisement de plantes de la même espèce conduisent à la création de nouvelles variétés de cette espèce. Le croisement entre deux espèces est parfois possible et conduit à la formation d'hybrides.

Ainsi, la Téosinte est une plante sauvage actuelle du Mexique produisant un fruit en épi à quelques graines seulement par épi. Elle a subi une action de l'Homme il y a plusieurs milliers d'années visant à augmenter le nombre de grains par épi. Cela a conduit à la création d'une nouvelle espèce : le Maïs. Actuellement il existe donc deux espèces différentes : la Téosinte et le Maïs. Une espèce est définie comme un ensemble d'individus capables de se reproduire entre eux et d'avoir une descendance fertile. A partir d'une même espèce, il y a spéciation lorsque les deux populations (sauvages et cultivées dans ce cas) ont trop de différences génétiques pour pouvoir se reproduire.

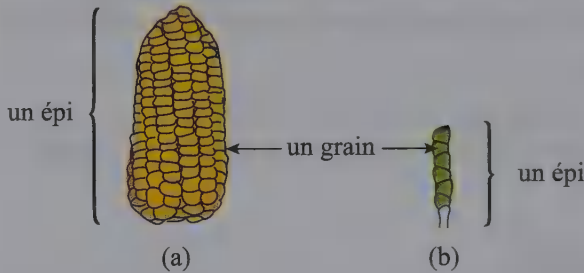


Figure 11.1 – Comparaison d'une plante domestiquée et de la plante sauvage : épis de Maïs (a) et de Téosinte (b)

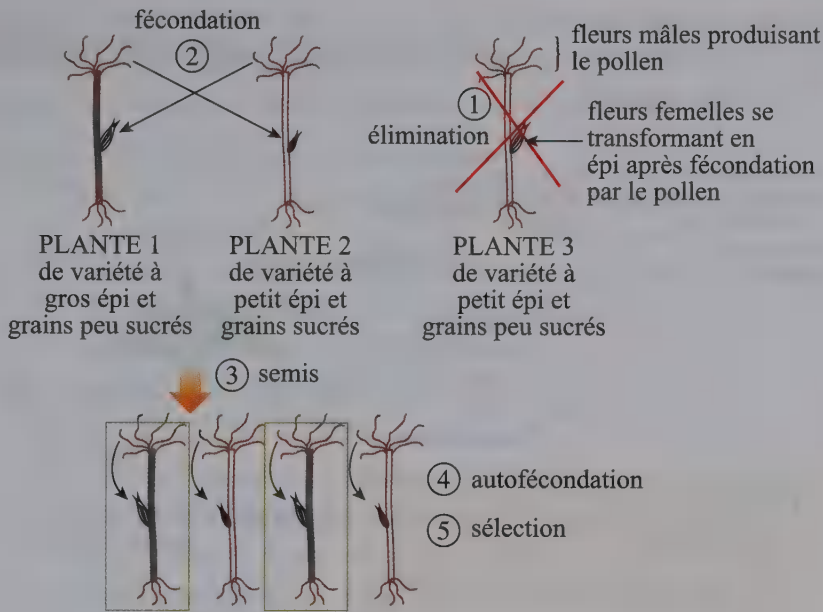
Création de nouvelles variétés à partir de plantes cultivées

A l'intérieur d'une même espèce, on distingue des variants en fonction de leurs caractéristiques. En effet, les innovations génétiques font apparaître de nouveaux allèles ou de nouveaux gènes et les plantes qui les possèdent ont de nouveaux caractères. Le croisement d'individus de variétés différentes produit des hybrides, qui ont parfois les propriétés intéressantes des parents sans en avoir les défauts.

ATTENTION

Le terme d'hybride désigne en biologie végétale le descendant du croisement de deux espèces ou de deux variétés d'une même espèce selon les cas.

Voir figure page suivante.



- ① élimination des plantes peu intéressantes et conservation des plantes aux propriétés intéressantes
- ② fécondation croisée des plantes 1 et 2 dirigée par l'Homme
- ③ ④ semis des graines et autofécondation des descendants dirigée par l'Homme
- ⑤ analyse des propriétés des descendants et sélection des plantes à gros épi et grains sucrés

plusieurs fois

Figure 11.2 – Principe des modifications des caractéristiques des plantes par l'action de l'Homme

Le Maïs produit des épis de forme, de taille et de couleur très diverses qui ont été obtenues par sélection et croisement de plantes. Cela constitue une biodiversité au sein de l'espèce.

Voir exercices 2 et 3.

Les apports du génie génétique pour la création de nouvelles variétés

Le génie génétique est l'ensemble des techniques faisant appel aux connaissances modernes sur les gènes et leur expression. Il nécessite d'identifier les gènes responsables des caractéristiques recherchées puis de les introduire ou de les inactiver ou encore de les faire se surexprimer.

La capacité des végétaux à être régénérés à partir de cellules méristématiques rend la

création de nouvelles variétés plus simple que chez les animaux. En effet, un végétal complet peut être régénéré à partir d'un massif cellulaire appelé cal placé dans un milieu de culture approprié.

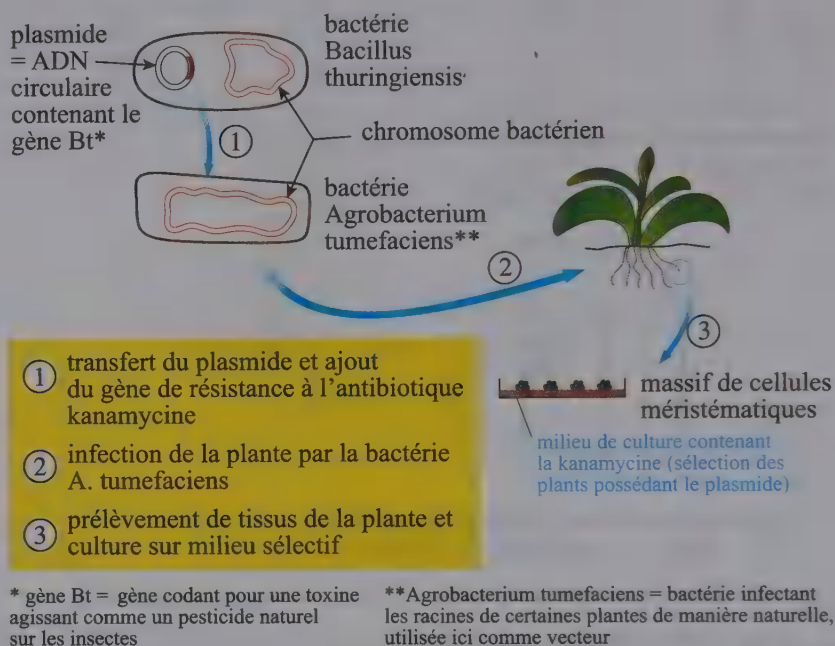


Figure 11.3 – Un exemple de création d'une nouvelle variété :
le Coton résistant aux insectes nuisibles

➔ À RETENIR

Depuis les débuts de l'agriculture, l'Homme pratique la sélection d'espèces ou de variétés végétales aux caractéristiques intéressantes pour son alimentation, celle de ses animaux, son habillement... Les plantes obtenues au fil des générations forment de nouvelles espèces (comme le Maïs) ou de nouvelles variétés. Ces transformations ont des bases génétiques : les croisements changent le nombre de chromosomes, favorisent certains allèles. Les biotechnologies actuelles permettent d'intervenir directement sur le génome des plantes et de régénérer des végétaux entiers.

Voir exercices 1, 4, 5.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 229

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1** Les espèces cultivées actuellement :
 - a** ont été choisies parmi les espèces présentes au moment où l'Homme s'est sédentarisé
 - b** dérivent toutes de la même espèce ancestrale qui a subi des spéciations depuis sa domestication
 - c** n'existaient pas avant l'action de l'Homme
- 2** La domestication d'une plante consiste en :
 - a** sa culture dans un champ
 - b** une succession de croisements et de sélections qui font apparaître des caractéristiques intéressantes
 - c** des croisements d'espèces végétales différentes
- 3** Les biotechnologies appliquées à la biologie végétale permettent :
 - a** de créer des plantes au patrimoine génétique modifié
 - b** de remplacer le génome d'une plante par une autre
 - c** de croiser deux variétés d'une même espèce

2 Nouvelles variétés

★★

10 min

→ corrigé
p. 229

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.

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).

Voir figure page suivante.

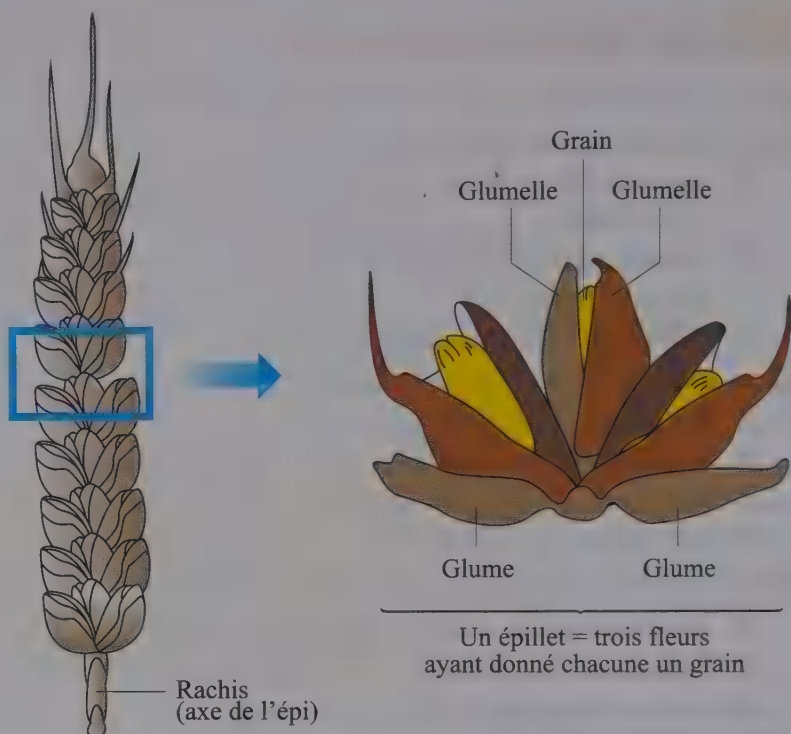


Figure 11.4 – organisation d'un épi de blé

Caractère	Engrain et amidonnier (sauvages)	Blé dur et Blé tendre (cultivés)
Solidité de l'épi	Rachis très fragile → dissémination des grains facilitée	Rachis solide → récolte facilitée
Forme des grains 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 11.1 – Caractéristiques du blé et de deux espèces sauvages proches morphologiquement du blé

Document B :

Voir la figure page suivante

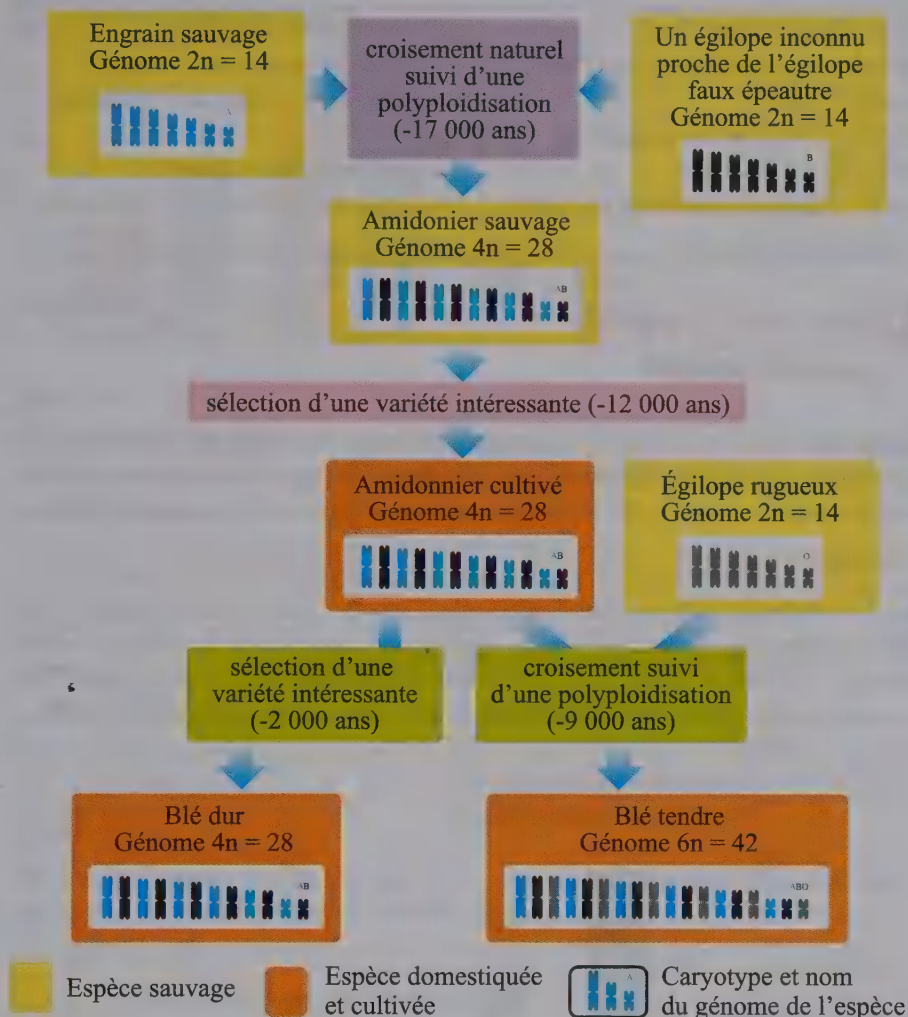


Figure 11.5 – Un scénario de l'origine des blés cultivés

On cherche à comprendre comment l'Homme a créé des espèces végétales intéressantes pour ses besoins.

Choisissez les réponses exactes pour chaque série de propositions et placez de manière visible sur le document B les interventions de l'Homme.

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 14 chromosomes c) a été créé à partir de l'Egilope rugueux d) possède 14 paires de chromosomes
--	---

3. L'amidonniér sauvage :

- a) est de la même espèce que l'amidonniér 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

3 Amélioration végétale

Lycée Charlemagne, Paris

★★

25 min

corrigé
p. 230

La domestication des plantes sauvages par l'Homme a pour effet de sélectionner certains caractères utiles à l'Homme. 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.

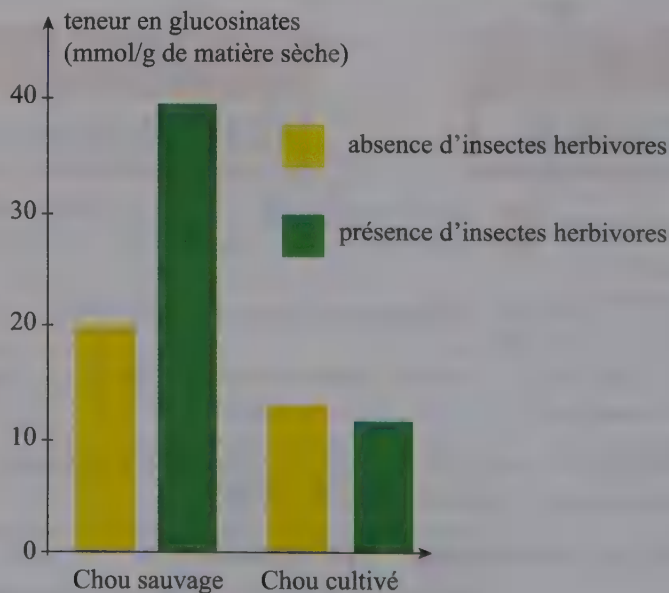


Figure 11.6 – Teneur moyenne en glucosinates d'un chou sauvage et d'un chou cultivé en présence ou en l'absence d'insectes herbivores

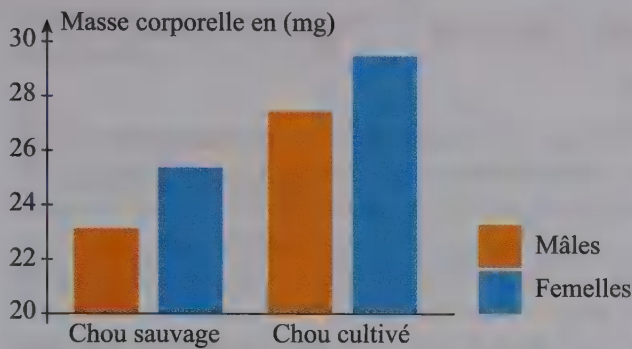


Figure 11.7 –
Document B : effets
de la consommation
des feuilles de chou
sauvage ou cultivé sur
la masse corporelle
des chenilles d'un
papillon, la Piéride.

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.

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
Homme	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		Nouvelles variétés de colza après amélioration génétique par croisements	
	Nom	Teneur en glucosinates (en $\mu\text{mol/g}$ de matière sèche)	Nom	Teneur en glucosinates (en $\mu\text{mol/g}$ de matière sèche)
Variété canadienne	Torch	93	Canola	28
Variétés européennes	Midas	154	Régent	26
	Jet neuf	169	Darmor	41

Tableau 11.2 – 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'Homme sur les plantes cultivées de la famille des Brassicacées contribue à diminuer l'aptitude de ces plantes à la vie dans les écosystèmes naturels.

4 Nouvelles variétés – Croisement



25 min

corrigé
p. 231

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, pamplemoussiers, 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.

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 :

- orangers à fruits sucrés ;
- orangers à fruits doux ;
- mandariniers à fruits sucrés, producteurs de fruits, appelés clémentiniers ;
- 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.

5 Transgénèse

Lycée Guynemer, Compiègne

★★

20 min

→ corrigé
p. 233

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.

A 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 leur 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.

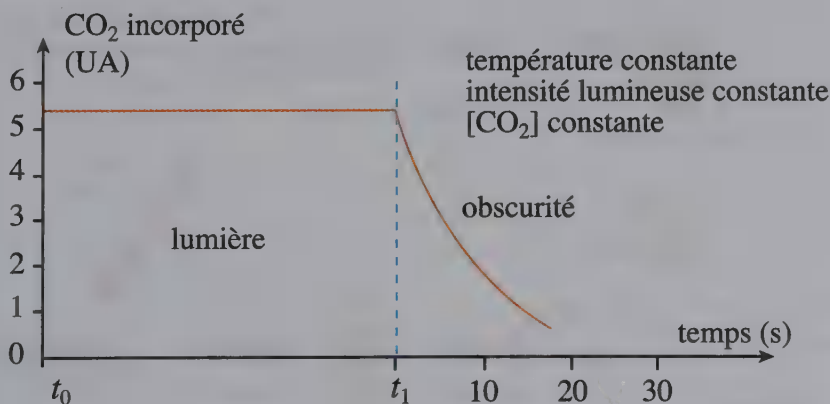


Figure 11.8 – Transfert d'un fragment d'ADN d'*Agrobacterium tumefaciens* dans le génome d'une plante supérieure par l'intermédiaire du plasmide Ti (les échelles ne sont pas respectées)

Document B

Le plasmide Ti est un petit plasmide de 215 milliers de paires de bases.

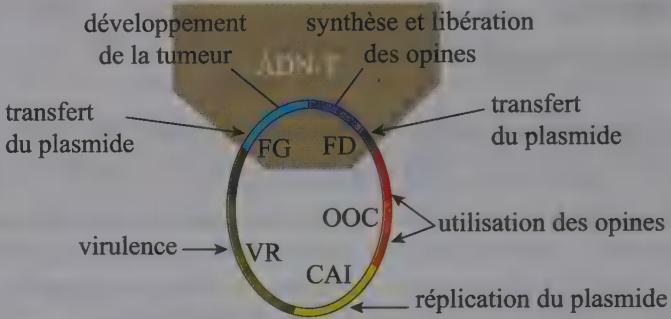


Figure 11.9 – Les régions du plasmide responsables de ses propriétés

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.

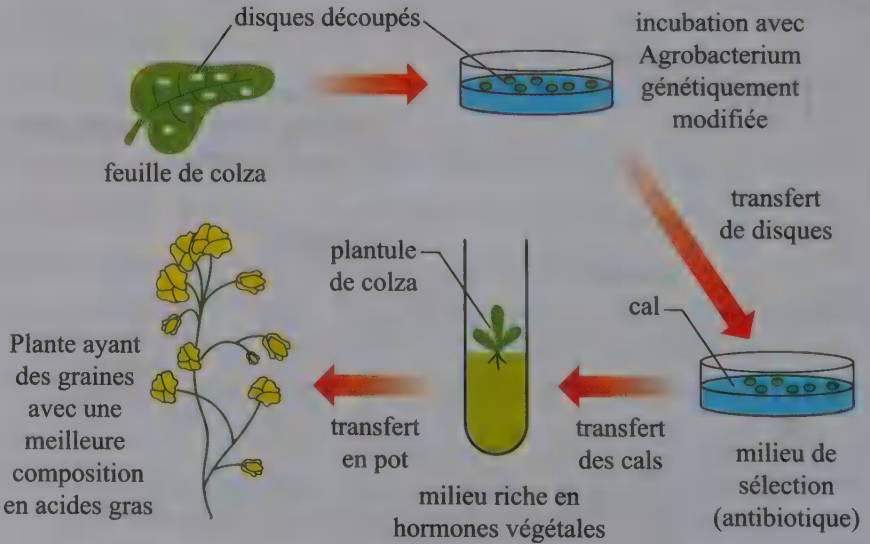


Figure 11.10 – Etapes d'une transgénèse

1 QCM Vérification des connaissances→ énoncé
p. 2211 ☐ b2 ☐ b3 ☐ a**2** Nouvelles variétés→ énoncé
p. 221

Lycée Richelieu, Rueil Malmaison

⚠ ATTENTION

Il faut se méfier de l'apparente simplicité des questions à choix multiples. Les documents doivent être soigneusement étudiés avant de répondre.

1 : ☐ b ☐ c . Un rachis fragile permet que les grains tombent au sol, ce qui n'est pas intéressant pour l'agriculteur. Ce sont les glumelles qui se séparent des grains et non les glumes.

2 : ☐ d

3 : ☐ a ☐ c . L'amidonniér cultivé est issu de la sélection par l'Homme de l'amidonniér sauvage et il possède le même nombre de chromosomes. C'est donc une variété et non une espèce à part entière.

4 : ☐ d . Etant donné l'âge ancien de la création des deux blés, aucune biotechnologie n'a été utilisée. Les blés ont été obtenus par des sélections et croisements.

Voir figure page suivante.

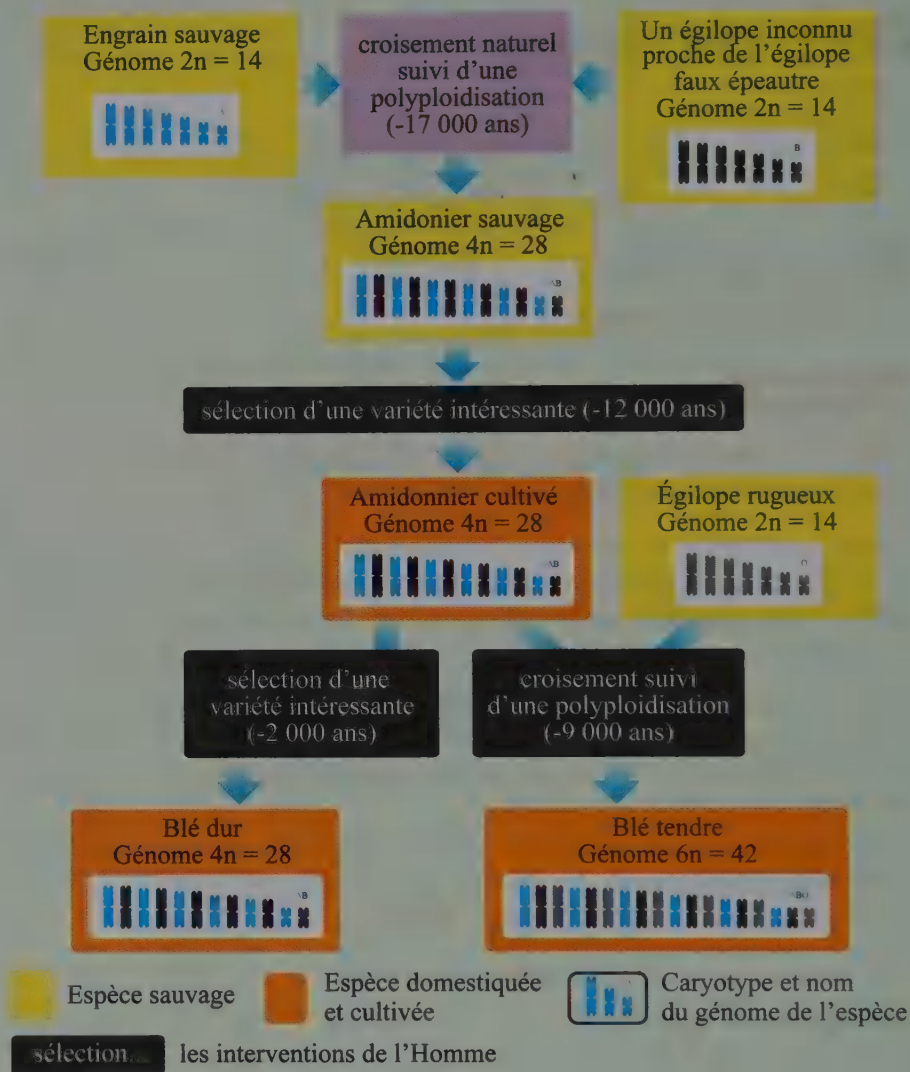


Figure 11.11 – Les interventions de l'Homme lors de la création des blés

L'Homme est intervenu lors des croisements non naturels et des sélections.

3 Amélioration végétale

Lycée Charlemagne, Paris

énoncé
p. 224

Une sélection des Brassicacées visant à diminuer la teneur en glucosinates...

Les glucosinates sont des substances présentes dans les végétaux de la famille des Brassicacées (doc. A). La destruction des cellules, par exemple pour la consommation du végétal, provoque leur conversion en thiocyanates qui ont une saveur amère et piquante. De plus, il existe une corrélation entre la présence de glucosinates dans

les graines et les effets négatifs sur les consommateurs (document C). En effet, on observe que les vaches, les porcs, les volailles et les Hommes ont des effets indésirables importants : avortements, ralentissement de croissance, diminution de la ponte, mortalité, dérèglements de la thyroïde.

Les effets indésirables couplés à la saveur désagréable ont conduit l'Homme à rechercher une diminution de la teneur en glucosinates des Brassicacées. Des croisements chez le colza ont conduit à la création de variétés à faible teneur en glucosinates : environ $30 \mu\text{mol/g}$ de matière sèche contre 130 en moyenne chez les variétés initiales de colza.

... ayant diminué l'aptitude de ces végétaux à vivre dans un écosystème naturel

La teneur en glucosinates des végétaux Brassicacées est différente entre les végétaux sauvages et les végétaux cultivés : le document A montre une différence de concentration importante (12 mmol/g de matière sèche chez le chou cultivé contre 20 chez le chou sauvage). Lorsque des insectes herbivores sont présents, la concentration en glucosinates ne varie pas chez le chou cultivé alors qu'elle augmente fortement chez le chou sauvage : elle est multipliée par deux. On comprend de ces observations que la présence d'insectes induit un mécanisme permettant une production cellulaire plus importante de glucosinates. Comme ces composés, une fois transformés en thiocyanates, donnent une saveur amère et piquante aux végétaux, on peut supposer que l'augmentation de production de ces composés permet d'éloigner les insectes. Ce ne sera pas le cas du chou cultivé.

Le document B permet de confirmer l'hypothèse émise précédemment : la masse corporelle des chenilles est inférieure avec du chou sauvage qu'avec du chou cultivé : il y a un écart de 4 mg chez les mâles et les femelles. On en conclut que les chenilles ont moins consommé le chou sauvage. Celui-ci est donc mieux protégé des herbivores grâce à sa production importante de glucosinates.

Finalement, la sélection par l'Homme qui a été opérée sur les Brassicacées a permis de les rendre meilleurs au goût et moins toxiques en diminuant leur concentration de glucosinates. Cependant, cette amélioration a des conséquences négatives sur le développement des végétaux en milieu naturel. La moindre concentration de glucosinates contenue dans les végétaux cultivés les protège moins des agressions des herbivores et les défavorisera donc.

4 Nouvelles variétés – Croisement

→ énoncé
p. 226

Lycée Sophie Germain, Paris

On cherche à trouver le génotype des clémentiniers à l'aide de croisements réalisés entre des arbres producteurs d'agrumes (document A). Ces arbres sont considérés comme homozygotes. Les descendants des croisements, bien qu'appelés des hybrides, sont fertiles. Tous ces végétaux sont donc de la même espèce.

Le premier croisement des orangers à fruits amers avec des mandariniers à fruits doux

produit des orangers à fruits sucrés. Il y a donc dans ce cas deux caractères étudiés : la taille des fruits (orange ou mandarine) et le goût (amer, doux, sucré). Considérons que chaque caractère est dû à un gène à deux allèles. Soit t^+ l'allèle responsable de la grande taille des fruits et t l'allèle responsable de la petite taille. Soit g^+ l'allèle responsable du goût amer et g l'allèle responsable du goût doux.

Les deux parents étant homozygotes, ils fournissent chacun un seul type de gamète possédant les allèles t^+ et g^+ ou t et g . Les descendants sont donc hétérozygotes pour les deux gènes. Ils ont des grands fruits (orangers) et un goût sucré. L'allèle t^+ s'exprime dans leur phénotype macroscopique donc cet allèle est dominant par rapport à t .

Les fruits des descendants n'ont ni un goût amer ni un goût doux puisqu'il sont sucrés : les deux allèles s'expriment dans leur phénotype macroscopique donc ils sont codominants.

Les deux gènes étudiés peuvent être liés ou indépendants. Le second croisement permettra de trancher : les orangers à fruits sucrés hétérozygotes sont croisés avec des mandariniers à fruits doux. Ces derniers fournissent un seul type de gamète possédant les allèles t et g comme précédemment. L'allèle t étant récessif, la taille des fruits des descendants est déterminée par l'allèle provenant du gamète de l'individu hétérozygote. Pour ce qui est du goût du fruit, les deux génotypes possibles (g^+/g ; g/g) donneront un goût différent. On pourra donc connaître avec certitude l'allèle fourni par l'individu hétérozygote.

Le phénotype et la proportion des descendants du second croisement donnent donc directement le génotype et la proportion des gamètes produits par l'individu hétérozygote. On observe qu'il y a 4 types de descendants en proportions égales. Cela signifie que l'hétérozygote a produit 4 types de gamètes en proportions égales. Chaque allèle du gène responsable de la taille des fruits a donc la même probabilité d'être associé avec l'un ou l'autre des allèles responsables du goût des fruits. Cela montre que les deux gènes sont indépendants, c'est-à-dire sur deux chromosomes différents.

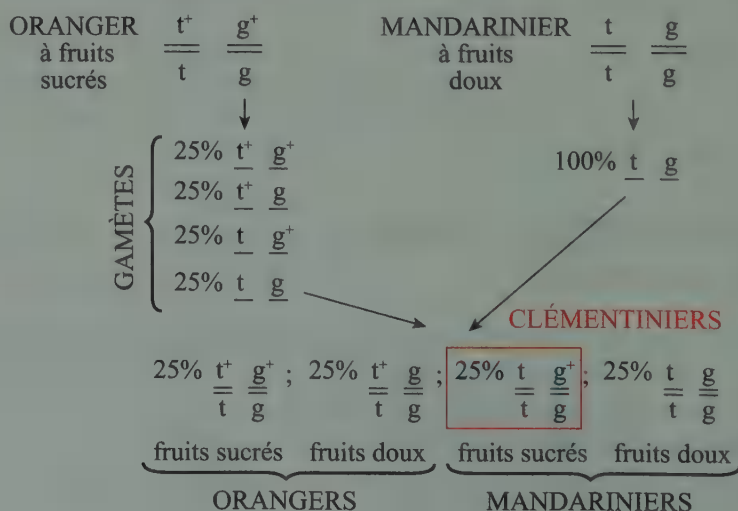


Figure 11.12 – Interprétation du second croisement

L'analyse génétique des croisements permet d'interpréter les résultats relatés dans les comptes-rendus des documents B et C.

En effet, le bigaradier et le mandarinier sont capables de s'hybrider puisqu'il s'agit de deux variétés de la même espèce. Les variétés obtenues présentent des caractères mixtes : cela est dû aux relations entre les allèles. Les allèles dominants donnent aux descendants les caractères d'un des parents. Les allèles codominants produisent des caractères intermédiaires non possédés par les parents (comme le goût sucré des fruits).

5 Transgénèse

→ énoncé
p. 227

Lycée Guynemer, Compiègne

Une transgénèse effectuée naturellement par une bactérie

La bactérie *Agrobacterium tumefaciens* peut infecter la base des tiges des végétaux au niveau de blessures (document A). L'infection se traduit par le transfert d'ADN de la bactérie vers les cellules végétales : un plasmide, appelé plasmide Ti est transféré dans la cellule. A partir de ce plasmide, un fragment d'ADN, l'ADN-T est intégré dans le génome de la cellule.

Les gènes présents dans l'ADN-T codent pour des protéines permettant le développement de tumeur et la synthèse et la libération d'opines dans le sol (document B).

Il y a donc un transfert de gènes d'une espèce à l'autre avec modification des caractéristiques de l'espèce receveuse. C'est bien une transgénèse naturelle.

Utilisation de la bactérie pour la réalisation de transgénèses

D'après le document B, deux zones du plasmide bactérien situées de part et d'autre des gènes de l'ADN-T sont impliquées dans le transfert du plasmide. Ces zones doivent être conservées.

D'après le document C, le reste de l'ADN-T est remplacé par un gène d'intérêt : celui qui permet l'amélioration de la composition en acides gras des graines de colza. Le second gène est un gène de sélection : il permet la résistance à un antibiotique.

On observe que le pouvoir infectant de la bactérie lui permet de transférer son ADN-T modifié à des cellules de feuilles de colza.

- Un milieu de sélection avec antibiotique permet de conserver uniquement les disques de feuilles ayant intégré le gène de résistance, donc possédant le gène d'intérêt.
- les cals sont placés dans un milieu riche en hormones végétales, qui permet la formation d'une plantule.
- enfin, la plantule est transférée dans un pot et se développe, en exprimant le gène transféré qui lui confère l'amélioration recherchée par l'Homme.

Les mécanismes des réponses immunitaires innées et adaptatives

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Un premier temps : la réaction inflammatoire, réponse immunitaire innée
3. Un second temps : ajout de la réponse immunitaire adaptative

1 Introduction

Après une blessure superficielle, il arrive que l'endroit de la lésion gonfle, devienne rouge, chaud et douloureux. Cela correspond à une réaction inflammatoire aiguë. Le même phénomène peut s'observer après une infection de l'organisme par un agent pathogène ou en cas de cancer.

? PROBLÉMATIQUE

En quoi les processus mis en jeu lors de l'inflammation permettent-ils le maintien de l'intégrité de l'organisme ?

2 Un premier temps : la réaction inflammatoire, réponse immunitaire innée

Un agent pathogène comme une bactérie, un virus, un champignon ou un parasite peut entrer dans l'organisme par la peau en cas de lésion ou par une muqueuse (par exemple : bouche, nez, intestin, vagin, urètre). L'organisme lui-même peut contenir des cellules anormales qui sont cancéreuses et qui sont considérées comme étrangères.

Là où se trouvent les « intrus », apparaît une réponse immunitaire qui ne dépend pas du type d'intrus : c'est une réponse non spécifique qui existe chez quasiment toutes les espèces animales et ne nécessite pas d'apprentissage : une réponse innée, présente dès la naissance. La grande conservation des mécanismes de la réponse innée est un argument en faveur d'une origine évolutive commune de toutes les espèces possédant ce système de défense.

2.1 Premier temps de la réponse innée : la phagocytose

Le système immunitaire comporte des cellules et des molécules. Les cellules sont formées dans la moelle osseuse : ce sont les leucocytes. Elles circulent dans le sang et la lymphe et séjournent, entre autre, dans les ganglions lymphatiques. L'ensemble formé par la moelle osseuse et le thymus (lieu de la maturation de certains leucocytes) s'appelle les organes lymphoïdes primaires. Les ganglions lymphatiques, la rate, la plaque de Peyer forment les organes lymphoïdes secondaires.

En temps normal, les leucocytes restent dans les vaisseaux sanguins, lymphatiques ou les ganglions. Certains peuvent cependant se trouver dans les tissus : les macrophages, en particulier, qui sont issus de la différenciation des monocytes et ne se trouvent que dans les tissus.

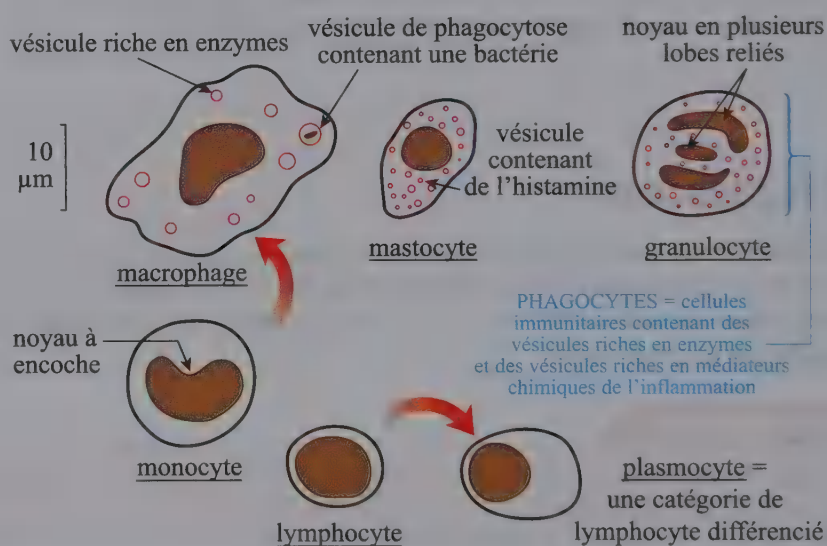


Figure 12.1 – Les différentes catégories de leucocytes

Les cellules immunitaires de la catégorie des phagocytes sont les premières à entrer en jeu : il s'agit des macrophages, des mastocytes, des granulocytes et des cellules dendritiques (cellules présentes dans la peau et les muqueuses et ayant de nombreux prolongements cytoplasmiques). Ils sont capables d'absorber des éléments pathogènes. Ainsi, en cas d'entrée d'une bactérie, ils phagocytent cette dernière, c'est-à-dire qu'ils émettent des prolongements de cytoplasme autour de la cellule et l'englobent. La liaison à l'agent pathogène de manière non spécifique est due à l'existence de récepteurs capables de se fixer à des fragments de molécules communs à un grand nombre de bactéries ou de champignons ou de virus.

À l'intérieur du phagocyte, des vésicules contenant des enzymes fusionnent avec la vésicule de phagocytose et permettent la digestion de la bactérie. Le résultat est la production de molécules issues de la bactérie. Certaines de ces molécules, qui prennent le

nom d'antigènes, sont placées dans la membrane plasmique du phagocyte, associées à des molécules du complexe majeur d'histocompatibilité. Elles seront utiles lors de la réponse adaptative.

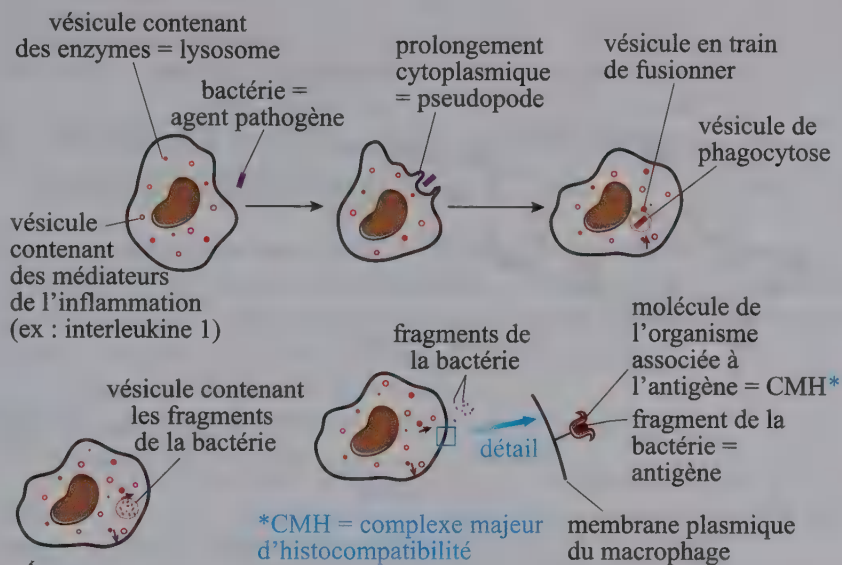


Figure 12.2 – La phagocytose d'une bactérie par un macrophage

Parallèlement, les phagocytes produisent des substances à destination d'autres leucocytes : ce sont des médiateurs chimiques de l'inflammation. Les macrophages sécrètent l'interleukine 1 et le TNF alpha (« tumor necrosis factor ») et les mastocytes sécrètent de l'histamine.

2.2 Second temps : intervention d'autres leucocytes

Les cytokines ou messagers chimiques émises par les cellules après la phagocytose ont plusieurs rôles :

- Attirer sur les lieux de l'infection d'autres leucocytes : des granulocytes et des lymphocytes. Sur la face interne des vaisseaux sanguins, des molécules provoquent l'adhésion des leucocytes circulant près du lieu de l'inflammation.
- Provoquer la dilatation des vaisseaux sanguins. Cette action est à l'origine de la rougeur qui accompagne l'inflammation. Les leucocytes traversent la paroi des vaisseaux sanguins en passant entre les cellules qui forment le vaisseau (l'endothélium). Il y a également une fuite de liquide depuis les vaisseaux vers les tissus, à l'origine du gonflement. La douleur est due à la stimulation des terminaisons nerveuses sensibles par des substances comme les prostaglandines.

Les granulocytes arrivés sur les lieux phagocytent également l'agent pathogène. Lorsqu'ils meurent en grand nombre sur les lieux de l'inflammation, ils forment le pus.

A l'issue de la réponse innée, l'agent pathogène ou les cellules cancéreuses peuvent être totalement éliminées. Si ce n'est pas le cas, un second type de réponse entre en jeu.

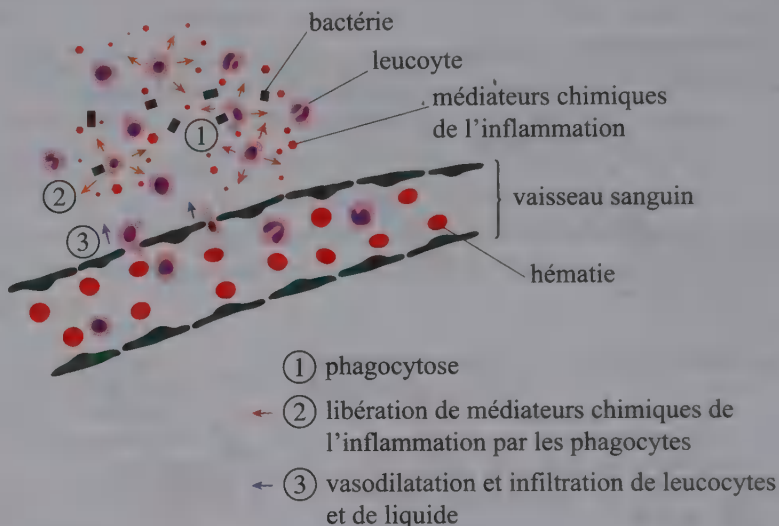


Figure 12.3 – Déroulement d'une réponse inflammatoire aiguë (exemple d'infection par une bactérie)

2.3 Action des anti-inflammatoires

L'inflammation a un effet bénéfique, qui est celui d'éliminer l'agent pathogène, mais elle engendre également des effets indésirables comme la douleur et la fièvre (la fièvre est due à l'action de certaines cytokines sur l'encéphale). On a alors recours à des médicaments anti-inflammatoires, comme l'ibuprofène ou l'acide acétylsalicylique (aspirine). Ils inhibent les effets des prostaglandines. Cependant, ces médicaments doivent être pris avec précaution en raison des effets secondaires possibles. D'une manière générale, les molécules ayant des propriétés anti-inflammatoires agissent comme des antagonistes (molécules ayant les effets opposés) des cytokines inflammatoires.

À RETENIR

L'inflammation aiguë est une réponse naturelle et normale de l'organisme à l'entrée d'un agent pathogène dans l'organisme ou au développement de cellules cancéreuses. Elle est non spécifique et fait appel au processus de phagocytose par des cellules immunitaires, les phagocytes. Les substances produites ont pour effet de déclencher l'inflammation par dilatation locale des vaisseaux sanguins et arrivée massive d'autres leucocytes. Cette réponse innée peut suffire à éliminer le pathogène ou être le premier temps seulement de la réponse immunitaire.

Voir exercices 1 et 4.

PROBLÉMATIQUE

Les agents pathogènes sont très diversifiés et ils agissent de différentes manières sur l'organisme. En cas d'échec de la réponse immunitaire innée, l'action des leucocytes peut-elle être plus ciblée et par conséquent, plus efficace ?

Un second temps : ajout de la réponse immunitaire adaptative

En plus de la réponse immunitaire innée étudiée précédemment, la réponse adaptative se développe contre tous les agents pathogènes (virus, bactéries, champignons) ainsi que contre les cellules cancéreuses. Elle est présente seulement chez les Vertébrés. On illustrera cette partie à l'aide de l'exemple du virus de la grippe.

3.1 Une sélection de certains clones de lymphocytes

Chaque cellule ou molécule reconnue comme étrangère possède des portions de molécules susceptibles de déclencher une réponse immunitaire : on appelle antigène une telle molécule ou partie de molécule.

3.1.1 Sélection clonale de lymphocyte spécifiques de l'antigène

Un virus est un parasite intracellulaire, c'est-à-dire qu'il doit infecter une cellule et utiliser la machinerie cellulaire de celle-ci pour se reproduire. Par conséquent, après l'infection par le virus, celui-ci se trouvera dans ses cellules cibles et en circulation dans le sang et la lymphe. Dans le cas du virus de la grippe, les cellules cibles sont de nature très diverse : cellules musculaires, cellules intestinales, neurones etc.

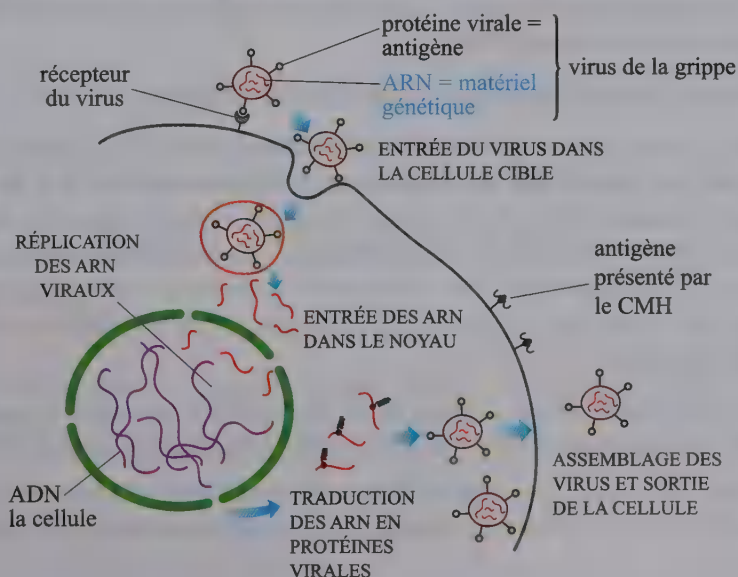


Figure 12.4 – Le virus de la grippe et son cycle

Les cellules qui reconnaissent les antigènes libres du milieu extracellulaire sont appelées des lymphocytes B (L_B). Chaque L_B présente sur sa membrane plasmique des anticorps membranaires spécifiques d'un unique antigène particulier.

Les anticorps membranaires des L_B , tout comme les anticorps sécrétés dans le sérum sont des protéines à quatre chaînes identiques deux à deux : deux chaînes lourdes et deux chaînes légères. Chaque chaîne est constituée d'une partie constante et d'une partie hautement variable responsable de la spécificité du L_B . Les parties variables forment deux sites identiques de reconnaissance d'un antigène. Les récepteurs des L_B (anticorps membranaires) préexistent à tout contact avec l'antigène.

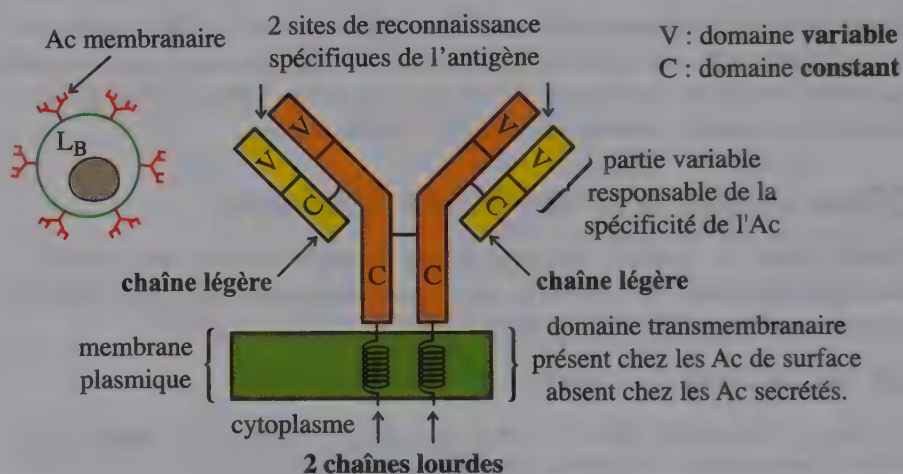


Figure 12.5 – Structure d'un anticorps membranaire

Lorsqu'un antigène libre se fixe sur un anticorps membranaire, le L_B est sélectionné (sélection clonale) et il devient activé.

3.1.2 - Sélection clonale de lymphocytes T spécifiques de l'antigène

Les cellules immunitaires qui reconnaissent indirectement les antigènes présents à l'intérieur des cellules sont les lymphocytes T. Contrairement aux L_B qui reconnaissent les antigènes libres, les L_T reconnaissent les antigènes lorsqu'ils sont présentés à la surface d'une cellule. Cette cellule peut être une cellule immunitaire qui a phagocyté l'agent pathogène lors de la réponse innée ou une cellule infectée. Elle exprime à sa surface des « fragments » de l'antigène (petits peptides issus des protéines du pathogène).

L'antigène est « présenté » à la surface de la cellule grâce à une association avec une molécule de l'organisme appelée complexe majeur d'histocompatibilité (CMH).

Comme les L_B , les L_T possèdent des récepteurs spécifiques de l'antigène nommés récepteurs T. Il s'agit de protéines à deux chaînes avec un domaine constant et une

partie hautement variable responsable de la spécificité. Le récepteur T se lie par complémentarité de forme à l'antigène associé à une molécule du CMH à la surface de la cellule. Un LT possède en surface une seule sorte de récepteurs.

L'ensemble de tous les récepteurs portés par les lymphocytes B (anticorps) et les lymphocytes T (récepteurs T) d'un corps humain constitue son répertoire immunologique.

Deux types de lymphocytes T interviennent dans la réponse immunitaire. Ils se distinguent par la présence en surface de marqueurs membranaires différents : les lymphocytes T $CD4^+$ ou $LT4$, qui portent des marqueurs $CD4$ et les lymphocytes T $CD8^+$ ou $LT8$ qui portent des marqueurs $CD8$.

Un $LT4$ se lie à l'antigène dont il est spécifique s'il est présenté par une molécule du CMH de classe I sur la membrane d'un phagocyte ou d'un lymphocyte B. De cette façon, il assure le lien entre la réponse innée et la réponse adaptative.

Un $LT8$ se lie à l'antigène dont il est spécifique s'il est présenté par une molécule du CMH de classe II sur la membrane de n'importe quelle cellule infectée.

Les lymphocytes T sont alors sélectionnés et activés.

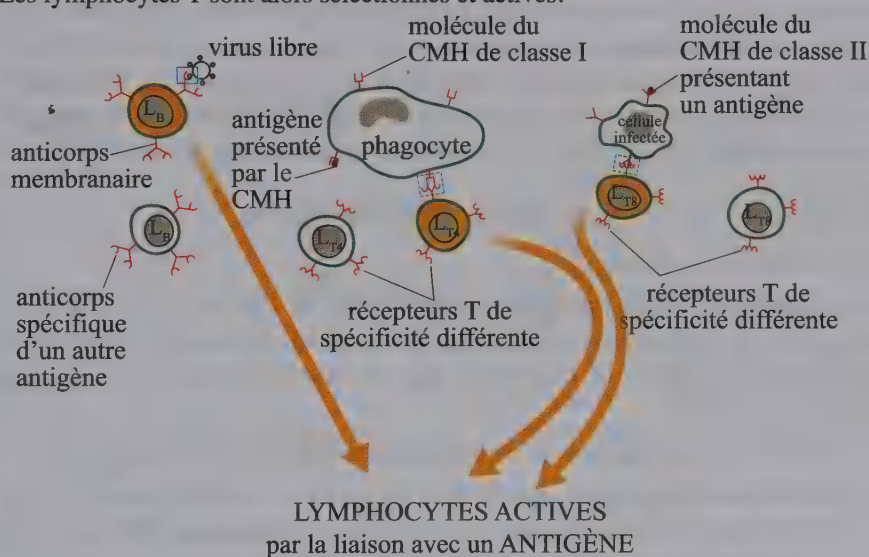


Figure 12.6 – La sélection des clones de lymphocytes

À RETENIR

La réponse immunitaire adaptative est une réponse spécifique qui met en jeu des lymphocytes. Elle repose sur une liaison entre des molécules, les antigènes, et des récepteurs des lymphocytes (anticorps ou récepteurs T). Les anticorps membranaires se lient aux antigènes libres alors que les récepteurs T se lient aux antigènes présentés par une cellule au niveau des molécules du CMH. Les lymphocytes qui se lient sont sélectionnés et activés.

3.2 Une production de cellules nouvelles : amplification et différenciation clonales des lymphocytes B et T

3.2.1 Production de lymphocytes T auxiliaires, véritables pivots de la réponse immunitaire adaptative

À la suite de l'entrée d'un antigène dans l'organisme, les LT4 activés se multiplient et se différencient en deux catégories de cellules :

- les LT4 auxiliaires (ou helpers), LTh sécréteurs de messagers chimiques : les interleukines ;
- les LT4 mémoire intervenant dans les phénomènes de mémoire immunitaire.

Les interleukines sont indispensables à la phase d'amplification clonale des LB et LT8 activés. Sans LTh, la production de plasmocytes et de lymphocytes T cytotoxiques n'a pas lieu et les agents pathogènes ne peuvent pas être détruits. Les LTh jouent donc un rôle de chef d'orchestre des réactions immunitaires adaptatives.

Dans le cas du SIDA, le virus de l'immunodéficience humaine a pour cellules-cibles les lymphocytes T4. La destruction des LT4 empêche la production d'interleukines, et empêche donc la formation de plasmocytes et de LT cytotoxiques en cas d'infection (virus, bactéries, champignons) ou de présence de cellules cancéreuses. Cette défaillance des réactions immunitaires acquises est à l'origine de l'apparition de maladies opportunistes associées au SIDA : toxoplasmose, sarcome de Kaposi, etc.

3.2.2 Production de plasmocytes et réponse à médiation humorale

a) La production de plasmocytes

Après réception d'un messenger chimique délivré par un LT4 auxiliaire (une interleukine IL-2), les LB activés se multiplient. Tous les LB du clone sont spécifiques de l'antigène qui a provoqué l'activation. Les LB se différencient ensuite en deux catégories de cellules :

- les LB mémoire, importants dans le phénomène de mémoire immunitaire ;
- les LB sécréteurs d'anticorps appelés aussi plasmocytes, qui sont reconnaissables par le développement important de leur réticulum endoplasmique. Ils produisent durant quelques jours des anticorps libérés dans le sérum.

b) La phase effectrice : neutralisation de l'élément étranger par formation de complexes immuns

Les anticorps sécrétés par les plasmocytes sont nommés immunoglobulines ou anticorps circulants du milieu intérieur. Ils sont de même spécificité que les anticorps membranaires du lymphocyte B qui s'est différencié. Ils se fixent sur les antigènes libres pour former des complexes immuns, ensembles moléculaires formés par plusieurs anticorps et un ou plusieurs antigènes. Les antigènes libres sont ainsi neutralisés. Dans le cas du virus de la grippe, le virus ainsi entouré ne peut plus infecter de cellule.

Les phagocytes (macrophages, granulocytes) exprimant des récepteurs de la partie

constante des anticorps, fixent par l'intermédiaire de ces récepteurs les complexes immuns et les éliminent par phagocytose.

Les phagocytes coopèrent donc à nouveau avec les lymphocytes. Ils présenteront dans leur membrane plasmique des fragments de l'agent pathogène associé au CMH et activeront de nouveaux lymphocytes T.

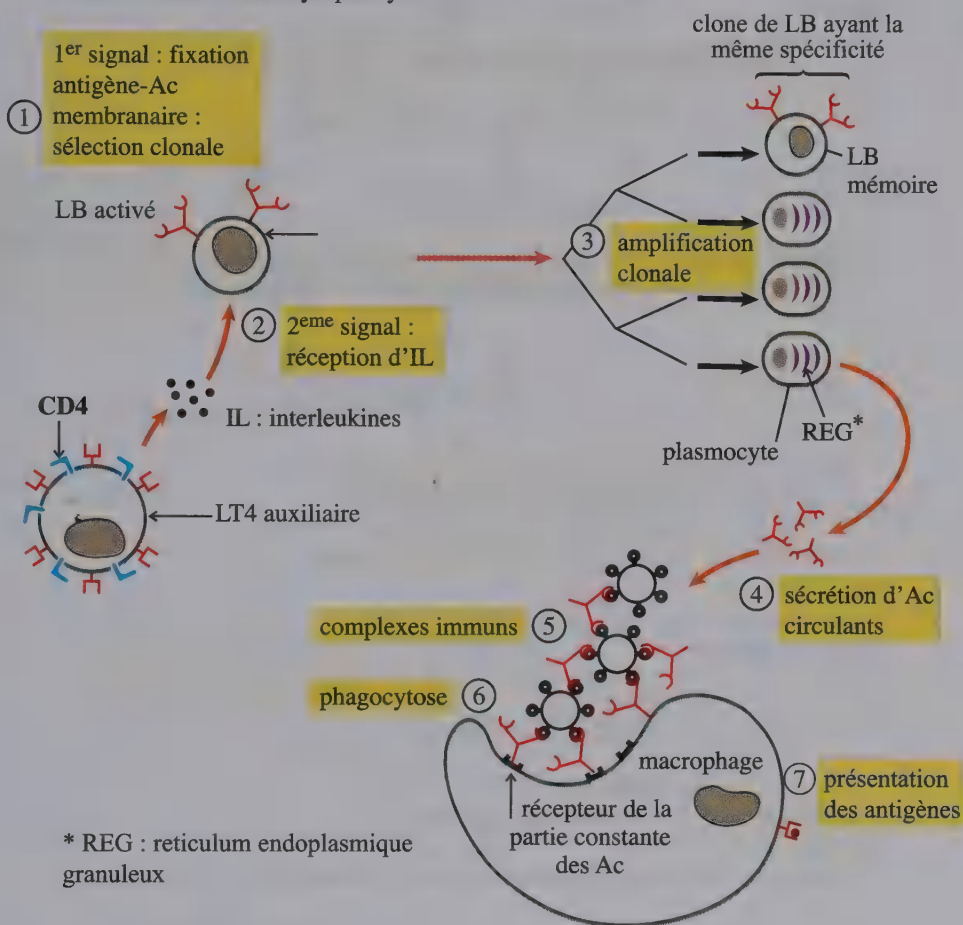


Figure 12.7 – Production et action des plasmocytes

c) Utilisation des propriétés des anticorps pour leur détection

Les anticorps sont des molécules très spécifiques qui ne se lient qu'à un seul antigène. Leur présence dans un organisme est le signe de la séropositivité. Ils sont recherchés pour confirmer la présence d'un agent pathogène. Il faut néanmoins attendre quelques semaines avant d'en avoir une quantité détectable.

Il existe différents tests, tous basés sur la propriété de spécificité de liaison entre les anticorps et les antigènes : test Elisa comportant des fragments de l'agent pathogène au fond de petites cupules, western blot comportant des fragments de l'agent pathogène sur un gel d'électrophorèse, test d'Ouchterlony recherchant des complexes immuns en milieu solide.

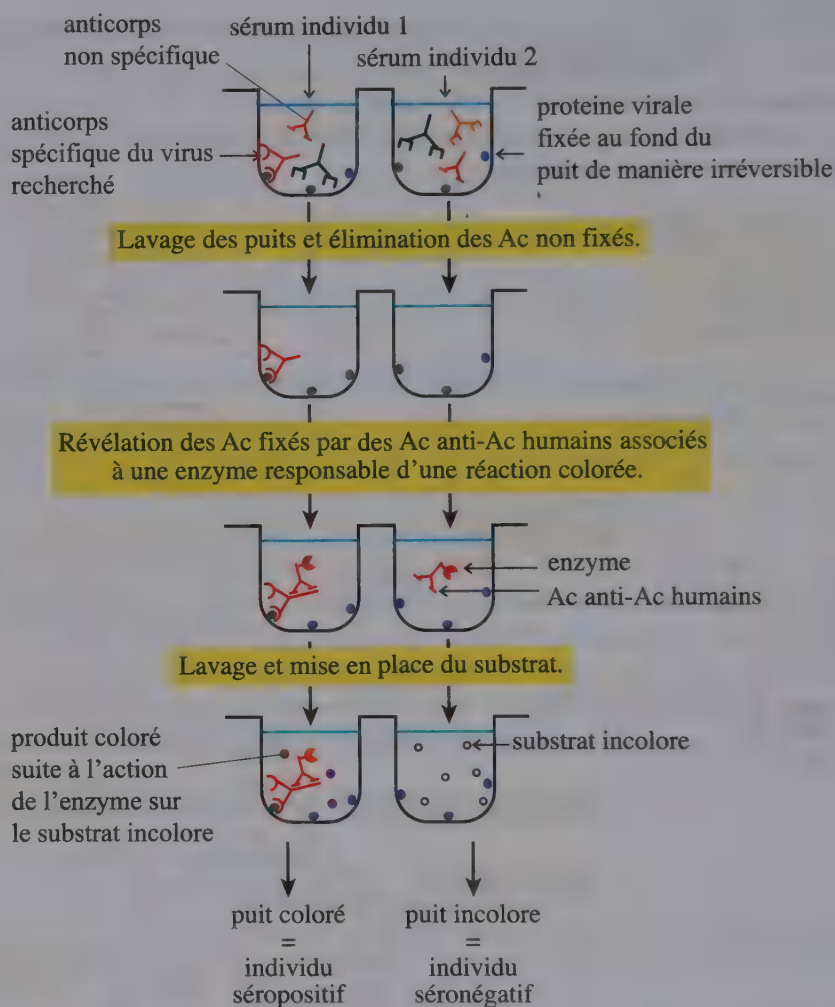


Figure 12.8 – Un exemple de test de détection de la séropositivité : le test Elisa

3.2.3 Production de lymphocytes T cytotoxiques et réponse à médiation cellulaire

a) La production de LT cytotoxiques

Lorsqu'un LT8 activé reçoit une interleukine de la part d'un LT4, il subit une expansion clonale : il se multiplie et forme un clone de LT8 portant à la surface les mêmes récepteurs T. Chaque LT8 se différencie en lymphocyte T cytotoxique.

b) La phase effectrice : destruction des cellules infectées

Les LT cytotoxiques se lient par leurs récepteurs T aux cellules infectées (exprimant elles aussi les antigènes viraux à leur surface). Ils sécrètent des molécules appelées perforine qui s'intègrent dans la membrane plasmique de la cellule infectée et forment un canal. De l'eau entre par le canal et les substances cytoplasmiques dissoutes de la cellule sortent : la cellule éclate et entre en apoptose. Il s'agit d'une mort cellulaire programmée des cellules. Les débris cellulaires sont phagocytés par les macrophages.

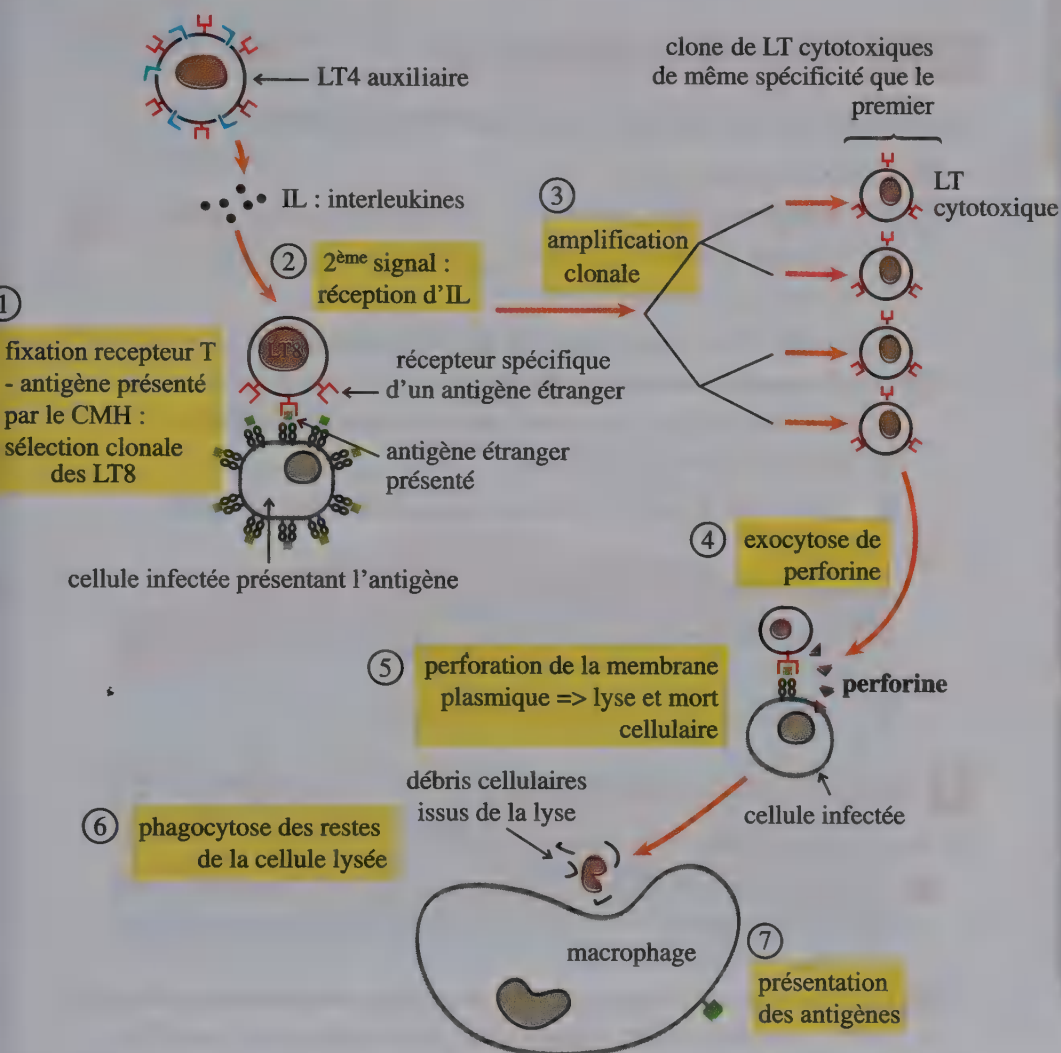


Figure 12.9 – Production et action des lymphocytes T cytotoxiques

À RETENIR

Les lymphocytes activés se multiplient et se différencient en cellules spécialisées permettant la destruction de l'agent pathogène. Les plasmocytes sécrètent des anticorps permettant la destruction des agents pathogènes libres comme des virus circulants alors que les lymphocytes T cytotoxiques détruisent les cellules infectées. Les LTh sont indispensables à la formation de ces cellules grâce à la production d'interleukines.

Voir exercices 2, 3, 5 à 11.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

corrigé
p. 256

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de proposition :

- 1** La réponse inflammatoire :
 - a** existe chez tous les Vertébrés
 - b** cesse quand la réponse adaptative commence
 - c** fait intervenir des plasmocytes
 - d** se caractérise par une rougeur et une odeur particulière
- 2** Les médicaments anti-inflammatoires :
 - a** éliminent les agents pathogènes responsables de certaines maladies
 - b** atténuent la fièvre et la douleur
 - c** peuvent être pris par toutes les personnes adultes sans précaution
- 3** L'histamine :
 - a** est produite par les plasmocytes
 - b** est un médiateur assurant la transmission des informations entre deux neurones
 - c** est impliquée dans les réactions inflammatoires

2 Vérification des connaissances

10 min

corrigé
p. 256

Les affirmations suivantes sont erronées. Corrigez-les.

- 1** Le virus de la grippe possède à sa surface des anticorps, qui sélectionnent les cellules immunitaires spécifiques par liaison avec les récepteurs de ces cellules.
- 2** Les macrophages, lymphocytes T4 et plasmocytes sélectionnés par le contact avec le virus de la grippe subissent des divisions cellulaires et une différenciation.
- 3** Les anticorps circulants se lient les uns aux autres par leur partie constante et forment un complexe immun.
- 4** Les LTc phagocytent les cellules infectées par le virus de la grippe, ce qui permet la destruction de celles-ci.
- 5** Les LT4, en sécrétant de l'interleukine, sont indispensables à la phase de sélection clonale.

3 Vérification des connaissances

5 min

corrigé
p. 256

Répondez brièvement aux questions suivantes :

- 1** Quel phénomène est à l'origine de la rougeur et de la chaleur lors de l'inflammation ?

- ❑ Quels sont les acteurs du système immunitaire aboutissant à la création d'anticorps circulants ?
- ❑ A quel(s) moment(s) les macrophages interviennent-ils dans la réponse immunitaire ?

4 Réaction inflammatoire



10 min

corrigé
p. 215

Lycée Notre Dame du Grand Champ, Versailles

L'introduction de bactéries dans un tissu, suite à une piqûre par exemple, entraîne une réponse locale du système immunitaire qui apparaît dans les 48 heures après lésion : la réaction inflammatoire.

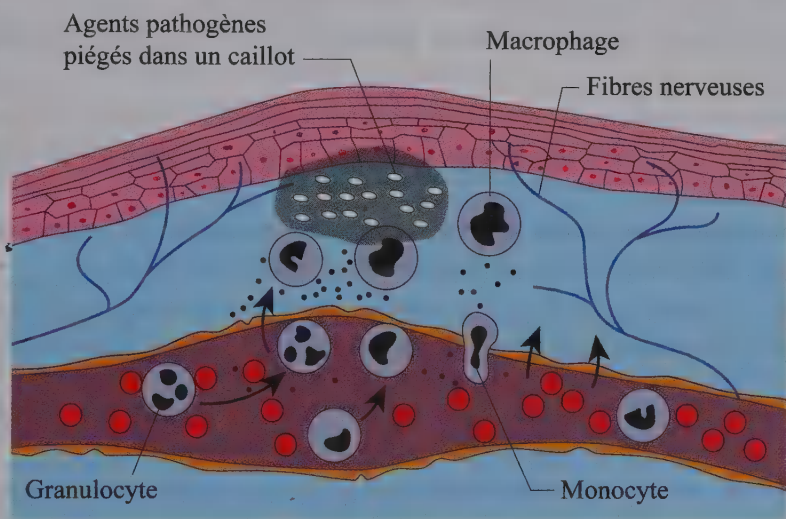


Figure 12.10 – Conséquences de la libération de médiateurs chimiques dans un tissu

A partir de l'exploitation du document ci-dessus, indiquez si les affirmations suivantes sont exactes ou fausses, en justifiant vos réponses.

Le document montre :

- a) Le retour des phagocytes à l'intérieur d'un vaisseau sanguin. **F**
- b) Un œdème dû à une accumulation de sang dans le tissu lésé. **VF**
- c) Le passage des différentes catégories de leucocytes en dehors du vaisseau sanguin. **✓**
- d) La vasoconstriction à l'origine de la rougeur. **F**
- e) La sortie des phagocytes hors du vaisseau sanguin, attirés par des substances chimiques libérées par les bactéries. **F**
- f) L'accumulation locale du plasma, sous le tissu lésé, ce qui est à l'origine de l'œdème. **✓**
- g) Un œdème qui va comprimer les terminaisons nerveuses empêchant la sensation douloureuse. **F**

Lycée Pablo Picasso, Fontenay sous Bois

On sait que les greffes de tissus ne sont possibles que si le donneur et le receveur sont compatibles. On cherche à préciser les mécanismes immunitaires impliqués dans le rejet d'une greffe de peau chez la souris. Exploitez l'ensemble des résultats expérimentaux proposés dans le document afin de montrer qu'ils sont en accord avec l'hypothèse selon laquelle le rejet de greffe chez une souris repose sur des mécanismes d'immunité adaptative impliquant des effecteurs cellulaires.

Document

Des greffes de peau ont été réalisées chez des souris de lignée pure (homozygotes pour tous leurs gènes) appelées lignées A et B. On observe que :

- un greffon de peau issu d'une souris de lignée B, implanté à une souris de lignée B, est toujours accepté ;
- un greffon de peau issu d'une souris de lignée A, implanté à une souris de lignée B est parfaitement fonctionnel 6 jours après la greffe, mais totalement détruit au bout de 11 jours ;
- une souris de lignée B ayant précédemment rejeté un premier greffon issu d'une souris A, rejette un deuxième greffon de souris de lignée A en 6 jours.

Des souris de lignée B sont dites « hyper immunisées » lorsqu'on leur a greffé à trois reprises, à trois semaines d'intervalle, de la peau de souris de lignée A. Les chercheurs prélèvent alors chez ces souris d'une part leur sérum et d'autre part des cellules lymphoïdes dans les ganglions lymphatiques situés près du greffon. Des souris de lignée B sont dites « neuves » (notées BN) si elles n'ont subi aucun traitement.

Expérience 1 : des souris de lignée BN reçoivent le sérum des souris de lignée B hyper immunisées, puis, 3 jours plus tard, une greffe de peau de souris de lignée A. Onze jours plus tard, le greffon est rejeté, alors qu'il était entièrement fonctionnel jusqu'au 6^{ème} jour.

Expérience 2 : d'autres souris BN reçoivent des injections au jour 1, une greffe de peau issue d'une souris A au jour 3. L'état du greffon est observé au jour 6. Les résultats sont les suivants :

Injection au jour 1	Grefe au jour 3	Résultat au jour 6
Des cellules lymphoïdes vivantes de souris de lignée B hyper immunisées	Peau de souris de lignée A	La majorité des greffons sont détruits ou présentent des nécroses partielles
Des cellules lymphoïdes tuées de souris de lignée B hyper immunisées	Peau de souris de lignée A	Les greffons sont toujours fonctionnels
Des cellules lymphoïdes vivantes de souris de lignée B non immunisées	Peau de souris de lignée A	Les greffons sont toujours fonctionnels

6 Processus immunitaires – Grippe



15 min

corrigé
p. 258

Lycée du Canada, Evreux

À partir des trois documents fournis, expliquez les mécanismes impliqués dans la lutte contre le virus de la grippe.

Document A :

La souris, comme l'Homme, est spontanément capable de lutter contre le virus de la grippe. Cette réaction de l'organisme est facilitée par le vaccin antigrippal obtenu à partir du virus inactivé.

	Souris non vaccinées infectées par le virus grippal	Résultats obtenus après quelques jours
Cas A	Souris nées sans thymus	Prolifération des virus
Cas B	Souris nées sans thymus ayant reçu des injections de sérum de souris vaccinées	Les virus ne disparaissent pas de l'organisme mais cessent de se multiplier
Cas C	Souris dépourvues de lymphocytes B	Disparition des virus

Tableau 12.1 – Résultat de l'infection de souris par le virus de la grippe

Document B :

Des lymphocytes du sang d'une personne vaccinée contre le virus de la grippe depuis un mois environ sont mis en présence de cellules humaines infectées par le virus grippal et provenant de deux individus différents, X et Y. La personne X a un CMH compatible (de structure proche de la personne vaccinée) et la personne Y un CMH non compatible avec la personne vaccinée. On constate que les cellules de X sont détruites. Les cellules de Y ne sont pas détruites.

Document C :

La cytotoxicité de certains lymphocytes (L) est un phénomène qui s'exprime au contact de la cellule infectée (C) par un virus, ou de la cellule étrangère lors d'une greffe.

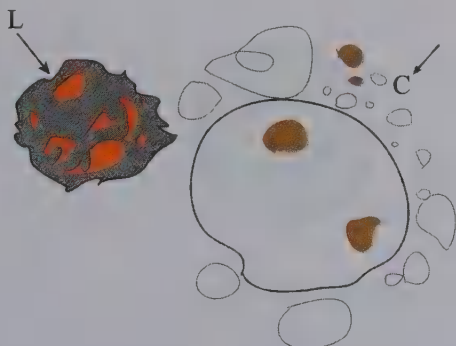


Figure 12.11 – Lyse d'une cellule (C) par un lymphocyte T (L) (observation au microscope électronique)

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

7 Processus immunitaires – effecteurs ★

10 min

 corrigé
p. 259

Lycée Evariste Galois, Sartrouville

La figure ci-dessous représente une électronographie de deux cellules humaines, un lymphocyte et une cellule infectée dans une culture *in vitro*.

Indiquez quel type de lymphocyte est photographié et expliquez le phénomène mis en évidence par ces photographies.

Photo A

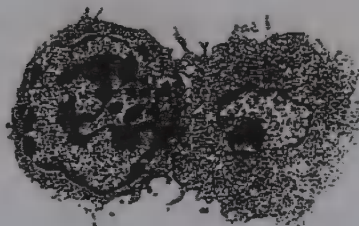


Photo B

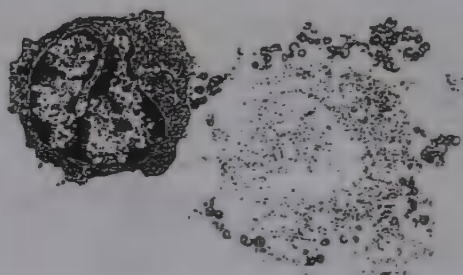


Figure 12.12 – Observation au microscope électronique d'un lymphocyte et d'une cellule infectée par un virus à une heure d'intervalle (A avant B)

8 Processus immunitaires – effecteurs ★★

20 min

 corrigé
p. 260

Lycée Jeanne d'Arc, Nancy

Le schéma ci-dessous résume le protocole et les résultats d'une expérience.

Interprétez les résultats de cette expérience. Complétez avec vos connaissances.

Voir la figure page suivante.

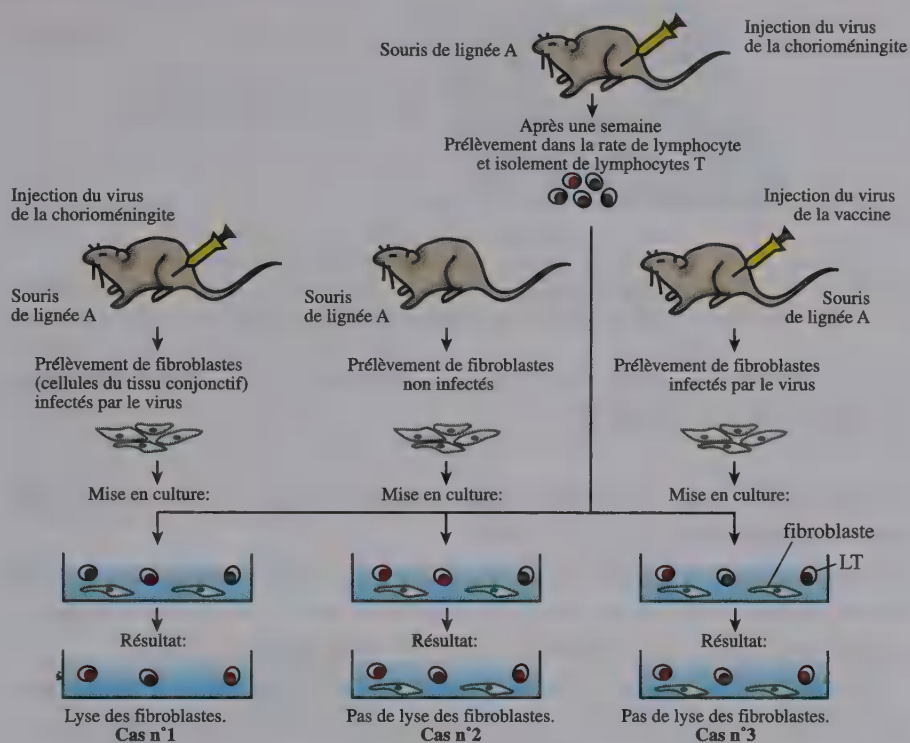


Figure 12.13 – Protocole et résultats d'une expérience de lyse de fibroblastes

9 Processus immunitaires – effecteurs

★★★

30 min

corrigé p. 260

Lycée Hoche, Versailles

Expliquez à l'aide des documents expérimentaux fournis et de vos connaissances, les mécanismes intervenant dans la lutte contre le virus de l'hépatite B.

L'hépatite B est due à un virus qui s'introduit dans les cellules du foie. Les malades montrent une nécrose du foie, par lyse des cellules hépatiques.

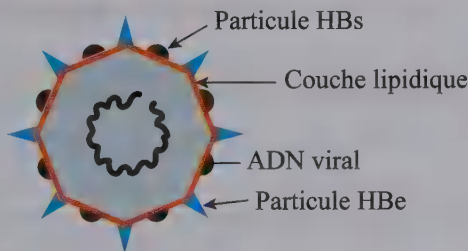


Figure 12.14 – Document A : virus de l'hépatite B

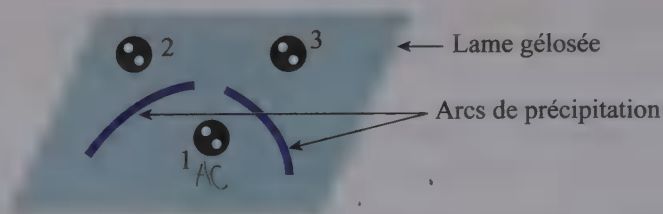


Figure 12.15 – Document B : arcs de précipitation après diffusion des molécules (puits 1 : gamma-globulines d'un malade ; puits 2 : solution avec particules virales HBs ; puits 3 : solution avec particules virales HBe)

Les gammaglobulines peuvent être obtenues à partir du sérum d'un individu immunisé par le virus de l'hépatite B

Document C

On injecte à une souris des globules rouges de mouton puis au bout de trois jours, on extrait les lymphocytes à partir de sa rate.

Les lymphocytes B et lymphocytes T isolés sont mis en culture séparément dans une chambre de Marbrook pendant trois jours supplémentaires. Plusieurs expériences sont réalisées avec différentes combinaisons cellulaires entre les deux chambres.

Le milieu de culture est alors filtré et le surnageant recueilli est mis en contact avec des globules rouges de mouton. La présence d'anticorps dirigés contre les globules rouges de mouton se manifeste par une agglutination de ces derniers (formation de complexes immuns)

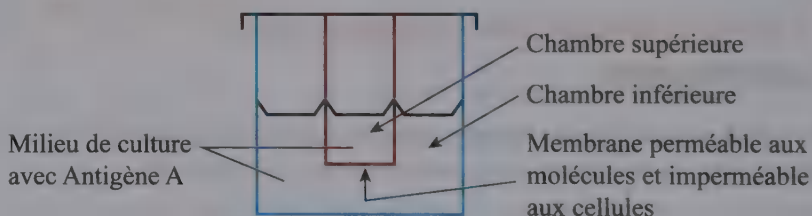


Figure 12.16 – Dispositif expérimental

	Expérience 1	Expérience 2	Expérience 3	Expérience 4
Lymphocytes placés dans la chambre supérieure	aucun	aucun	aucun	B
Lymphocytes placés dans la chambre inférieure	B	T	B et T	T
Agglutination	+	-	+++	+++

Tableau 12.2 – Résultats des expériences en chambre de Marbrook

Document D

On prélève :

- chez un individu malade des macrophages (M1)
- chez son vrai jumeau, non atteint, des macrophages (M2), des lymphocytes B (LB), des lymphocytes T (LT).

On réalise, avec ces cellules, des cultures dans lesquelles on recherche la présence de plasmocytes, cellules sécrétrices de gamma-globulines.

	Ajouts	Plasmocytes
Culture 1	LB + M1	Aucun
Culture 2	LT + M1	Aucun
Culture 3	LB + LT	Aucun
Culture 4	LB + LT + M1	Nombreux
Culture 5	LB + LT + M2	Aucun

Tableau 12.3 – Résultats des cultures cellulaires

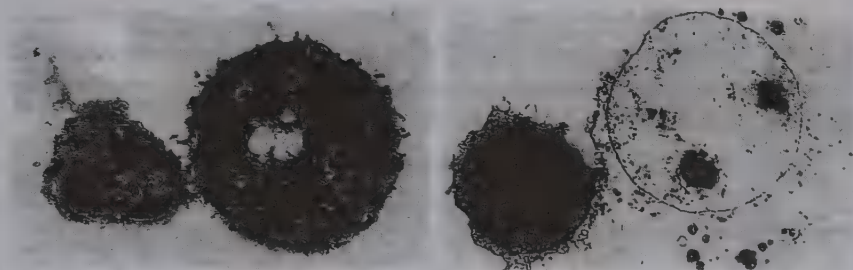
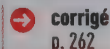


Figure 12.17 – Document E : observation du contact entre un lymphocyte T cytotoxique et une cellule infectée à deux moments successifs

10 Processus immunitaires – LT4



Lycée de Kléber, Strasbourg

On prélève les lymphocytes d'un singe. On sépare les différentes populations lymphocytaires : LB, LT4 et LT8.

On place des LB dans des chambres de culture au fond desquelles se trouvent des molécules d'antigène X. Seuls 0,01 % des LB restent fixés au fond de la chambre et ne sont pas éliminés par rinçage (chambre 1a). Puis on ajoute différents types cellulaires (1b et 1c).

On place des LT8 dans des chambres de culture au fond desquelles se trouvent des fibroblastes cancéreux de Singe. Seuls 0,01 % des LT8 restent fixés au fond de la chambre et ne sont pas éliminés par rinçage (chambre 2a). Puis on ajoute les LT4 activés (*ayant été en contact avec leur antigène) (chambre 2b).

Chambre	1a	1b	1c	2a	2b
Lymphocytes mis dans la chambre	LB retenus par l'anti-gène X	LB retenus par l'anti-gène X + LT4 activés*	LB retenus par l'anti-gène X + LT8 activés*	LT8 retenus par des fibroblastes cancéreux de singe	T8 retenus par des fibroblastes cancéreux de singe + LT4 activés*
Résultat	Aucun anti-corps dans la chambre	Présence d'anticorps dans la chambre	Aucun anti-corps dans la chambre	Aucune lyse des fibroblastes	Lyse des fibroblastes cancéreux

Tableau 12.4 – Protocole et résultats d'une expérience concernant les lymphocytes

Exploitez les résultats afin de montrer l'importance des LT4 dans la réponse immunitaire.

11 Processus immunitaires – Effecteurs

★★★

20 min

corrigé p. 262

Lycée Guy Nollet, Arras

Dans la rate d'une souris qui n'est pas immunisée contre les antigènes Ag1, Ag2 et Ag3, on effectue un prélèvement pour extraire plusieurs millions de lymphocytes. On prélève donc sans distinction les LB, les LT4 et les LT8.

Ces lymphocytes sont placés sur un milieu contenant de nombreuses molécules d'un antigène Ag1, fixées sur gélatine. Environ 0,01 % des lymphocytes se fixent sur ce milieu. Les autres sont éliminés par rinçage.

Les lymphocytes retenus sont cultivés individuellement, en présence d'interleukine, dans des microchambres où sont introduites des molécules d'antigènes Ag1, Ag2, ou Ag3, respectivement dans les microchambres de culture 1, 2 et 3.

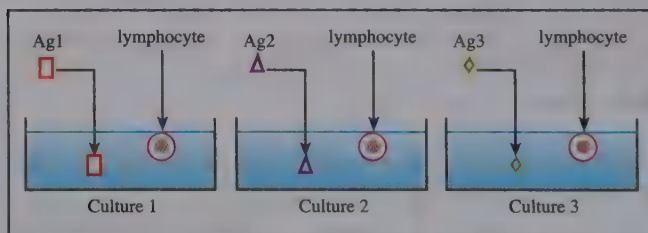
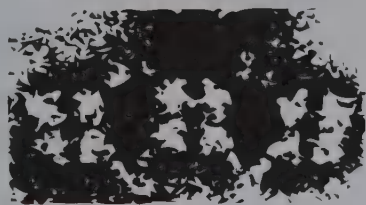


Figure 12.18 – Les trois types de culture en microchambre

Cultures	1	2	3
Résultats	Très nombreuses cellules	Aucun changement	Aucun changement

tableau 12.5 – Résultats des cultures

1. Quel type de lymphocyte représente les 0,01 % de lymphocytes qui se fixent au milieu contenant les molécules de l'Ag1. Justifiez votre réponse.
2. Expliquez pourquoi on ajoute des molécules d'interleukine dans les milieux de culture contenant les lymphocytes.
3. Expliquez les résultats obtenus dans les trois cultures.
4. Pour un test complémentaire, un prélèvement est effectué dans la microchambre 1. Après filtration, le liquide est mis en présence de molécules de l'antigène Ag1 et on l'observe en microscopie électronique à transmission.



50 nm



une molécule
de l'antigène
Ag1

*Figure 12.19 – Observation
au microscope électronique
de figures présentes après
ajout d'antigène Ag1*

1 QCM Vérification des connaissances→ énoncé
p. 246

- **a** La réponse inflammatoire existe chez quasiment tous les groupes animaux, dont les vertébrés. Elle persiste quand la réponse adaptative apparaît. Il n'y a aucune odeur particulière.
- **b** Les médicaments anti-inflammatoires agissent sur la fièvre et la douleur mais pas sur les agents pathogènes eux-mêmes. Leurs effets secondaires possibles comme les saignements digestifs interdisent leur prise par certaines personnes.
- **c** L'histamine est un médiateur chimique de l'inflammation. Elle est produite par les mastocytes.

2 Vérification des connaissances→ énoncé
p. 246

- Le virus de la grippe possède à sa surface des antigènes (et non des anticorps), qui sélectionnent les cellules immunitaires spécifiques par liaison avec les récepteurs de ces cellules.
- Les lymphocytes T4 (sans les macrophages et les plasmocytes) sélectionnés par le contact avec des cellules présentant à leur surface des antigènes (et non directement le virus) subissent des divisions cellulaires et une différenciation.
- Les anticorps circulants se lient à l'antigène (et non les uns aux autres) par leur partie variable (et pas constante) et forment un complexe immun.
- Les LTc provoquent la lyse (et non phagocytent) des cellules infectées par le virus de la grippe en sécrétant de la perforine, ce qui permet la destruction de celles-ci.
- Les LT4, en sécrétant de l'interleukine, sont indispensables à la phase de l'amplification clonale (et non de la sélection clonale).

3 Vérification des connaissances→ énoncé
p. 246

- Lors d'une inflammation des substances libérées par les mastocytes, comme l'histamine, provoquent la vasodilatation : les vaisseaux de la zone lésée ou infectée se dilatent, ce qui permet un afflux de sang plus important. Le sang apporte de la chaleur, et par sa couleur, rend la zone rouge.
- Les acteurs sont : les lymphocytes B sélectionnés par la liaison avec un antigène ; les plasmocytes, cellules effectrices issues de la différenciation des LB et sécrétant les anticorps circulants ; les lymphocytes T4, qui après sélection et expansion clonale sécrètent l'interleukine indispensable à l'amplification clonale des LB.
- Les macrophages interviennent à deux niveaux :

- ils phagocytent l'agent pathogène et présentent à leur surface des antigènes de cet agent associés à une molécule du CMH. Cet ensemble antigène-CMH sélectionne les lymphocytes T4 qui lui sont spécifiques.
- ils phagocytent les complexes immuns et les débris de cellules lysées qui apparaissent au cours de la phase effectrice de la réponse adaptative.

4 Réaction inflammatoire

➔ énoncé
p. 247

Lycée Notre Dame du Grand Champ, Versailles

- Faux : les phagocytes présents sur le schéma sont en train de sortir du vaisseau sanguin.
- Faux : ce n'est pas du sang qui s'accumule dans le tissu lésé, c'est du plasma. Les hématies ne quittent pas les vaisseaux sanguins.
- Vrai : on observe la sortie des monocytes qui se différencient en macrophages et la sortie des granulocytes.
- Faux : ici, il y a vasodilatation, et c'est bien ce phénomène qui est à l'origine de la rougeur observée.
- Faux : la sortie des phagocytes est due à la présence de médiateurs chimiques de l'inflammation, mais ces substances sont sécrétées par les cellules sentinelles.
- Vrai : la présence de plasma fait gonfler la zone lésée, ce qui correspond à l'œdème.
- Faux : les terminaisons nerveuses présentes dans la peau sont stimulées par certains médiateurs chimiques de l'inflammation comme les prostaglandines. Il y a donc une sensation de douleur.

5 Immunité à médiation cellulaire

➔ énoncé
p. 248

Lycée Pablo Picasso, Fontenay sous Bois

On apprend dans le document qu'un greffon de peau issu d'une souris de la même lignée que la souris receveuse est toujours accepté alors qu'un greffon issu d'une souris d'une autre lignée est rejeté. La différence entre les lignées est d'ordre génétique. Cela signifie que des protéines codées par certains gènes ou des molécules synthétisées grâce aux enzymes des souris sont différentes entre les deux lignées. Ces molécules présentes dans et sur les cellules de peau sont reconnues par le système immunitaire.

L'utilisation de souris ayant reçu plusieurs greffes successives de peau provoque une réaction de rejet plus rapide, montrant que les éléments du système immunitaire responsables de la destruction des cellules étrangères sont présents plus rapidement.

Dans l'expérience 1, le rejet de greffe des souris de lignée B a lieu comme dans le cas témoin des souris B n'ayant pas reçu de sérum de souris hyper immunisées. Cela montre que le sérum de ces souris n'a aucun effet sur le processus de destruction du

greffon. On sait que le sérum ne contient que des molécules, des anticorps par exemple. Il n'y a donc pas d'intervention de ces molécules dans le processus étudié.

Dans l'expérience 2, les greffons sont détruits au bout de 6 jours, comme dans le cas des souris hyper immunisées lorsque les souris ont reçu une injection de cellules lymphoïdes vivantes. On a donc transféré les capacités de réponse des souris hyper immunisées en injectant des cellules des ganglions lymphatiques. Ce sont bien les cellules qui en sont responsables puisque la réponse des souris ayant reçu des cellules lymphoïdes mortes est identique à celle des souris BN.

Les cellules sont créées à la suite de la présence de cellules de peau étrangère dans l'organisme : en effet, on observe que les cellules de souris non immunisées n'ont pas d'effet sur le rejet de greffe.

On comprend donc de ces résultats que la présence de peau étrangère provoque la présence dans les ganglions lymphatiques proches du greffon de cellules permettant de détruire les cellules de peau. Celles-ci se forment en réponse à la présence d'éléments étrangers et elles agissent en détruisant les cellules de peau. Il s'agit donc bien d'effecteurs cellulaires.

Remarque : ces effecteurs sont les lymphocytes T cytotoxiques spécifiques des antigènes de cellules de peau de lignée A.

6 Processus immunitaires – Grippe

Lycée du Canada, Evreux

énoncé
p. 249

- Le document A montre l'importance du thymus dans la lutte contre le virus de la grippe. En effet, des souris sans thymus (cas A) laissent proliférer le virus dans leur organisme. Par contre des souris dépourvues de lymphocytes B (cas C) sont capables de se défendre contre le virus. Cela montre que les LB n'interviennent pas ou peu dans l'élimination du virus de la grippe. On sait que le thymus est le lieu de maturation des lymphocytes T. On conclut donc de cette première comparaison que les lymphocytes T sont responsables de l'élimination du virus. Le cas B nous apprend que le sérum de souris vaccinées empêche le virus de se multiplier sans l'éliminer. On sait que le sérum contient des anticorps et que ces effecteurs agissent en se liant aux agents pathogènes libres. On comprend donc que la liaison des anticorps au virus empêche celui-ci de se multiplier, mais ne suffit pas à le détruire.
- Le document B montrent que les lymphocytes de la personne vaccinée détruisent les cellules de la personne X seulement. Cette sélectivité est liée à la nature du CMH : compatible ou non compatible. Cela montre que la destruction des cellules infectées par le virus de la grippe nécessite la présence de molécules membranaires en plus des antigènes viraux : les lymphocytes produits par la personne vaccinée en réponse au vaccin grippal se lient aux cellules infectées au niveau des antigènes du virus et des molécules du CMH. S'il manque l'une des deux molécules, la reconnaissance n'a pas lieu et les cellules ne sont pas détruites (personne Y).

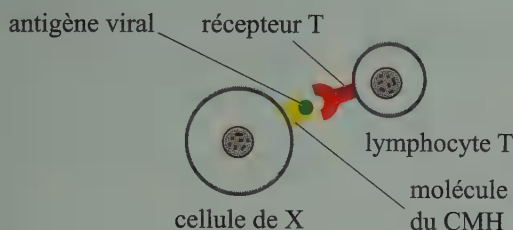


Figure 12.20 – Reconnaissance par un lymphocyte T d'une cellule infectée par un virus

- Le schéma (document C) représente la lyse d'une cellule infectée : lorsqu'un lymphocyte T cytotoxique reconnaît une cellule infectée présentant son antigène grâce à une molécule du CMH, il détruit cette cellule et empêche ainsi la multiplication virale.
- Finalement, la destruction du virus de la grippe se déroule en plusieurs étapes : elle nécessite une reconnaissance par liaison spécifique entre les récepteurs des lymphocytes T et les antigènes viraux présentés par le CMH, puis le lymphocyte provoque la destruction de la cellule (le mécanisme ne peut être précisé par ces seuls documents).

7 Processus immunitaires – effecteurs

→ énoncé p. 250

Lycée Evariste Galois, Sartrouville

On observe un lymphocyte situé à gauche sur les deux photographies. Cette cellule est ronde et possède un gros noyau par rapport à son cytoplasme : ceci est une caractéristique des lymphocytes. D'autre part cette cellule est en contact avec une autre cellule humaine, ce qui signifie que c'est un lymphocyte T. Le lymphocyte T est en contact avec une cellule infectée qui est ensuite détruite : son noyau et son cytoplasme paraissent très clairs, la chromatine dense qui apparaissait noire dans le noyau n'est plus visible. La membrane plasmique n'est plus distinguable. Le LT est donc cytotoxique.

La cellule infectée (cellule de droite sur les deux photos) est reconnue sur la photo A et une heure plus tard, nous la retrouvons sur la photo B en cours de lyse cellulaire. La reconnaissance d'antigènes de surface de la cellule infectée par le LTc provoque l'exocytose de molécules de perforine par le LTc. Ces molécules s'intègrent dans la membrane plasmique de la cellule infectée pour former des canaux. Les canaux permettent l'entrée d'eau et la lyse de la cellule. Le phénomène mis en évidence par ces photographies est un phénomène de l'immunité adaptative qui permet le maintien de l'intégrité des populations cellulaires.

8 Processus immunitaires – effecteurs

→ énoncé
p. 250

Lycée Jeanne d'Arc, Nancy

MÉTHODE

L'énoncé demande d'interpréter les résultats et seulement de compléter avec des connaissances : il faut donc partir des résultats et en tirer le maximum d'informations. Les connaissances à apporter ne doivent être données qu'ensuite et à petite dose.

- Cas n°1 : les lymphocytes prélevés chez la première souris après injection du virus de la chorioméningite, sont ensuite mis en présence de fibroblastes infectés par ce même virus, prélevés chez une seconde souris. On observe une lyse des fibroblastes infectés. On en déduit que les lymphocytes prélevés chez la première souris ont permis la lyse des fibroblastes.
- Cas n°2 : lorsque les LT prélevés chez la première souris sont mis en présence de fibroblastes non infectés, il n'y a pas de lyse de ces fibroblastes. Cela signifie que les fibroblastes ne présentant pas à leur surface des antigènes viraux ne sont donc pas la cible des LT. Par comparaison des cas 1 et 2, on voit que les LT sont capables de reconnaître les cellules qui présentent des antigènes à leur surface de celles qui n'en présentent pas et leur action est la lyse des cellules infectées.
- Cas n°3 : lorsque les LT prélevés chez la première souris sont mis en présence de fibroblastes infectés par un autre virus (virus de la vaccine), les fibroblastes ne sont pas lysés. Cela montre que les LT formés après l'infection de la 1ère souris par le virus de la chorioméningite sont spécifiques des antigènes de ce virus et n'agissent pas sur des cellules présentant d'autres antigènes.
- Pour conclure, on voit, par ces résultats, que les LT sont capables de détruire des cellules infectées par un agent pathogène. Cette destruction est spécifique de l'antigène qui les a préalablement sélectionnés. On sait que ces LT sont des LT cytotoxiques issus de l'amplification et de la différenciation clonales des LT8 sélectionnés par contact avec le virus de la chorioméningite.

9 Processus immunitaires – effecteurs

→ énoncé
p. 251

Lycée Hoche, Versailles

MÉTHODE

On dispose ici d'un nombre important de documents qui présentent des résultats expérimentaux. Il est indispensable d'interpréter chaque résultat expérimental avant de se lancer dans la rédaction de la réponse.

Une présence d'anticorps spécifiques du virus de l'hépatite B

La présence de gamma-globulines d'un malade dans le puits d'une lame gélosée provoque la formation d'arcs de précipitation à mi-chemin avec les puits contenant des particules virales HBs ou HBe (doc. B). On sait que ces arcs correspondent à des complexes immuns formés par la liaison de nombreuses molécules d'anticorps (gamma-globulines) et de l'antigène dont ils sont spécifiques. D'après le document A, les particules HBe et HBs sont des éléments présents dans la couche lipidique du virus. On en conclut que l'infection d'une personne par le virus de l'hépatite B est à l'origine de la présence d'anticorps spécifiques d'antigènes viraux. Ces anticorps peuvent agglutiner des particules virales.

Remarque : il manque un témoin non atteint pour être certain que les anticorps ne sont présents que chez les personnes infectées par le virus.

Des anticorps produits en présence de plusieurs types cellulaires

Les conditions nécessaires à la production d'anticorps sont étudiées dans les documents C et D. La chambre de Marbrook permet de mettre en présence plusieurs types cellulaires, soit directement, soit de part et d'autre d'une membrane. Elle permet de définir les types cellulaires nécessaires à la production d'anticorps et le mode d'action, par contact direct ou par envoi de molécules des types cellulaires. En effet, on observe dans le document C que les globules rouges de mouton sont agglutinés uniquement quand des lymphocytes B sont présents. Ce sont donc des cellules indispensables à la production d'anticorps anti-globules de mouton (GRM). Même seuls, les lymphocytes B permettent la production d'une faible quantité d'anticorps. On en conclut que les lymphocytes B sont les cellules productrices d'anticorps. D'après nos connaissances on sait que ce sont des cellules issues de la différenciation des lymphocytes B, les plasmocytes, qui produisent les anticorps.

Comme la production des anticorps est beaucoup plus importante en présence de lymphocytes T, on en déduit que les lymphocytes T ont une action stimulatrice sur la différenciation ou la production d'anticorps par les lymphocytes B. L'action des lymphocytes B est également présente quand les deux catégories de cellules sont séparées par une membrane perméable seulement aux molécules. On en conclut que les lymphocytes T n'ont pas besoin d'entrer en contact avec les lymphocytes B pour exercer leur action stimulatrice : cette action passe par l'envoi de molécules. D'après nos connaissances, on sait que ces molécules sont des interleukines.

Le document D étudie l'intervention d'un autre type cellulaire, les macrophages, dans la réponse immunitaire contre le virus de l'hépatite B. La mise en présence de cellules « naïves », c'est-à-dire des cellules immunitaires n'ayant jamais été en contact avec le virus (celles du jumeau non atteint) avec des macrophages du malade permet l'apparition de nombreux plasmocytes dans la culture 4. Cependant, l'absence d'un des trois types cellulaires empêche la différenciation des plasmocytes, de même que le remplacement des macrophages par ceux du jumeau non atteint. On comprend de ces résultats que les lymphocytes B se différencient en plasmocytes à condition d'être

stimulés par d'autres cellules : les lymphocytes T et les macrophages. Il suffit que les macrophages aient été en contact avec le virus pour que la formation de plasmocytes se produise. Les macrophages sont donc les initiateurs de cette réponse immunitaire. Il faut qu'ils aient été en contact avec le virus (cultures 4/5) pour que la réponse ait lieu.

On en conclut que les macrophages ont un rôle de déclencheur de la réponse immunitaire à médiation humorale (production d'anticorps). Ils exercent ce rôle sur les lymphocytes T, qui eux-mêmes stimulent les lymphocytes. On sait d'après nos connaissances que les macrophages sont des phagocytes qui présentent des antigènes à leur surface. Ces antigènes présentés se lient aux récepteurs T des lymphocytes T, ce qui déclenche l'amplification et la différenciation clonale des lymphocytes T. Les lymphocytes T CD4 naïfs du jumeau sain deviennent ainsi des producteurs d'interleukine.

10 Processus immunitaires – LT4

→ énoncé
p. 253

Lycée de Kléber, Strasbourg

Les 0,01 % de LB qui se fixent dans la chambre sont spécifiques de l'antigène X ; ils se fixent à cet antigène grâce à leurs anticorps. Il s'agit donc de lymphocytes sélectionnés.

On observe la présence d'anticorps dans les chambres contenant des LB que lorsque ceux-ci sont mis en présence de LT4 activés. Cela signifie que la présence de ces cellules est indispensable à l'amplification clonale des LB sélectionnés. Leur action n'est pas remplacée par les LT8 activés. Après amplification et différenciation clonale, on sait que le LB se différencie en plasmocyte sécréteur d'anticorps.

Les 0,01 % de LT8 qui se fixent dans la chambre sont spécifiques des fibroblastes de singe cancéreux ; ils se fixent à un antigène de la surface de cette cellule grâce à leurs récepteurs T. Il s'agit donc de lymphocytes sélectionnés.

On observe la lyse de cellules cancéreuses que lorsque les LT8 sélectionnés sont mis en présence de LT4 activés. Ceux-ci sont donc indispensables à l'amplification clonale des LT8 sélectionnés. En effet, on sait que la lyse est permise par la présence de LT cytotoxiques, qui se forment après différenciation de LT8 sélectionnés.

On peut donc dire que les LT4 activés par contact avec l'antigène dont ils sont spécifiques sont indispensables à la formation des effecteurs de la réponse immunitaire. Sans eux, les lymphocytes sélectionnés ne peuvent pas subir d'amplification clonale. Cette expérience montre que les LT4 activés sont les chefs d'orchestre de la réponse immunitaire acquise.

11 Processus immunitaires – Effecteurs

→ énoncé
p. 254

Lycée Guy Nolllet, Arras

1. Les lymphocytes prélevés dans la rate sont à la fois des LB, des LT4 et des LT8.

- L'Ag1 est présent dans la culture sous forme libre, non présenté par une cellule. Les seuls lymphocytes qui reconnaissent les antigènes libres sont les LB. Les LT4 et les LT8 reconnaissent les antigènes lorsque ceux-ci sont présentés en surface cellulaire par une molécule du CMH. Parmi les LB, ceux qui se fixent sur le milieu doivent obligatoirement posséder des anticorps membranaires dirigés contre la molécule d'Ag1 : ce sont des LB spécifiques de Ag1.
- On sait que les lymphocytes sélectionnés par contact avec un antigène nécessitent des interleukines pour subir une amplification clonale. Ces interleukines, sont, in vivo sécrétées par les LT4 sélectionnés ; étant donné l'absence de telles cellules dans les milieux de cultures 1, 2 et 3 (donc in vitro), on rajoute des interleukines.
 - Les lymphocytes présents dans les trois cultures sont des LB spécifiques de l'antigène Ag1. On observe que seule la culture 1 montre de très nombreuses cellules. Les LB anti-Ag1, mis en présence de l'Ag1, duquel ils sont spécifiques, et d'interleukines, ont donc seuls subi une amplification et différenciation clonale. Les LB anti-Ag1 mis en présence d'interleukine et d'Ag2, ou d'Ag3 ne subissent pas d'amplification clonale. On en déduit que deux signaux sont simultanément nécessaires pour provoquer une expansion clonale. Le premier signal est la liaison anticorps membranaire-antigène : cette liaison ne s'effectue que dans le cas où l'anticorps est spécifique de l'antigène ; le second signal est représenté par les interleukines. Le premier signal manque dans les cultures 2 et 3 puisque les LB anti-Ag1 ne sont pas spécifiques des Ag2 ou Ag3.
 - La photo au MET a été prise à très forte grossissement. Au vu de l'échelle, nous pouvons tout de suite déduire que nous ne voyons pas des cellules (les cellules eucaryotes ayant des dimensions de l'ordre de 10 μm), mais des molécules. L'Ag 1 possède une forme carrée dans laquelle un motif de base est répété 4 fois. Nous observons sur la photo de MET que ces Ag1 sont reliés les uns aux autres par des sortes de ponts. Or le liquide testé provient de la filtration du milieu de culture des LB anti-Ag1 qui ont subi une amplification et une différenciation clonale. Ces cellules se sont donc multipliées et différenciées en plasmocytes sécréteurs d'anticorps de même spécificité que les anticorps membranaires du LB initial. On en conclut que les molécules qui forment des « ponts » entre les molécules d'antigènes sont des anticorps. Les figures observées sont des complexes immuns.

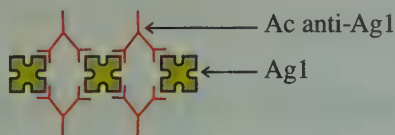


Figure 12.21 – Schéma d'interprétation de l'électronographie

Le phénotype immunitaire au cours de la vie

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Chronologie d'apparition des réponses immunitaires innée et adaptative
3. Production continue de lymphocytes naïfs tout au long de la vie
4. Production de lymphocytes mémoire en fonction de l'environnement

1 Introduction

Le phénotype immunitaire est l'ensemble des cellules et molécules du système immunitaire d'un individu à un instant donné. Il paraît évident qu'en fonction du moment de la vie, ce phénotype change : en effet, une infection conduit à la formation de nouvelles cellules et molécules au cours de la réponse adaptative (cf. chap.14).

2 PROBLÉMATIQUE

Quels sont les éléments à l'origine de l'évolution du phénotype immunitaire d'un individu au cours de sa vie ?

2 Chronologie d'apparition des réponses immunitaires innée et adaptative

Durant la grossesse, il y a transmission par le placenta d'anticorps maternels au fœtus. Le fœtus ne produit pas de cellules ou molécules de l'immunité adaptative. Le nouveau-né possède uniquement ces anticorps pendant les premiers mois de sa vie. Ils forment l'immunité passive. Quelques mois après la naissance, l'organisme se met à produire ses propres cellules et molécules. Ils forment l'immunité active.

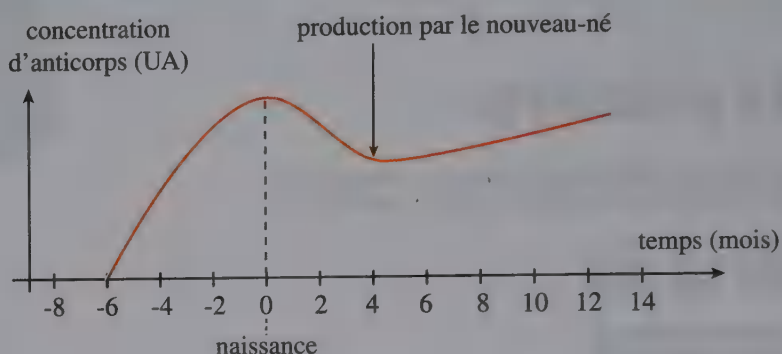


Figure 13.1 – Evolution de la concentration d'anticorps circulants chez un fœtus et un nouveau-né

? PROBLÉMATIQUE

Comment l'organisme est-il capable de reconnaître n'importe quel agent pathogène ou cellule cancéreuse alors même que cette reconnaissance est d'une grande spécificité ?

3 Production continue de lymphocytes naïfs tout au long de la vie

3.1 Origine de la diversité des lymphocytes

Contrairement aux autres cellules somatiques du corps, les lymphocytes n'ont pas un génome identique à la cellule-œuf de départ. En effet, il se produit au cours de leur formation dans la moelle osseuse des réarrangements des fragments de gènes codant pour les chaînes polypeptidiques des récepteurs T et des anticorps. Les gènes ont donc une séquence nucléotidique nouvelle et unique.

Chaque chaîne polypeptidique comporte une partie constante et une partie variable. La partie constante est codée par un fragment de gène appelé C. La partie variable est issue de la mise bout à bout de deux ou trois fragments de gènes « choisis » parmi une multitude de fragments. Les autres fragments de gènes sont éliminés.

Ces mécanismes génétiques créent une infinie diversité de récepteurs T et d'anticorps et permettent que chaque antigène soit reconnu. Les lymphocytes qui ne se lient pas à leur antigène vivent quelques jours seulement et sont remplacés par d'autres. Ainsi, à deux instants de la vie de l'individu, le répertoire immunologique diffère.

3.2 Apprentissage des lymphocytes

La création aléatoire de gènes codant pour les chaînes des récepteurs a également pour

conséquence la présence de lymphocytes capables de se lier aux cellules de l'organisme lui-même. Dans la moelle osseuse pour les LB et dans le thymus pour les LT, il se produit un phénomène d'apprentissage : les lymphocytes qui se lient à des molécules de l'organisme (clones autoréactifs) sont éliminés. On note également l'existence d'une tolérance aux symbiotes (les organismes vivant en association avec un autre).

Les conséquences pour l'organisme peuvent être très graves si les cellules immunitaires se mettent à détruire ses propres cellules. Une maladie auto-immune se développe : la sclérose en plaques est un exemple d'une telle maladie dans laquelle les cellules immunitaires détruisent la gaine de myéline autour des neurones, ralentissant voire supprimant la transmission des messages nerveux aux muscles.

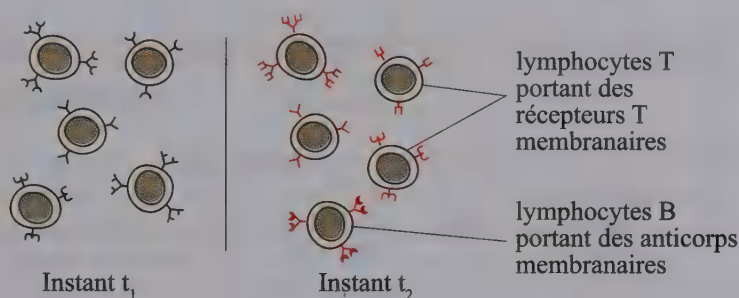


Figure 13.2 – Pool de lymphocytes à deux instants de la vie d'un individu

À RETENIR

Tout au long de la vie, la production de lymphocytes dans la moelle osseuse et leur maturation dans le thymus ou la moelle osseuse conduit à la présence d'un pool de lymphocytes capables de reconnaître n'importe quel antigène sans entrer en action contre les cellules de l'organisme lui-même ou ses symbiotes. Cela est rendu possible grâce à un mécanisme génétique particulier de réarrangement de gènes et à un apprentissage.

PROBLÉMATIQUE

Quel est le rôle de l'environnement dans l'évolution du phénotype immunitaire ?

Production de lymphocytes mémoire en fonction de l'environnement

4.1 Réponses immunitaires primaire et secondaire

Parmi les lymphocytes produits, très peu se lieront à l'antigène dont ils sont spéci-

fiques. Seuls ceux qui sont sélectionnés par les antigènes des cellules cancéreuses ou des pathogènes présents subsistent sous la forme de cellules effectrices durant quelques jours et de cellules mémoire durant plusieurs années.

Les lymphocytes T et B mémoire sont identifiables car ils portent un marqueur membranaire particulier appelé CD44. Ils sont plus nombreux que les lymphocytes qui leur ont donné naissance. Cela permet que la deuxième réponse immunitaire au même agent pathogène soit plus importante quantitativement et plus rapide, contrairement à la réponse primaire.

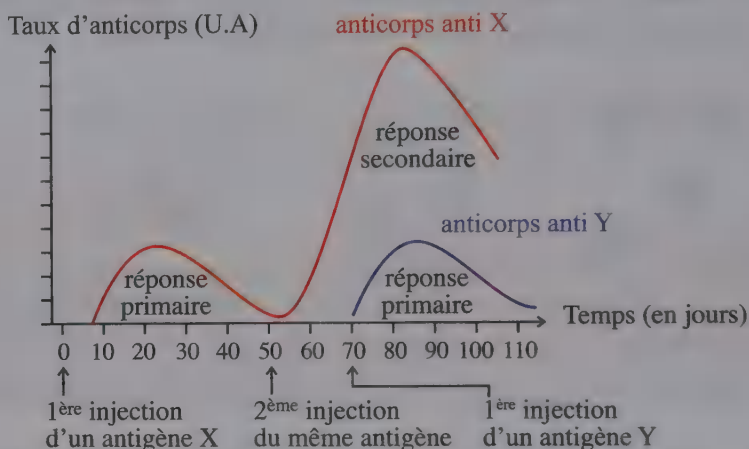


Figure 13.3 – Caractéristique des réponses immunitaires primaire et secondaire

4.2 Vaccination et cellules mémoire

Les vaccins reproduisent une situation naturelle, celle de l'immunité acquise contre un agent pathogène après une première infection guérie. Ils contiennent un agent pathogène modifié (rendu non virulent) ou des protéines de cet agent pathogène capables de déclencher une réponse immunitaire. Le pouvoir immunogène du vaccin est amplifié par la présence systématique d'un adjuvant : il s'agit d'une molécule comme les sels d'aluminium qui déclenche la réponse innée et permet donc la réponse adaptative.

En cas de contact postérieur avec l'agent pathogène virulent, la réponse immunitaire sera de type secondaire, donc rapide et plus efficace, ce qui permettra de détruire cet agent. De cette façon, l'organisme est protégé par la vaccination et le phénotype immunitaire évolue en fonction des vaccins reçus.

À RETENIR

La formation de cellules mémoire lors d'une réponse immunitaire adaptative confère à l'organisme une protection ultérieure contre l'agent pathogène en cause. Cette caractéristique est utilisée par l'Homme lors de la vaccination.

1 Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 274

Répondez brièvement aux questions suivantes :

- 1 Pourquoi les nouveaux-nés possèdent-ils des anticorps alors qu'ils n'en fabriquent pas ?
- 2 Comment peut-on expliquer les caractéristiques différentes des réponses primaires et secondaires après l'injection d'un antigène ?
- 3 En quoi l'injection de fragments de l'agent pathogène peut-elle protéger l'organisme lors d'une infection ultérieure par ce même agent pathogène ?

2 Evolution du phénotype immunitaire

★★

15 min

→ corrigé
p. 274

Lycée des Loges, Evry

Madame Y, séropositive pour le VIH, a eu deux enfants dont la séropositivité a été suivie depuis la naissance (J0) puis pendant 18 mois. Analysez l'évolution des Western Blots des deux enfants et déterminez s'ils sont infectés par le VIH.

Résultats des
Western Blot

	témoins		mère:	enfant 1					
	T+	T-	Mme Y	0	1 m	3 m	6 m	9 m	18 m
GP160	+	-	+	+	+	+	+	+	+
GP120	+	-	+	+	+	+	+	+	+
GP41	+	-	+	+	+	+	+	+	+
GP24	+	-	+	+	+	+	+	+	+

	témoins		mère:	enfant 2					
	T+	T-	Mme Y	0	3 m	6 m	9 m	12 m	18 m
GP160	+	-	+	+	+	+	+	+	+
GP120	+	-	+	+	+	+	+	+	+
GP41	+	-	+	+	+	+	+	+	+
GP24	+	-	+	+	+	+	+	+	+

Figure 13.4 – Résultats de tests Western Blot chez les enfants 1 et 2 à différentes dates après leur naissance

3 Mémoire immunitaire

★★

20 min

→ corrigé
p. 275

Lycée Duruy, Paris

On se propose d'identifier les acteurs intervenant dans certaines réactions immunitaires après introduction de GRM (globules rouges de mouton) dans l'organisme

d'une souris saine, renouvelée 15 jours plus tard.

Des observations histologiques plus précises, faites au niveau de la rate des animaux ayant reçu des GRM, révèlent la présence de deux sortes de cellules immunitaires :

- cellules de type lymphocyte peu nombreuses ;
- cellules de type plasmocyte très nombreuses.

Des observations microscopiques réalisées chez ces mêmes animaux montrent dans leur sang la présence de complexes immuns (anticorps anti-GRM/GRM). A l'aide des documents proposés et en vous appuyant sur vos connaissances, expliquez les différentes caractéristiques de la réponse immunitaire mise en évidence.

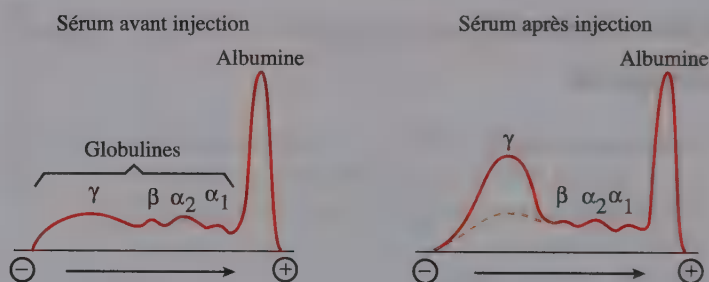


Figure 13.5 – Document A : nature et quantité des protéines du sérum de souris avant et après injection de GRM

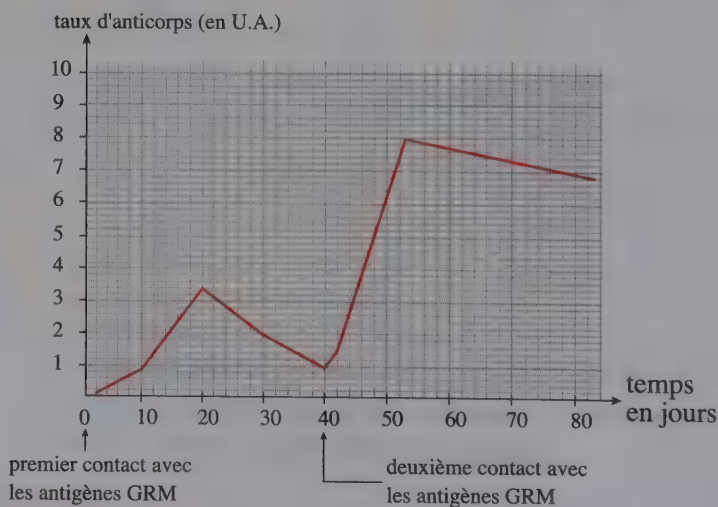
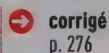


Figure 13.6 – Document B : résultats du dosage des anticorps circulants anti-GRM dans le sérum de souris au cours du temps

4 Mémoire immunitaire



Lycée Hoche, Versailles

Laure, étudiante en biologie, souhaite comprendre comment les connaissances en immunologie peuvent permettre d'élaborer un vaccin contre certains cancers, selon les recherches récentes.

En vous appuyant sur vos connaissances, expliquez-lui comment un tel vaccin peut être produit, tout en discutant des résultats obtenus et de leur pertinence.

Document

L'utilisation d'antigènes de cellules tumorales est une des voies d'exploration dans la mise au point de « vaccins » anti-tumoraux. On s'intéresse à la protéine TRP2 exprimée dans les cellules des mélanomes (cellules tumorales de la peau).

On injecte à des souris un ADN témoin ou un ADN codant pour TRP2. Au bout de trois semaines, on injecte ensuite sous la peau de ces souris des cellules de mélanome puis on évalue sur trois mois le taux de survie de ces souris (1^{ère} figure).

Les expériences précédentes sont répétées sur des souris immunodéficientes ne possédant pas de lymphocytes T CD4 ou T CD8 (2^{ème} figure).

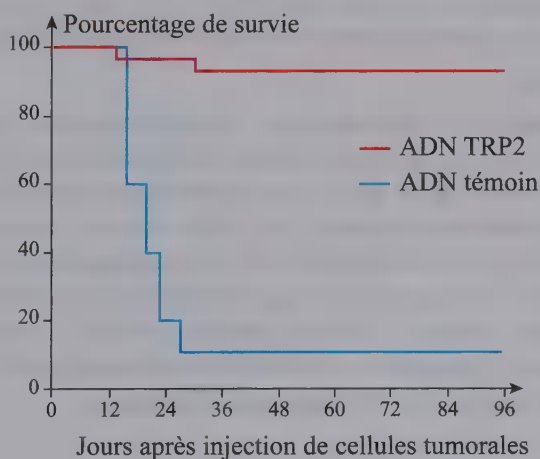


Figure 13.7 – Taux de survie de souris immunisées par TRP2

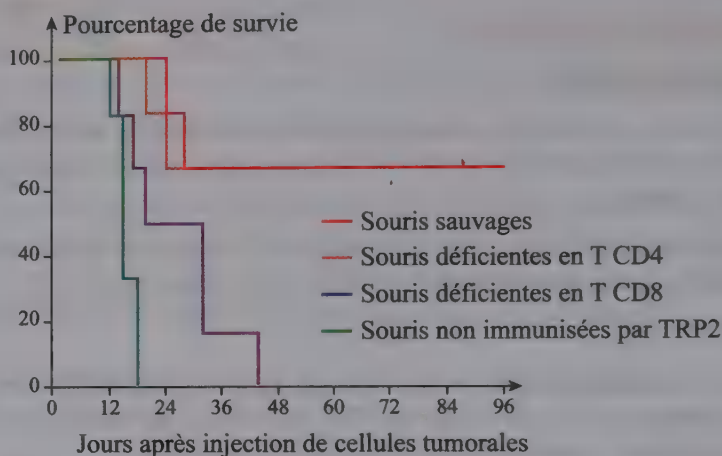


Figure 13.8 – Taux de survie de souris déficientes en certains processus immunitaires

5

Mémoire et phénotype immunitaires

★★

20 min

corrigé
p. 276

Lycée Paul Doumer, Le Perreux/Marne

Extrayez du document les informations qui révèlent l'existence d'une mémoire immunitaire et celles qui montrent la différence entre immunité passive et immunité active.

Document : le tétanos

Le tétanos est une maladie extrêmement grave qui entraîne des contractions atteignant l'ensemble de la musculature en quelques jours. Cette maladie est due à une bactérie qui végète dans le sol à l'état de spores et qui pénètre dans l'organisme par une plaie mal soignée. Les contractions sont dues à l'action d'une toxine qui agit sur les centres nerveux. Chez une personne susceptible d'avoir été contaminée suite à une blessure, le médecin procède à une injection de sérum antitétanique (contenant des anticorps spécifiques humains), couplée d'anatoxine tétanique (vaccin). L'anatoxine tétanique est la toxine tétanique à laquelle on a fait subir un traitement qui lui fait perdre son caractère pathogène, mais lui garde son caractère antigénique.

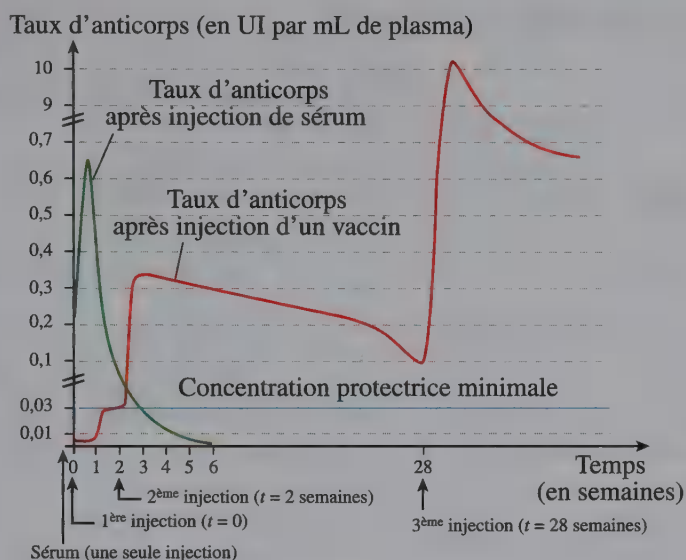


Figure 13.9 – Evolution du taux d'anticorps d'une personne au cours du temps après injection de sérum antitétanique et d'un vaccin



Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 269

- 1 Les nouveaux-nés bénéficient de la transmission in utero d'anticorps maternels : ces molécules franchissent le placenta.
- 2 La réponse immunitaire secondaire est plus rapide et plus importante quantitativement à cause de la présence de cellules-mémoire. En effet, la première injection d'un antigène a provoqué la création de lymphocytes B et T mémoire, qui sont des cellules à longue durée de vie plus nombreuses que les cellules avant le premier contact avec l'antigène.
- 3 La présence de fragments d'un agent pathogène ne déclenche pas de maladie puisque les fragments ne sont pas virulents. Ils déclenchent par contre une réponse immunitaire adaptative qui conduit à la création de lymphocytes mémoire ayant des récepteurs (anticorps membranaires ou récepteurs T selon leur catégorie) spécifiques de l'agent pathogène. Lors d'une infection ultérieure par le même agent pathogène, les cellules mémoire initieront une réponse immunitaire plus rapide et plus importante, conduisant à l'élimination de l'agent pathogène (sauf si celui-ci mute fréquemment par exemple).



2 Evolution du phénotype immunitaire

→ énoncé
p. 269

Lycée des Loges, Evry

Madame Y est séropositive pour le VIH, sa séropositivité est visible dans les résultats du Western Blot : elle possède dans son sérum des anticorps dirigés contre des protéines du VIH : des anticorps (Ac) anti-GP160, des Ac anti-GP120, des Ac anti-GP41 et des Ac anti-GP24. Le Western Blot de son premier enfant présente des bandes qui diminuent en nombre et ont toutes disparu à 9 mois : l'enfant ne possède donc plus d'anticorps anti-VIH à partir de cet âge. On sait que le fœtus ne produit pas ses propres anticorps et reçoit des anticorps maternels durant la grossesse (immunité passive). Par conséquent, les anticorps présents au début de sa vie sont ceux de sa mère qui est séropositive. Le Western Blot du second enfant présente des bandes à chaque âge : pas toutes les bandes entre 6 et 12 mois, mais ensuite, il a les quatre bandes qui correspondent aux quatre anticorps recherchés. Comme pour le 1er enfant, il a hérité d'anticorps anti-VIH de sa mère, ce qui explique les bandes dans les premiers mois de sa vie. Cependant, la réapparition d'anticorps anti-VIH après 6 mois montre que quand il fabrique ses propres anticorps, il y a des anticorps anti-VIH. L'enfant 2 est donc infecté par le VIH et les anticorps après 6 mois font partie de l'immunité active.

Voir figure page suivante.

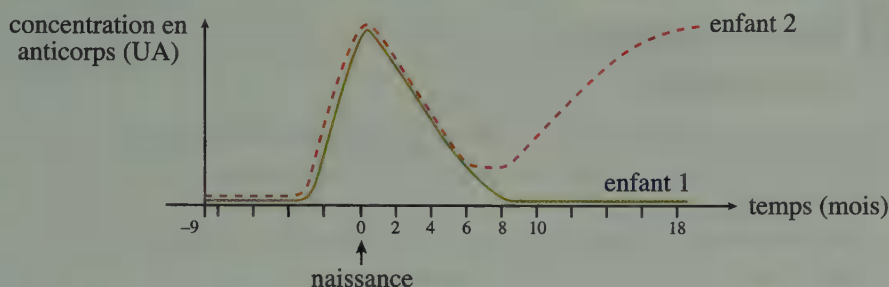


Figure 13.10 – Evolution du taux d'anticorps anti-VIH chez les deux enfants

3 Mémoire immunitaire

énoncé
p. 269

Lycée Duruy, Paris

- On observe dans le document A que le sérum de la Souris contient différents types de protéines : des globulines et de l'albumine. Après injection de GRM, la quantité de gamma globuline est plus importante. Cela signifie que la présence d'antigènes des GRM a provoqué une production plus importante de ces globulines.
- On observe dans le document B que 2 jours après contact avec les GRM le taux d'anticorps sériques augmente : il est maximal 20 jours après l'injection (3 UA), puis diminue. Cela montre que l'injection de GRM a permis l'apparition d'anticorps circulants. La seconde injection de GRM provoque une augmentation du taux d'anticorps bien plus importante et plus rapide que la première : l'augmentation a lieu immédiatement, elle est maximale 13 jours après l'injection et le taux d'anticorps est 2 fois supérieur à celui d'après la 1^{ère} injection. On note d'autre part la présence de nombreux plasmocytes dans la rate et de complexes immuns dans le sang.
- La présence d'une importante quantité d'anticorps dans le sérum peut être corrélée à celle des gamma globulines : les anticorps sont les gamma globulines. L'injection de GRM provoque la formation de nombreux plasmocytes. On sait que les plasmocytes sont des cellules sécrétrices d'anticorps. Ces anticorps sécrétés sont spécifiques des antigènes des GRM puisqu'ils forment avec eux des complexes immuns. Les complexes immuns sont des agrégats qui précipitent et neutralisent les GRM. Ils seront ensuite phagocytés par les macrophages. En même temps que la production de plasmocytes, on sait qu'il y a formation de LB mémoire à partir des LB sélectionnés par les GRM. Ces LB mémoire permettent une réponse immunitaire plus rapide et plus importante lors du second contact avec les GRM, d'où le taux d'anticorps plus important (document B).

4 Mémoire immunitaire

→ énoncé
p. 271

Lycée Hoche, Versailles

On observe sur la première figure présentant le taux de survie de souris en fonction du temps après injection de cellules tumorales que les souris ayant reçu au préalable de l'ADN codant pour TRP2 survivent quasiment toutes : il en reste 95% au bout de 96 jours. Au contraire, les souris ayant reçu de l'ADN témoin meurent rapidement : entre les jours 15 et 26, elles meurent passivement et il en reste 10% seulement. Elles ont donc été tuées par la prolifération des cellules tumorales. On comprend de ces résultats que l'ADN codant pour TRP2, une protéine exprimée par les cellules tumorales a déclenché une réponse immunitaire primaire. Cette réponse a permis dans un second temps que les souris détruisent les cellules tumorales de mélanome qui leur étaient injectées. Dans le cas des souris témoin, l'injection des cellules tumorales a déclenché une réponse primaire insuffisante pour les détruire.

La seconde figure présente le pourcentage de survie de souris après injection de cellules tumorales pour différentes souches de souris normales ou immunodéficientes. On observe que les souris déficientes en lymphocytes T CD8 ne survivent pas au-delà de 45 jours. Les souris sauvages et celles qui sont déficientes en lymphocytes T CD4 ont le même taux de survie : 65%. On comprend de ces résultats que la présence de lymphocytes T CD8 est indispensable à la destruction des cellules tumorales. Les LT CD4 ne paraissent pas indispensables.

On peut conclure de cette étude que l'injection d'ADN exprimé normalement dans les cellules tumorales déclenche une réponse primaire permettant la création de cellules mémoire : lymphocytes B et T mémoire. Lors de l'injection des cellules tumorales, il se met en place une réponse secondaire plus rapide et plus importante quantitativement grâce à la présence des cellules mémoire. Cette réponse permet l'élimination des cellules tumorales et la survie des souris. Elle nécessite la présence de lymphocytes T CD8 : on sait en effet que ce sont eux qui se différencient en lymphocytes T cytotoxiques éliminant les cellules anormales.

Cependant, on ne sait pas si les résultats obtenus sur la souris sont transposables à l'homme.

5 Mémoire et phénotype immunitaires

→ énoncé
p. 272

Lycée Paul Doumer, Le Perreux/Marne

- On observe que l'injection de sérum permet une présence importante et rapide d'anticorps anti-toxine : la personne est immédiatement au-dessus de la concentration protectrice minimale contre le tétanos. Le taux d'anticorps issus du sérum diminue rapidement : au bout de 3 semaines, la personne est sous la concentration protectrice minimale. En effet, les anticorps ont été éliminés. Ces anticorps ayant été acquis grâce à une injection, ils n'ont pas été produits par la personne : ils font partie de l'immunité passive.

- L'injection d'anatoxine tétanique provoque une augmentation du taux d'anticorps anti-toxine. Il faut 1 semaine pour voir apparaître ces anticorps après la 1^{ère} injection et le taux est en-dessous de la concentration protectrice minimale. La 2^{ème} injection provoque une production accrue et plus rapide d'anticorps : 0,35 UI/mL en quelques jours. La 3^{ème} injection provoque une réponse encore plus importante (10 UI/mL). Après les deux dernières injections, les taux d'anticorps diminuent mais en restant toujours au-dessus de la concentration protectrice minimale, et ceci pendant des semaines. La réponse engendrée par les injections fait partie de l'immunité active puisqu'il y a eu production d'effecteurs par l'organisme lui-même.
- La réponse liée à l'injection d'anatoxine est moins rapide (il faut 2 semaines pour dépasser la concentration protectrice minimale) que l'injection de sérum, mais elle est plus durable. Elle fait appel à la mémoire immunitaire puisque la production d'anticorps est plus rapide et plus importante quantitativement à chaque nouvelle injection : cela met en évidence l'existence de cellules mémoire formées après contact avec l'antigène.

Le réflexe myotatique : un exemple de commande du mouvement

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Le phénotype macroscopique associé au réflexe myotatique
3. Les phénotypes cellulaires associés au réflexe myotatique :
l'organisation des réseaux neuroniques
4. Les messages nerveux et leurs caractéristiques
5. Fonctionnement des synapses en relation avec la transmission des messages
nerveux

1 Introduction

Le terme de « réflexe » utilisé dans le langage courant a une réalité médicale et biologique. Il désigne la réponse musculaire non volontaire d'une partie de l'organisme à un stimulus. Un réflexe est reproductible à l'identique à partir d'un même stimulus et il est automatique. Le réflexe myotatique est utilisé par les médecins pour s'assurer de l'intégrité du système neuro-musculaire : provoqué par la percussion du tendon reliant un muscle à un os (par exemple sous la rotule ou au-dessus du talon), il consiste en un mouvement de la jambe ou du pied.

? PROBLÉMATIQUE

On cherche à expliquer au niveau macroscopique et microscopique les processus biologiques permettant l'existence du réflexe myotatique.

2 Le phénotype macroscopique associé au réflexe myotatique

2.1 Le mouvement associé au réflexe achilléen

Le réflexe myotatique que l'on choisit d'étudier est le réflexe achilléen. Sur le plan

comportemental, il se traduit par une extension du pied lorsqu'un choc est porté – à l'aide d'un marteau médical – au niveau du tendon d'Achille. Le tendon d'Achille est la zone d'attache du muscle du mollet (muscle soléaire) au squelette du pied.

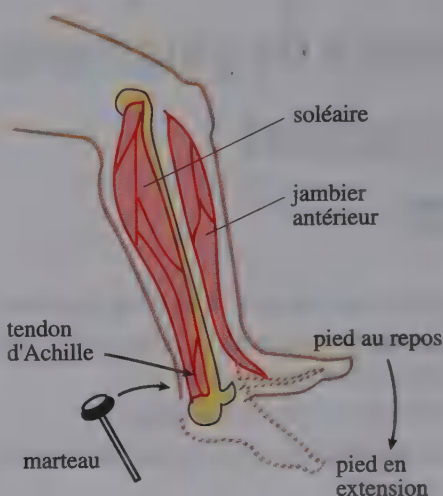


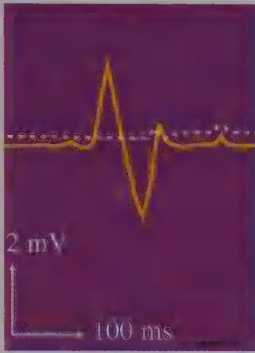
Figure 14.1 – Séquence d'événements caractérisant le réflexe achilléen

2.2 Les organes mis en jeu lors du réflexe achilléen

2.2.1 Les muscles mis en jeu

L'étude d'enregistrements électriques au niveau du muscle soléaire et d'un autre muscle de la jambe (le muscle jambier antérieur qui se trouve sur la face antérieure de la jambe) permet d'apprécier l'état dans lequel se trouve chacun de ces deux muscles au moment de la réalisation du réflexe achilléen. En effet, lorsqu'un muscle se contracte, les variations de potentiels qui se propagent à la surface des cellules qui le constituent (les fibres musculaires) créent des courants électriques qui se transmettent à la surface du corps et peuvent être captées au niveau de la peau par des électrodes réceptrices : on peut ainsi obtenir un tracé graphique appelé électromyogramme. Sans détailler la manifestation électrique de la contraction musculaire, on doit pouvoir l'utiliser comme témoin de l'activité musculaire.

Concrètement, les électromyogrammes obtenus font apparaître lors du réflexe myotatique une activité électrique du muscle soléaire et une absence d'activité électrique du jambier antérieur, ce qui révèle l'état contracté du soléaire et l'état relâché du jambier antérieur. Le muscle soléaire est donc l'organe effecteur du réflexe achilléen.



Légendes :

-  électromyogramme du muscle soléaire
-  électromyogramme du muscle jambier antérieur

Figure 14.2
Electromyogrammes
du muscle soléaire
et du muscle jambier
antérieur lors du réflexe
achilléen

Le stimulus appliqué est l'extension du soléaire – consécutive au choc porté sur le tendon. La réponse est la contraction du muscle soléaire. On arrive à l'idée que le réflexe achilléen est un réflexe de contraction du muscle soléaire en réponse à son propre étirement. La contraction du muscle soléaire déclenche l'extension du pied, c'est un muscle extenseur. Des fuseaux neuromusculaires situés directement dans le muscle jouent le rôle de capteurs sensibles à l'étirement.

2.2.2 Les autres structures anatomiques mises en jeu

L'étude d'anomalies ou de conséquences de lésions musculaires ou nerveuses ainsi que la réalisation d'expériences de section et stimulation du système nerveux permettent d'identifier les éléments intervenant lors du réflexe myotatique en dehors du muscle. La moelle épinière joue le rôle de centre nerveux. Des nerfs rachidiens conduisent les messages : le message nerveux afférent parvient à la moelle épinière par la racine dorsale du nerf rachidien tandis que le message nerveux efférent quitte la moelle épinière par la racine ventrale du nerf rachidien. Le message nerveux efférent aboutit au muscle étiré, qui en réponse, se contracte.

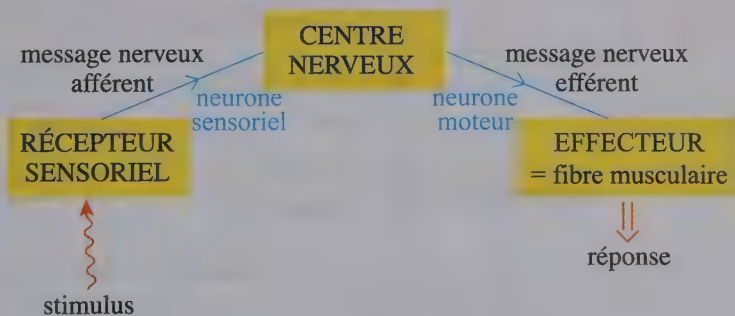


Figure 14.3 – Schéma de l'arc réflexe mis en jeu lors du réflexe myotatique

2.3 L'importance physiologique du réflexe achilléen

Le réflexe achilléen est, comme d'autres réflexes myotatiques, impliqué dans le maintien de la posture. En effet, la position du corps dans l'espace est soumise en perma-

nence à l'action des forces de la pesanteur qui tend à modifier la posture. Le maintien de la posture est assuré par le tonus musculaire, c'est-à-dire l'état permanent de contraction de certains muscles extenseurs. Des réflexes myotatiques se déroulent en permanence dans l'organisme, ils correspondent à la réponse de muscles étirés par l'action de la pesanteur et assurent le tonus musculaire indispensable à la réalisation du phénotype comportemental de posture.

Les phénotypes cellulaires associés au réflexe myotatique : l'organisation des réseaux neuroniques

3.1 Notion de réseau neuronique

Un neurone est une cellule nerveuse, constituée par un corps cellulaire qui contient le noyau, et par des prolongements cytoplasmiques de deux types : les dendrites et l'axone. Ces prolongements cytoplasmiques assurent la conduction du message, depuis l'extrémité des dendrites vers le corps cellulaire, ou bien depuis le corps cellulaire vers l'extrémité ramifiée de l'axone. La distinction entre axone et dendrite est liée au sens de circulation du message. De plus, pour de nombreux types de neurones, les dendrites sont des prolongements cytoplasmiques généralement nombreux et relativement courts alors que l'axone correspond au plus long prolongement cytoplasmique.

La transmission du message nerveux d'un neurone au suivant se fait au niveau de structures appelées synapses. Un ensemble de neurones interconnectés par des synapses constitue un réseau neuronique.

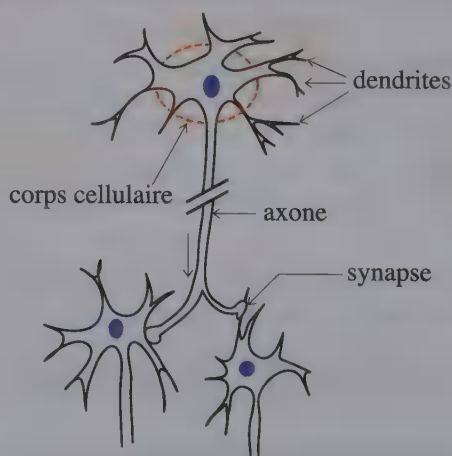


Figure 14.4 – Représentation d'un réseau de neurones

3.2 Le circuit neuronique assurant la contraction du muscle extenseur

La contraction du muscle extenseur lors du réflexe myotatique repose sur différentes populations de neurones :

- des neurones afférents ou neurones en T, dont les corps cellulaires sont dans les ganglions des racines dorsales, et dont les extrémités sont en relation avec les fuseaux neuromusculaires. Les fuseaux neuromusculaires sont sensibles à l'étirement du muscle, ils élaborent un message nerveux afférent conduit par les neurones afférents jusqu'à la substance grise de la moelle épinière.
- les motoneurones du muscle étiré, dont les corps cellulaires se trouvent dans la substance grise de la moelle épinière et dont les axones aboutissent aux fibres musculaires effectrices. Les motoneurones élaborent et conduisent un message nerveux efférent dirigé vers les fibres musculaires composant le muscle, ce qui commande la contraction des fibres musculaires. On appelle unité motrice l'ensemble de toutes les fibres musculaires innervées par un même motoneurone. Le message nerveux est transmis aux fibres musculaires au niveau de synapses neuro-musculaires.

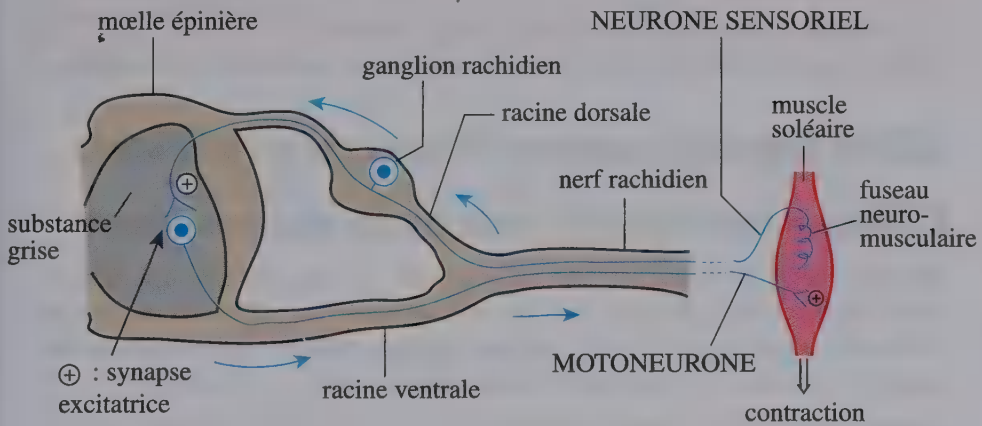


Figure 14.5 – Circuit neuronique assurant la contraction du muscle extenseur lors du réflexe achilléen

L'ensemble « neurone afférent – motoneurone du muscle étiré » constitue un circuit monosynaptique (ce circuit comporte deux neurones et une seule synapse) excitateur (la synapse connectant le neurone afférent et le motoneurone est excitatrice : le fonctionnement de cette synapse a pour effet la stimulation du motoneurone). Le fonctionnement du circuit monosynaptique excitateur assure la contraction du muscle soléaire.

➔ À RETENIR

Le phénotype macroscopique du réflexe myotatique repose sur le fonctionnement d'un muscle extenseur : l'étirement de ce muscle (le stimulus) aboutit à sa contraction (réponse). Il est donc l'organe effecteur. La réalisation du réflexe est assurée grâce à des messages nerveux circulant dans des nerfs et ayant un relais dans la moelle épinière.

Le phénotype cellulaire permettant la réalisation du réflexe myotatique est caractérisé par différents neurones organisés en un circuit. La contraction du muscle extenseur est assurée par une chaîne de deux neurones formant un circuit monosynaptique excitateur. Lors du réflexe achilléen des messages nerveux circulent depuis les fuseaux neuromusculaires jusqu'aux fibres musculaires effectrices, en passant par la moelle épinière.

Voir exercices 1, 4, 5, 6.

❓ PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les caractéristiques de ces messages nerveux ?

Les messages nerveux et leurs caractéristiques

4.1 Support anatomique de la conduction des messages nerveux

Dans les conditions physiologiques, les messages nerveux prennent naissance au niveau de récepteurs sensoriels (cas des messages nerveux afférents) ou bien au niveau des centres nerveux (cas des messages nerveux efférents). A l'échelle macroscopique, les messages nerveux sont conduits par des nerfs.

Un nerf correspond à un ensemble de fibres nerveuses juxtaposées. Une fibre nerveuse est un long prolongement cytoplasmique d'un neurone, éventuellement recouvert d'un revêtement discontinu : la gaine de myéline. A l'échelle cellulaire, les messages nerveux sont conduits par les fibres unitaires composant le nerf.

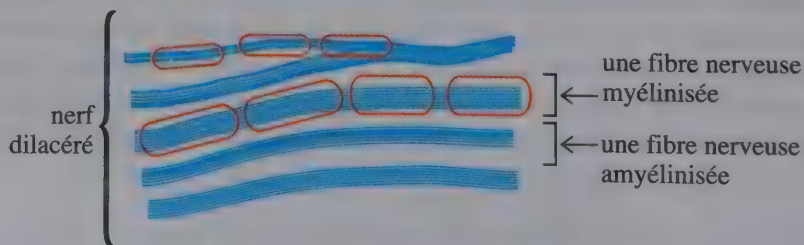


Figure 14.6 – Organisation d'un nerf dilacéré et représentation de différentes fibres nerveuses

Des expériences d'électrophysiologie pratiquées à différentes échelles (nerf ou fibre nerveuse unitaire) permettent de déterminer les caractéristiques du message nerveux.

4.2 Genèse et caractéristiques du message nerveux enregistré au niveau d'une fibre nerveuse

4.2.1 L'état de la fibre nerveuse en l'absence de stimulation

On peut apprécier l'état électrique d'une fibre nerveuse en utilisant un jeu de microélectrodes reliées à un oscilloscope. L'une des microélectrodes est déposée en surface de la fibre, l'autre microélectrode est intracellulaire. L'enregistrement obtenu fait apparaître une différence de potentiel de part et d'autre de la membrane plasmique. La membrane plasmique du neurone au repos est donc polarisée. Cette différence de potentiel entre le milieu extracellulaire et le cytoplasme s'appelle le potentiel de repos. Cela correspond à une inégale répartition des charges électriques de part et d'autre de la membrane plasmique : le cytoplasme de la fibre nerveuse est électronégatif par rapport à la face externe de la membrane plasmique. La valeur du potentiel de repos est voisine de -70 mV .

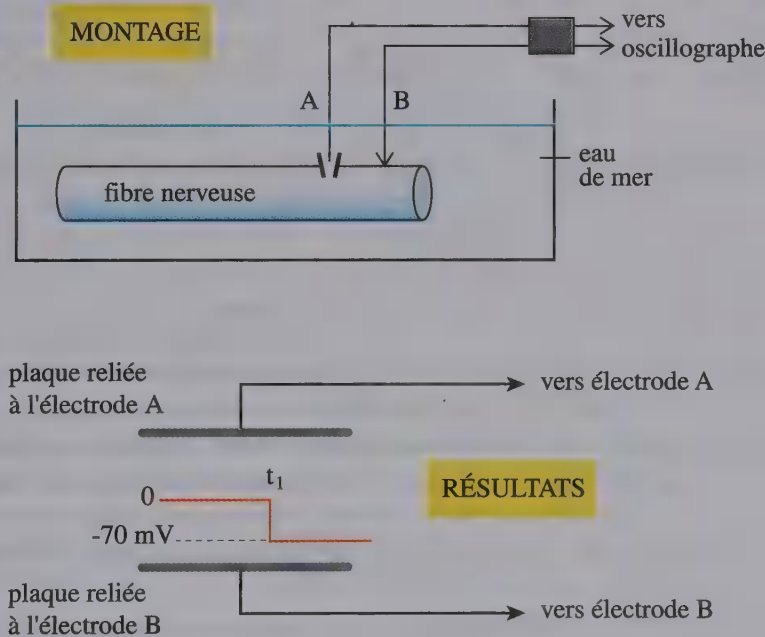


Figure 14.7 – Enregistrement du potentiel de repos : montage et résultat

4.2.2 La réponse de la fibre nerveuse à une stimulation expérimentale

On peut stimuler expérimentalement une fibre nerveuse en lui appliquant un choc électrique ou une stimulation mécanique. On peut enregistrer l'activité électrique de la fibre nerveuse en utilisant des microélectrodes d'enregistrement dont on décide de la position.

a) Réponse de la fibre nerveuse à proximité et à distance de la zone stimulée

Lorsqu'une fibre nerveuse est stimulée avec une intensité suffisante (stimulation supraliminale), on enregistre à proximité de la zone stimulée un signal caractérisé par une inversion brutale et transitoire de la polarité membranaire. Il s'agit d'un potentiel d'action. Toujours dans le cas d'une stimulation supraliminale, la réponse enregistrée à distance de la zone stimulée est un potentiel d'action strictement identique (même amplitude, même durée) à celui enregistré à proximité de la zone stimulée. Dans le cas où un potentiel d'action est obtenu, ses caractéristiques sont identiques quelle que soit l'intensité de la stimulation – pourvu qu'elle soit supraliminale – et quel que soit le lieu d'enregistrement.

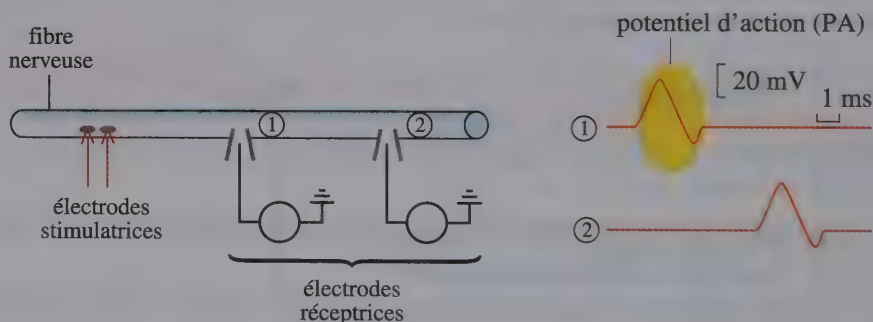


Figure 14.8 – Réponse de la fibre nerveuse à une stimulation expérimentale

La première conclusion est que le potentiel d'action est un signal électrique propageable qui prend naissance à la suite d'une stimulation efficace.

La deuxième conclusion est que le potentiel d'action obéit à la loi du tout ou rien : soit il n'existe pas, soit il existe et ses caractéristiques (amplitude et durée) sont d'emblée maximales. Ainsi, dans le cas du réflexe achilléen, un étirement d'intensité croissante provoque la création de potentiels d'action dans un nombre de fibres nerveuses de plus en plus important : ces fibres sont dites recrutées.

L'enregistrement détaillé d'un potentiel d'action (PA) permet d'en repérer les phases caractéristiques que l'on nomme par rapport à l'état polarisé initial de la membrane plasmique du neurone. Le PA comporte une dépolarisation, une inversion transitoire de polarisation suivie d'une repolarisation et d'une hyperpolarisation.

Voir figure page suivante.

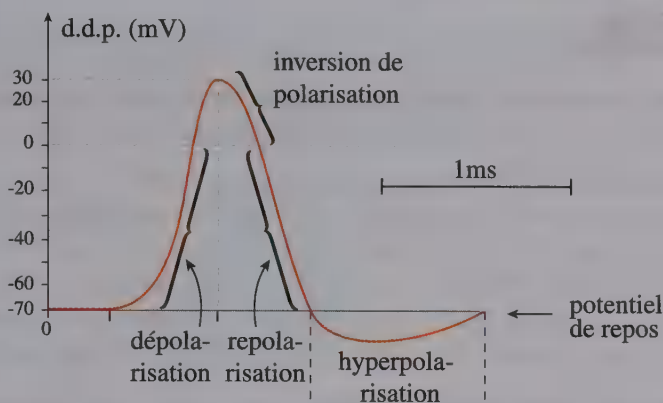


Figure 14.9 – Les phases caractéristiques d'un potentiel d'action

Le dispositif présenté dans la figure 14.8 permet également d'apprécier la vitesse de conduction du signal nerveux en tenant compte de la distance entre les deux séries d'électrodes d'enregistrement et du temps séparant l'arrivée d'un potentiel d'action au niveau de chaque série d'électrodes. Selon les fibres nerveuses, la vitesse de conduction que l'on obtient est comprise entre 1 m.s^{-1} et 120 m.s^{-1} . Ces variations dépendent de deux propriétés de la fibre nerveuse : les fibres de plus gros diamètre et les fibres myélinisées conduisent plus vite le potentiel d'action.

b) Réponse de la fibre nerveuse à différentes stimulations efficaces

Dans des conditions physiologiques, une stimulation efficace donne naissance à une salve de potentiels d'action, tous identiques entre eux. Les potentiels d'action obtenus pour différentes stimulations efficaces sont également identiques entre eux. Un potentiel d'action ne peut donc pas représenter l'information correspondant à l'intensité de la stimulation. L'application de stimulations d'intensité croissante permet de remarquer que plus la stimulation est intense, plus la fréquence des potentiels d'action est élevée. L'intensité de la stimulation est donc codée par la fréquence des potentiels d'action. Ainsi, des étirements du muscle soléaire d'intensité croissante sont codés au niveau des neurones en T par la fréquence des potentiels d'action le long des fibres nerveuses ainsi que par le nombre de fibres nerveuses recrutées.

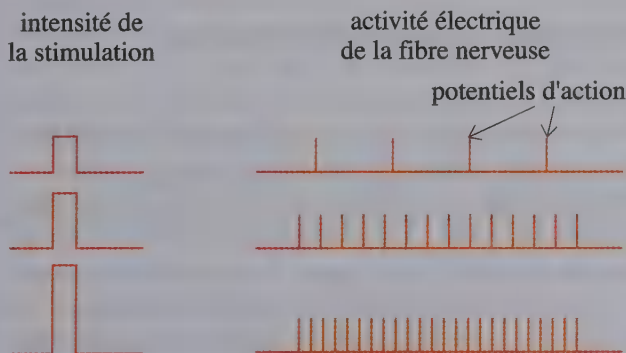


Figure 14.10 – Variation d'activité électrique d'une fibre nerveuse pour différentes intensités de stimulation

➔ À RETENIR

Les stimulations expérimentales pratiquées sur la fibre nerveuse permettent de saisir ce qui se passe dans les conditions physiologiques :

- Les neurones émettent – s'ils sont suffisamment stimulés – des signaux électriques élémentaires qui sont des potentiels d'action. La genèse de potentiels d'action repose sur l'existence d'un potentiel de repos caractérisé par une polarisation membranaire, propriété commune à toutes les cellules. Un potentiel d'action est une inversion transitoire de la polarisation membranaire. Au cours de sa propagation le long d'une fibre, le potentiel d'action conserve toutes ses caractéristiques.
- Les messages nerveux afférents ou efférents sont définis au niveau d'une fibre nerveuse comme des trains de potentiels d'action. Les potentiels d'action composant un message nerveux sont d'amplitude et de durée constante quelle que soit l'intensité de la stimulation. Les messages nerveux sont codés par la fréquence des potentiels d'action, traduisant ainsi l'intensité de la stimulation qui leur a donné naissance.

Voir exercices 2, 7, 8.

? PROBLÉMATIQUE

L'observation du circuit neuronique mis en jeu lors du réflexe myotatique montre que les synapses comportent un espace, interdisant donc la propagation électrique du message nerveux. Comment le message nerveux circule-t-il d'un neurone au suivant et du motoneurone aux fibres musculaires ? Comment le codage du message est-il traduit au niveau des synapses ?

5 Fonctionnement des synapses en relation avec la transmission des messages nerveux

5.1 Organisation d'une synapse : exemple de la synapse neuromusculaire

Une synapse neuromusculaire correspond à la jonction entre l'extrémité axonale d'un neurone moteur (appelé neurone présynaptique) et une fibre musculaire postsynaptique. Les membranes présynaptique et postsynaptique ne sont pas accolées mais séparées par un espace de dimension infime : l'espace synaptique (ou fente synaptique). La synapse est une structure orientée : on y trouve des vésicules synaptiques localisées uniquement dans l'élément présynaptique. Ces vésicules contiennent un grand nombre de molécules appelées neuromédiateurs ou neurotransmetteurs. Dans

le cas étudié, il s'agit d'acétylcholine. Des récepteurs spécifiques des neurotransmetteurs, de forme complémentaire, se trouvent au niveau de la membrane postsynaptique. La structure orientée de la synapse a pour conséquence la transmission du message nerveux dans un seul sens.

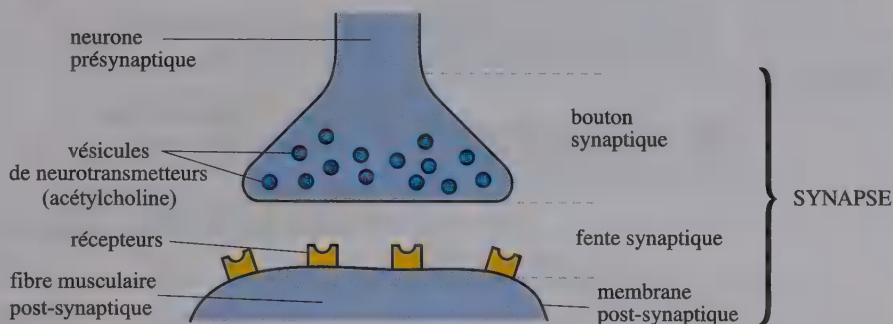


Figure 14.11 – Structure d'une synapse neuromusculaire

Le fonctionnement des synapses neuromusculaires permet la contraction des fibres musculaires reliées aux motoneurones.

5.2 Modalités du fonctionnement unitaire d'une synapse neuromusculaire

L'arrivée d'un potentiel d'action à l'extrémité du neurone présynaptique déclenche la migration des vésicules synaptiques et leur fusion avec la membrane présynaptique. Ce phénomène d'exocytose des vésicules synaptiques entraîne la vidange du contenu des vésicules synaptiques dans l'espace synaptique. Les molécules d'acétylcholine se fixent à leurs récepteurs complémentaires situés sur la membrane postsynaptique des fibres musculaires. La liaison neurotransmetteur-récepteur entraîne un changement d'activité des fibres musculaires : celles-ci sont parcourues par un potentiel d'action musculaire ayant des caractéristiques proches des potentiels d'action neuroniques. En réponse, elles se contractent.

Comme pour les potentiels d'action neuroniques, les potentiels d'action musculaires obéissent à la loi du tout ou rien. La fréquence des potentiels d'action neuroniques est traduite par la quantité d'acétylcholine libérée. La concentration du neurotransmetteur dans la fente synaptique détermine la création ou non de potentiels d'action musculaires ainsi que leur fréquence.

Remarque : par la suite, les molécules de neurotransmetteurs sont dégradées et leurs produits de dégradation sont recapturés par le neurone présynaptique.

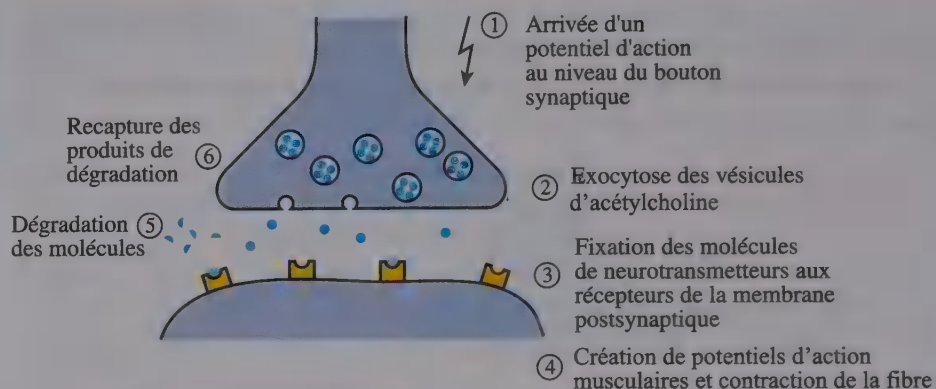


Figure 14.12 – Etapes du fonctionnement d'une synapse neuro-musculaire

➡ À RETENIR

Au niveau d'une synapse, le message nerveux de nature électrique, codé en fréquence de potentiels d'action, est traduit en un message nerveux chimique codé en concentration de neurotransmetteurs. La liaison entre l'acétylcholine et son récepteur sur la membrane des fibres musculaires est à l'origine des contractions de ces fibres, d'où la contraction du muscle.

Voir exercices 3, 9 à 14.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 305

Choisissez la seule réponse exacte :

- 1** Le réflexe myotatique :
 - ☐ a est important pour le maintien de la posture
 - ☐ b est un réflexe de flexion d'un muscle en réponse à son propre étirement
 - ☐ c est une réaction volontaire
- 2** Les circuits neuroniques impliqués dans le réflexe achilléen :
 - ☐ a font intervenir trois types de neurones
 - ☐ b assurent la contraction du muscle étiré
 - ☐ c comportent uniquement des motoneurones

2 V/F Vérification des connaissances

10 min

→ corrigé
p. 305

Répondez par vrai ou faux et justifiez votre choix :

- 1** Le message nerveux enregistré au niveau du nerf obéit à la loi du tout ou rien
 - ☐ a vrai
 - ☐ b faux
- 2** Lorsqu'une fibre nerveuse est stimulée, sa membrane est parcourue par un potentiel de repos
 - ☐ a vrai
 - ☐ b faux
- 3** Le potentiel d'action circule indifféremment dans les deux sens de la fibre nerveuse
 - ☐ a vrai
 - ☐ b faux
- 4** Un potentiel d'action qui se propage le long d'une fibre nerveuse peut être assimilé à une onde de dépolarisation
 - ☐ a vrai
 - ☐ b faux

3 V/F Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 305

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

- 1** Le message nerveux enregistré au niveau d'une fibre nerveuse afférente :
 - ☐ a est constitué de potentiels globaux tous identiques en amplitude et en durée
 - ☐ b rend compte de l'intensité de la stimulation par un codage en modulation d'amplitude
 - ☐ c circule d'un centre nerveux vers un organe effecteur
- 2** Une synapse neuro-neuronique :
 - ☐ a est une zone d'accolement entre les membranes de deux neurones différents

- b** ne peut pas, en fonctionnant une seule fois, générer un potentiel d'action postsynaptique
- c** fonctionne grâce à des hormones contenus dans des vésicules synaptiques

4 Moelle épinière – structure



10 min

→ corrigé
p. 306

Lycée Victor Hugo, Paris

- Donnez les légendes correspondant aux chiffres de l'image ci-après.
- 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 14.13 – Coupe transversale de moelle épinière

5 Réflexe myotatique



20 min

→ corrigé
p. 306

Institut Notre Dame, Meudon

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).

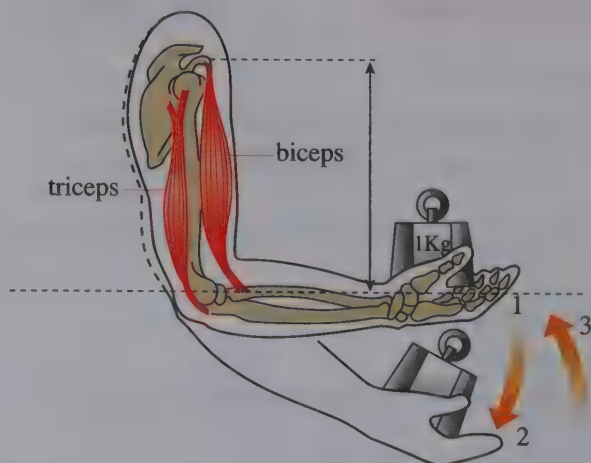


Figure 14.14 – Mouvements de l'avant-bras lors de l'application d'un poids

Décrivez les phénomènes qui permettent d'expliquer le mouvement de flexion dans ce réflexe.

6 Réflexe de fuite

★★★

30 min

→ corrigé
p. 307

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

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.

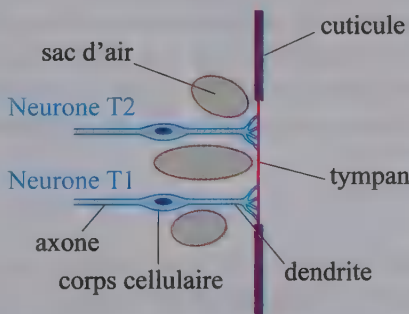


Figure 14.15 – Document A : structure d'un organe auditif de papillon

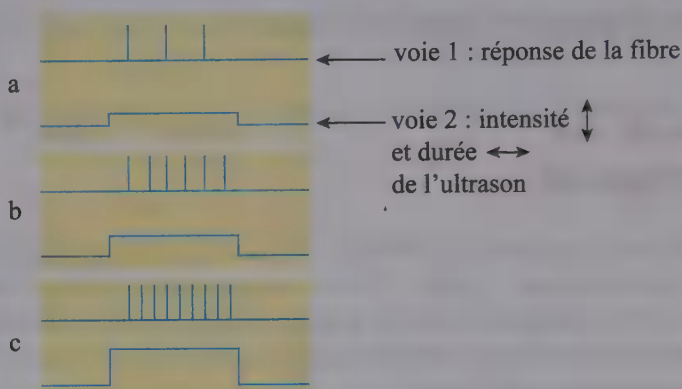


Figure 14.16 – Document B : messages nerveux parcourant la fibre nerveuse de T1 en réponse à des stimulations (ultrasons) d'intensité croissante $a < b < c$ faisant vibrer le tympan

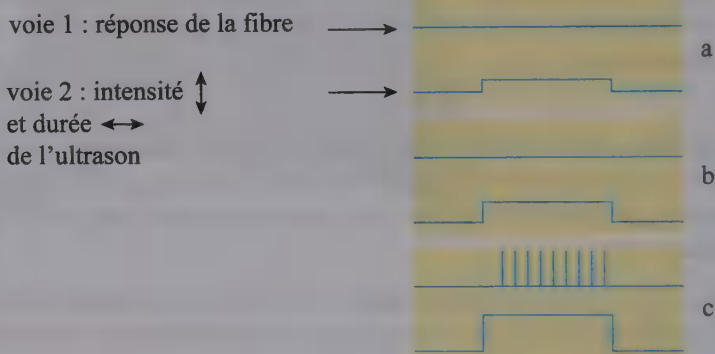


Figure 14.17 – Document C : messages nerveux parcourant la fibre nerveuse de T2 en réponse aux mêmes stimulations (ultrasons) d'intensité croissante $a < b < c$ faisant vibrer le tympan

Document D

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.

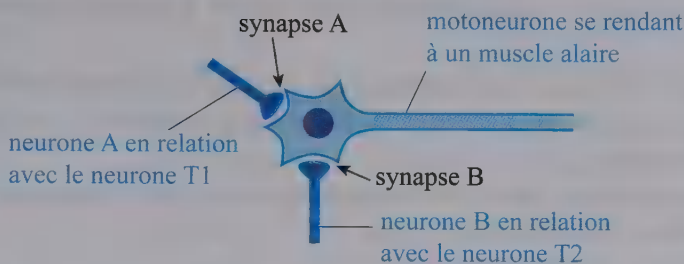


Figure 14.18 – Synapses d'un motoneurone alaire

7 Fibre nerveuse – stimulation

★★

20 min

→ corrigé
p. 309

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 :

Document 1

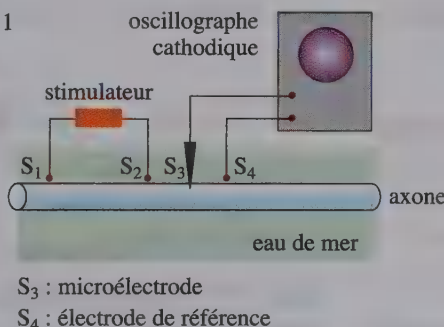


Figure 14.19 – Dispositif de stimulation et d'enregistrement

1. Au début de l'expérience, la microélectrode S₃ est posée à la surface de l'axone ; sur l'écran de l'oscillographe 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 ci-après.

Document 2

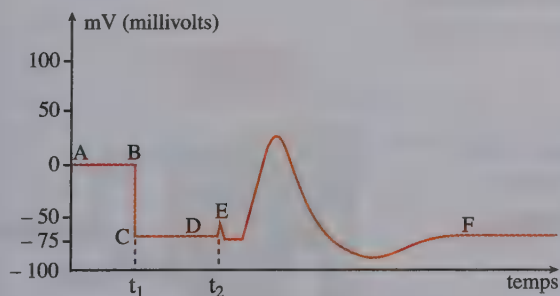


Figure 14.20 – Enregistrement obtenu avant et après stimulation

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^{ème} 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.

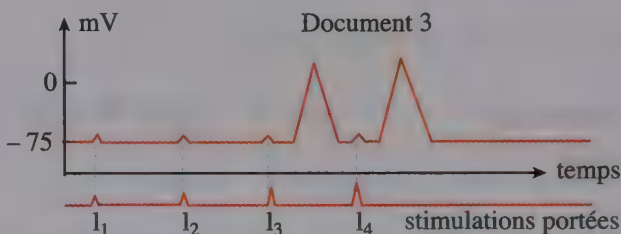


Figure 14.21 –
Enregistrement
obtenu pour différentes
intensités de stimulation

Analysez cet enregistrement. Quelles conclusions pouvez-vous en tirer quant aux propriétés de l'axone ?

8 Section – réseau neuronique



20 min

corrigé
p. 310

Lycée Riquet, Saint Orens

Interprétez chacune des expériences A, B et C présentées ci-après :

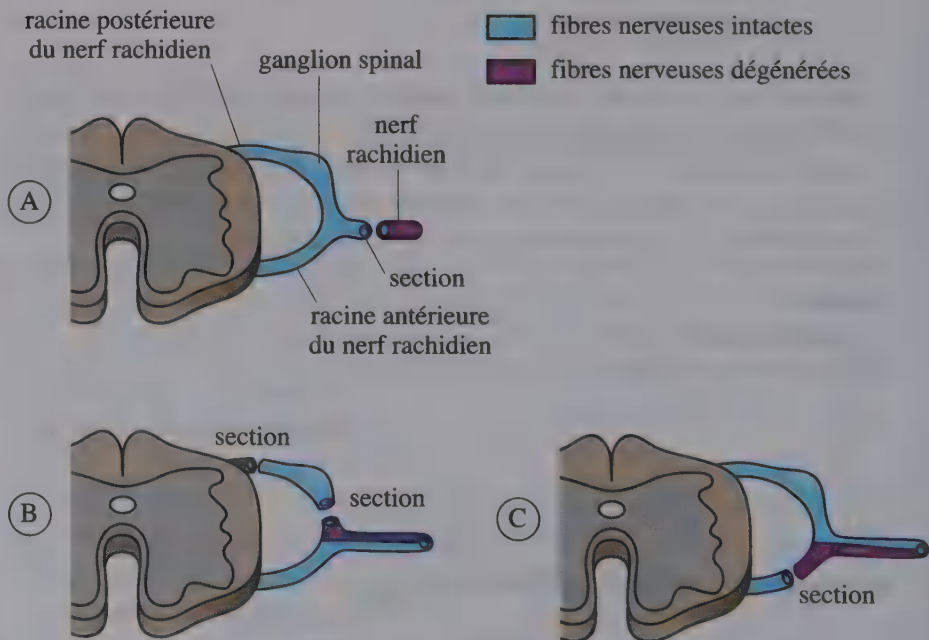


Figure 14.22 – Emplacement et résultats des sections réalisées
lors des expériences A, B et C

Expériences de section	Conséquences immédiate	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 portion de nerf séparée de la moelle épinière dégénèrent.
Expérience B	La région du corps innervée par le nerf rachidien perd toute sensibilité ; la motricité est maintenue, que la section soit réalisée d'un côté ou de l'autre du ganglion	Les fibres nerveuses dégénèrent de part et d'autre du ganglion spinal 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 dégénèrent dans la partie de la racine antérieure séparée de la moelle épinière, ainsi que dans la partie ventrale du nerf rachidien.

Tableau 14.1 – Modalités et résultats de trois expériences

9 PA – synapse

★★

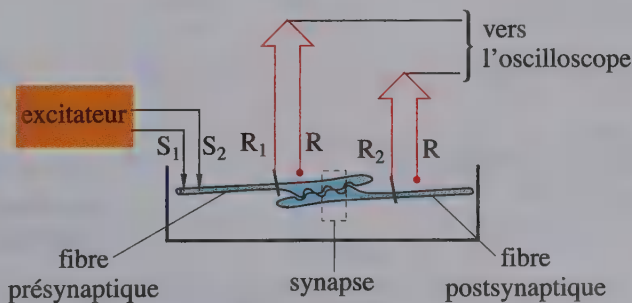
20 min

➔ corrigé p. 311

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



DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Document 2

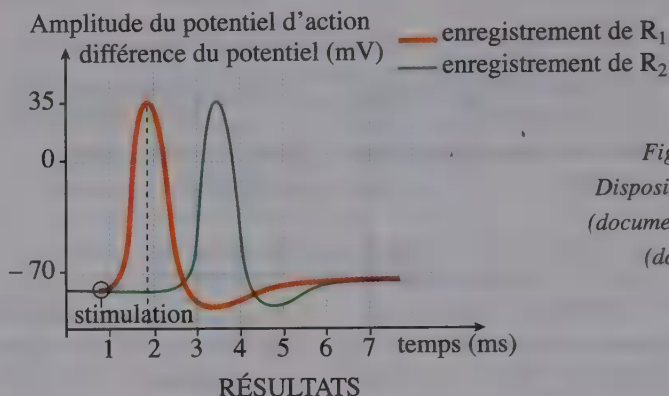


Figure 14.3 –
Dispositif expérimental
(document 1) et résultats
(document 2)

1. Nommez chacun des deux potentiels obtenus.
2. La distance entre R_1 et R_2 est de 10 mm. 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.

10 Synapse – curare

Lycée Saint Martin, Rennes



20 min

corrigé
p. 311

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).

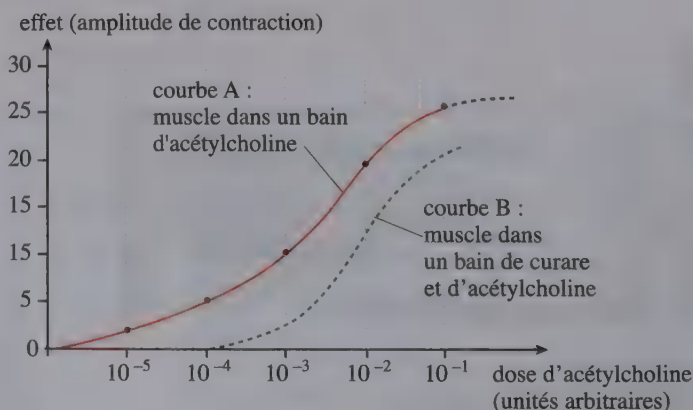


Figure 14.24 –
Effet de l'acétylcholine et
effet du mélange du curare
et de l'acétylcholine sur le
muscle

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.

11 Synapse – myasthénie

Lycée Jules Ferry, Paris



20 min

→ corrigé
p. 312

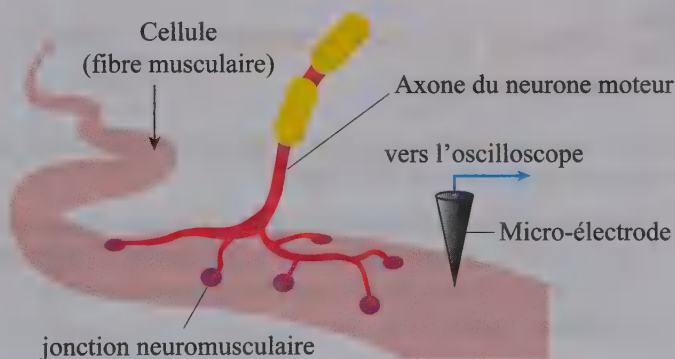
La myasthénie est une anomalie qui se caractérise par une difficulté croissante à contracter efficacement les muscles.

A partir de l'exploitation rigoureuse des résultats expérimentaux, proposez une hypothèse explicative du mécanisme à l'origine de la myasthénie.

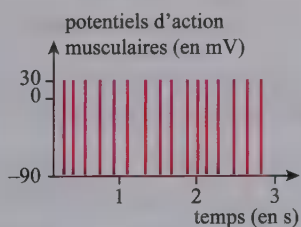
Document A

A 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.

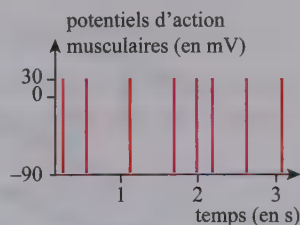
a.
le dispositif
de mesure



b.
les résultats des
enregistrements



SUJET SAIN



SUJET MYASTHÉNIQUE

Figure 14.25 – Etude 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 ci-dessous.

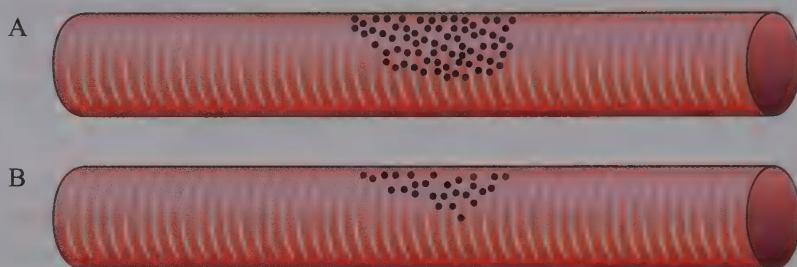


Figure 14.26 – Résultats obtenus sur des portions de cellules musculaires

12 Récepteur sensoriel – codage

★★

15 min

→ corrigé
p. 312

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 récepteur.

Les corpuscules de Pacini sont des mécanorécepteurs (récepteur 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).

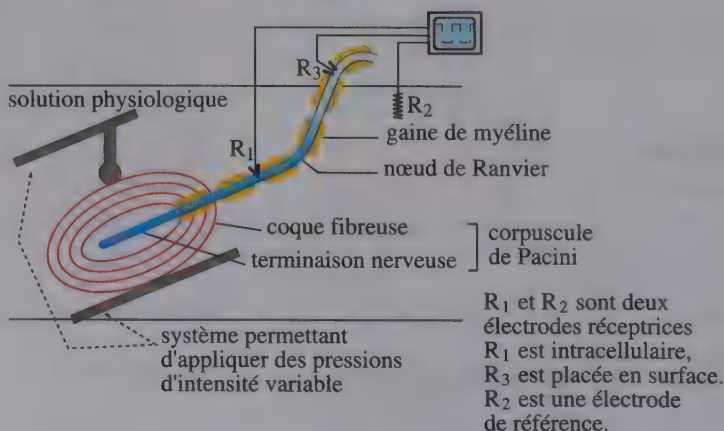
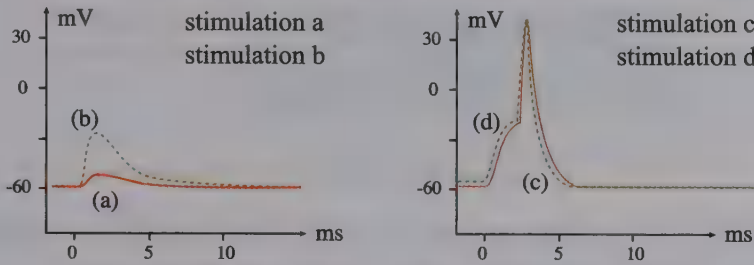
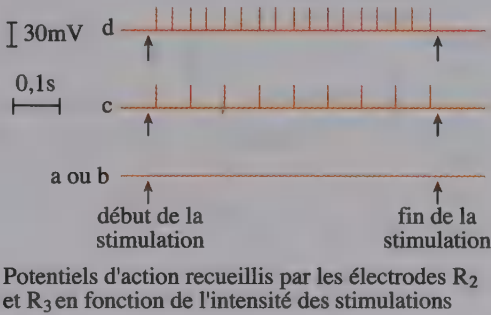


Figure 14.27 – Dispositif permettant d'enregistrer l'activité électrique d'un corpuscule de Pacini isolé

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 14.28 – 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.

13 Axone – PA



25 min

corrigé p. 313

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.

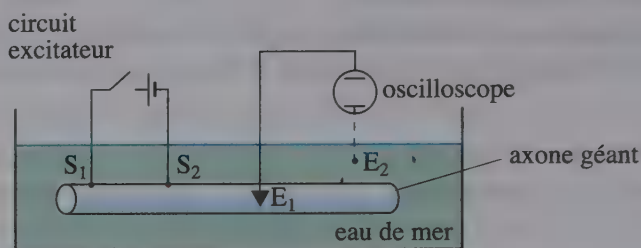


Figure 14.29 – Dispositif de stimulation et d'enregistrement

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.

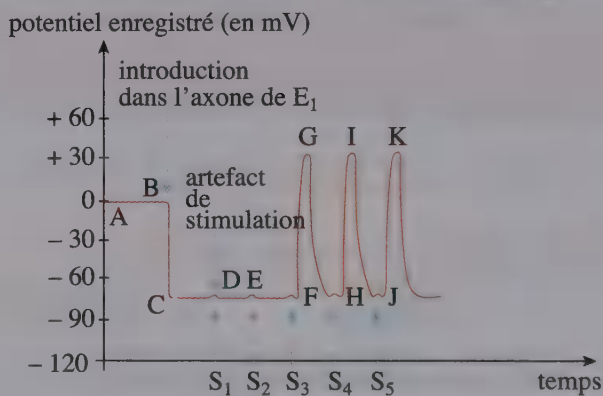


Figure 14.30 – Tracé 1

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.

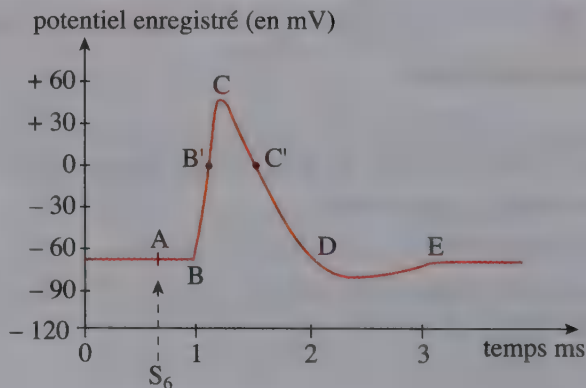


Figure 14.31 – Tracé 2

• 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.

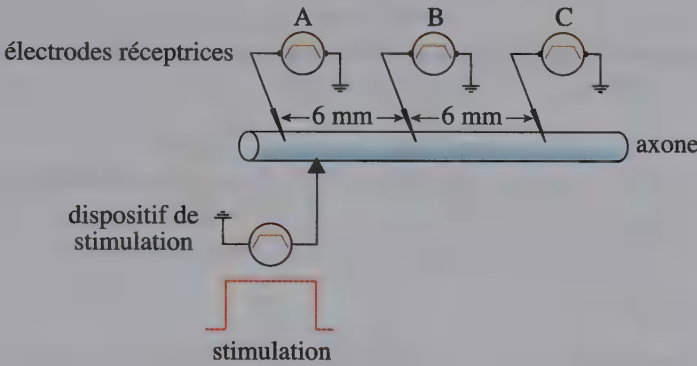


Figure 14.32 – Dispositif de stimulation et d'enregistrement

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 :

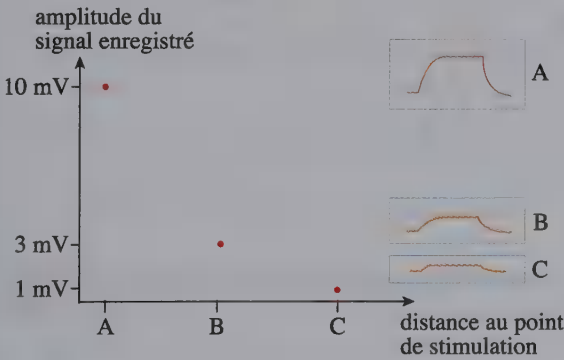


Figure 14.33 –
Document 1 : Réponse de l'axone à une stimulation infraliminaire

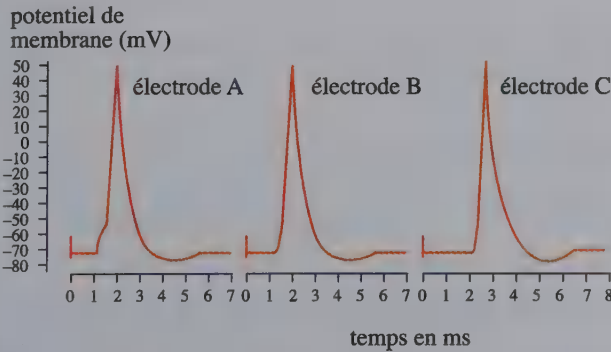


Figure 14.33 –
Document 2 : Réponse de l'axone à une stimulation supraliminaire

14 Motoneurones – synapses



25 min

corrigé
p. 315

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 .

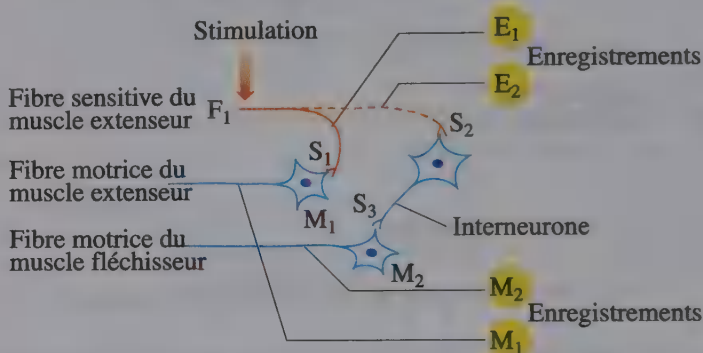
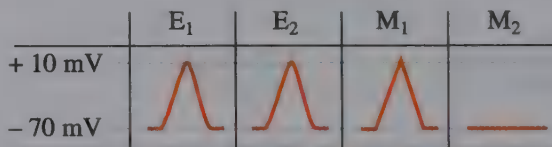


Figure 14.35 – Schéma du protocole expérimental

Figure 14.36 – 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.

1 QCM Vérification des connaissances→ énoncé
p. 291**1** Réponse exacte : **a**

La proposition b est fausse car on ne dit pas d'un muscle qu'il fléchit mais qu'il se contracte.

La proposition c est fausse car tout réflexe est une réaction comportementale involontaire.

2 Réponse exacte : **b**

La proposition a est fausse car il y a deux types de neurones impliqués : les neurones en T et les motoneurones.

La proposition c est fausse car les circuits neuroniques comportent des neurones afférents.

2 V/F Vérification des connaissances→ énoncé
p. 291

1 Faux : au niveau du nerf on enregistre un potentiel global dont l'amplitude traduit l'intensité de la stimulation (codage en nombre de fibres recrutées par la stimulation). Ce type de réponse n'obéit donc pas à la loi du tout ou rien.

2 Faux : le potentiel de repos correspond à l'état polarisé de membrane du neurone en l'absence de toute stimulation.

3 Faux : un potentiel d'action circule de manière orientée, depuis le segment initial de l'axone jusqu'à son arborisation terminale.

4 Vrai : la genèse d'un potentiel d'action correspond effectivement à une dépolarisation de la membrane qui va se propager sans atténuation tout le long de la fibre nerveuse.

3 V/F Vérification des connaissances→ énoncé
p. 291**1** Affirmations inexactes : **a**, **b** et **c**

Rectifications :

a Le message nerveux enregistré au niveau d'une fibre nerveuse afférente est constitué de potentiels d'action, et non de potentiels globaux, tous identiques en amplitude et en durée.

b Le message nerveux enregistré au niveau d'une fibre nerveuse afférente rend compte de l'intensité de la stimulation par un codage en modulation de fréquence, et non d'amplitude.

c Le message nerveux enregistré au niveau d'une fibre nerveuse afférente circule d'un récepteur sensoriel vers un centre nerveux.

Affirmations inexactes : [a] et [c]

Rectifications :

- [a]** Une synapse neuro-neuronique est une zone de contiguïté entre les membranes de deux neurones différents, mais ces dernières ne sont en aucun cas accolées.
- [c]** Une synapse neuro-neuronique fonctionne grâce à des neurotransmetteurs, et non des hormones, contenus dans des vésicules synaptiques.

4 Moelle épinière – structure

énoncé
p. 292

Lycée Victor Hugo, Paris

- 1 : substance blanche ; 2 : substance grise ; 3 : ganglion rachidien ; 4 : racine dorsale ; 5 : racine ventrale.
- On peut trouver des prolongements de neurones dans la substance blanche de la moelle épinière ainsi que dans les racines dorsales et ventrales. On peut trouver des corps cellulaires de neurones dans le ganglion de la racine dorsale et dans la substance grise de la moelle épinière. Ces neurones sont d'une part des neurones afférents qui ont leurs corps cellulaires dans le ganglion de la racine dorsale et dont les extrémités sont en relation avec les fuseaux neuromusculaires, d'autre part des motoneurones dont les corps cellulaires se trouvent dans la substance grise de la moelle épinière et dont les axones aboutissent aux fibres musculaires effectrices. On trouve également au niveau de la moelle épinière des interneurones, intégralement localisés dans la substance grise.

Les synapses neuroneuroniques se situent dans la substance grise de la moelle épinière.

5 Réflexe myotatique

énoncé
p. 292

Institut Notre Dame, Meudon

Lorsqu'une masse de 1 kilogramme est placée dans la main de cette personne, le poids exercé provoque un affaissement de l'avant-bras (position 2). On observe sur le schéma qu'un tendon rattache le muscle biceps du bras à un os de l'avant-bras. Ainsi, le muscle biceps est étiré lorsque l'avant-bras s'affaisse. Or, on sait que lors d'un réflexe myotatique un muscle se contracte en réponse à son propre étirement. Dans le cas présent, l'étirement du biceps (stimulus) déclenche sa contraction (réponse), ce qui ramène l'avant-bras dans sa position horizontale initiale (position 3).

En résumé, le mouvement en deux temps de l'avant-bras (passage à la position 2 puis à la position 3) résulte d'un réflexe myotatique impliquant le muscle fléchisseur de l'avant-bras.

6 Réflexe de fuite

→ énoncé
p. 293

Lycée Charlemagne, Paris

⚠ ATTENTION

La forme demandée de la réponse est un article dans un magazine. Cela autorise donc quelques « fantaisies » dans la formulation. Cependant, on attend avant tout le contenu scientifique. Il ne faut donc pas le perdre de vue.

Vous connaissez tous ces drôles de Mammifères que sont les chauves-souris et les légendes qui les accompagnent. Savez-vous que ce sont des prédateurs très efficaces qui chassent les insectes à la tombée de la nuit ? Elles utilisent pour cela un système de localisation des insectes par un système d'ultrasons et de sonar. Laissez-nous vous raconter comment certains papillons de nuit sont capables de leur échapper...

Ces papillons de nuit possèdent un organe auditif de chaque côté de leur thorax. Il s'agit d'un tympan contre lequel sont placés deux types de neurones : les neurones T1 et T2 (document A) qui ont une terminaison dendritique accolée au tympan.

Lorsqu'ils les ultrasons font vibrer le tympan du papillon, des potentiels d'action sont créés dans les fibres nerveuses de ces neurones : on observe des traits verticaux sur le document B qui correspondent chacun à un potentiel d'action parcourant la fibre nerveuse. Le message nerveux est donc une succession de potentiels d'action. Cependant, les messages ne sont pas identiques entre les deux neurones. Le neurone 1 code l'intensité des ultrasons par la fréquence des potentiels d'action : plus les ultrasons sont intenses, plus les potentiels d'action sont fréquents. Avoir des ultrasons de plus en plus intenses revient à dire que la chauve-souris se rapproche du papillon. Le neurone T2 (document C), lui, n'est parcouru par aucun potentiel d'action tant que l'intensité des ultrasons n'est pas assez forte. Au-delà d'une certaine intensité, on observe une forte fréquence des potentiels d'action.

En résumé, lorsque la chauve-souris est loin de sa proie, les ultrasons arrivent avec une faible intensité à l'organe auditif du papillon. Cela crée des potentiels d'action peu fréquents dans la fibre des neurones T1. Quand la chauve-souris s'approche, les ultrasons arrivent à l'organe auditif du papillon, ce qui provoque la création de potentiels d'action très fréquents dans la fibre des neurones T1 et également dans la fibre des neurones T2.

Quelles sont les conséquences des messages nerveux ainsi propagés par les neurones sensitifs ?

Les neurones sensitifs sont connectés à des neurones A et B dans les centres nerveux du papillon (document D). Lorsque l'intensité des ultrasons est faible à moyenne, c'est-à-dire lorsque les neurones T1 sont parcourus par des potentiels d'action peu fréquents, seuls les neurones connectés à ces neurones T1 et les motoneurones sont

parcours de messages nerveux. L'organisation des neurones suggère que la synapse A est excitatrice : des potentiels d'action arrivant dans le neurone T1 présynaptique provoquent la création de potentiels d'action dans le neurone post-synaptique. Par conséquent, les fibres musculaires des muscles alaires se contractent et l'aile du papillon bouge : il vole ! Le papillon vole d'autant plus vite que les ultrasons sont intenses. Cela explique pourquoi le papillon accélère son vol à l'approche d'une chauve-souris.

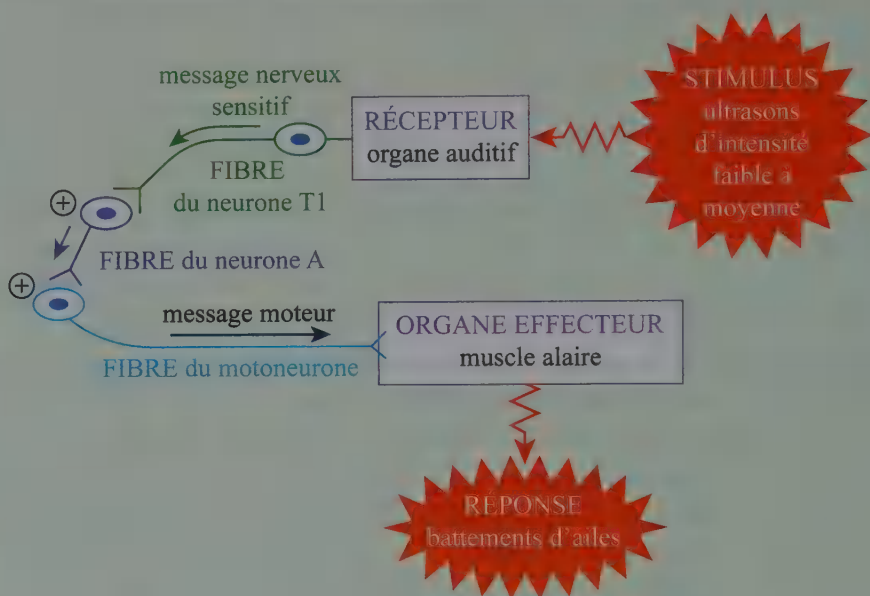


Figure 14.37 – Schéma fonctionnel du réflexe du papillon dans le cas où la chauve-souris est située loin

Cependant, quand la chauve-souris est trop proche, à moins de 3 mètres, le comportement du papillon change : il change brusquement de direction en vol, fait des piqués et se pose. A quoi cela est-il dû ?

Lorsque les ultrasons sont intenses, les neurones T2 entrent en action : ils sont connectés aux neurones B (document D), qui sont parcourus de potentiels d'action en réponse à l'arrivée des potentiels d'action des neurones T2. Comme les neurones A, les neurones B ont une synapse avec le motoneurone. On apprend que le motoneurone, dans ce cas, n'est parcouru par aucun potentiel d'action. Cela signifie que la synapse avec le neurone B est inhibitrice : elle empêche la création de potentiels d'action dans le neurone post-synaptique. Le motoneurone intègre les deux types de messages en provenance des neurones A et B. La résultante étant un message inhibiteur, il n'est pas parcouru de potentiels d'action. Au final, les fibres musculaires alaires ne se contractent pas : l'aile du papillon cesse de bouger et le papillon a tendance à tomber !

Finalement, le papillon doit sa survie à l'existence d'une réponse réflexe relativement élaborée pour un réflexe puisqu'elle est « réglable » en fonction de la distance du

prédateur. Ses ailes battent plus ou moins vite en fonction de la distance à la chauve-souris, lui permettant soit d'accélérer soit de se poser.

7 Fibre nerveuse – stimulation

→ énoncé
p. 295

Lycée Saint-Michel de Picpus, Paris

1. La partie CD du tracé correspond au potentiel de repos : au temps t_1 on a enfoncé la microélectrode S3 à l'intérieur de l'axone et on enregistre alors une différence de potentiel d'environ -75 mV de part et d'autre de la membrane plasmique, révélant l'état polarisé de la membrane de l'axone au repos.

Au temps t_2 , on applique une stimulation électrique sur la membrane de l'axone. On enregistre d'abord un artéfact de stimulation (phénomène purement physique, contemporain de la stimulation) correspondant au point E du tracé, puis un potentiel d'action repérable par une inversion transitoire de polarisation (le potentiel membranaire dépasse la valeur zéro) et se terminant par une légère hyperpolarisation. Au point F du tracé, il y a retour au potentiel de repos.

En conclusion, la membrane de l'axone a répondu à la stimulation par une inversion brutale et temporaire de la polarisation membranaire.

2. Si on avait éloigné les électrodes S_3 - S_4 des électrodes S_1 - S_2 , on aurait obtenu la même réponse mais avec un décalage dans le temps car le potentiel d'action est un signal qui se propage sans atténuation le long de l'axone. Si on avait lésé l'axone entre l'électrode de stimulation S_2 et l'électrode d'enregistrement S_3 , on n'aurait pas enregistré de potentiel d'action en S_3 - S_4 car sa propagation aurait été stoppée en aval du point de lésion.
3. Pour de faibles intensités de stimulation (I_1 et I_2), on enregistre simplement l'artéfact de stimulation contemporain du choc électrique. Par contre, pour des stimulations électriques plus intenses (I_3 et I_4), on enregistre après l'artéfact de stimulation une réponse caractérisée par une inversion de polarisation. Cette réponse positive est un potentiel d'action. On observe que les deux potentiels d'action obtenus pour les intensités I_3 et I_4 sont identiques (même amplitude, même durée).

Cette étude met en évidence les propriétés de l'axone : il répond à une stimulation efficace en émettant un potentiel d'action qui est un signal obéissant à la loi du tout ou rien : soit le potentiel d'action n'existe pas (cas des stimulations I_1 et I_2), soit le potentiel d'action existe (cas des stimulations I_3 et I_4) et ses caractéristiques (amplitude et durée) sont d'emblée maximales.

8 Section – réseau neuronique

Lycée Riquet, Saint Orens

énoncé
p. 296

MÉTHODE

Les expériences proposées ont deux intérêts :

- elles permettent d'identifier les fonctions sensitive ou motrice des racines postérieure et antérieure du nerf rachidien (pour cela, utiliser les résultats indiqués dans la colonne « conséquences immédiates »)
- elles permettent de localiser les corps cellulaires des neurones concernés (pour cela, utiliser les résultats indiqués dans la colonne « observations à plus long terme »). On sait en effet que si un neurone est sectionné, la portion anucléée dégénère, alors que la partie nucléée (c'est-à-dire le corps cellulaire) peut régénérer la région amputée.

La section du nerf rachidien (expérience A) a pour conséquence immédiate la perte de la sensibilité et de la motricité : on en déduit que le nerf rachidien est un nerf mixte c'est-à-dire capable de conduire un message nerveux afférent « sensitif » et un message nerveux efférent « moteur ». La section de la racine postérieure de chaque côté du ganglion spinal (expérience B) a pour conséquences immédiates la perte de la sensibilité alors que la motricité est préservée : on en déduit que la racine postérieure conduit un message nerveux afférent et ne conduit pas de message nerveux efférent. La section de la racine antérieure (expérience C) a pour conséquence immédiate la perte de la motricité : on en déduit que la racine antérieure sert à conduire un message nerveux efférent.

En résumé, la racine postérieure est sensitive alors que la racine antérieure est motrice.

La section du nerf rachidien (expérience A) entraîne à long terme la dégénérescence des fibres nerveuses de la portion de nerf qui n'est plus rattachée à la moelle épinière : c'est donc que les corps cellulaires des neurones concernés se trouvent quelque part dans la partie encore rattachée à la moelle épinière. La section de la racine postérieure de chaque côté du ganglion spinal (expérience B) entraîne à long terme la dégénérescence des fibres nerveuses de part et d'autre du ganglion spinal isolé : c'est donc que ce dernier contient des corps cellulaires de neurones rattachés en amont et en aval à des prolongements cytoplasmiques. On note également une dégénérescence des fibres dans la partie dorsale du nerf rachidien ce qui nous confirme que ce dernier ne contient pas de corps cellulaires de neurones. La section de la racine antérieure de la moelle épinière (expérience C) entraîne à long terme la dégénérescence des fibres nerveuses dans la partie de la racine antérieure séparée de la moelle épinière, ce qui permet de penser que les corps cellulaires des neurones correspondants sont situés directement dans la moelle épinière. On note également une dégénérescence des fibres dans la partie ventrale du nerf rachidien ce qui nous confirme que ce dernier ne contient pas de corps cellulaires de neurones.

En résumé, ces expériences de section concernent des neurones dont les corps cellulaires se situent dans la moelle épinière ainsi que des neurones dont les corps cellulaires se situent dans le ganglion spinal.

9 PA – synapse

→ énoncé
p. 297

Lycée Saint-Martin, Rennes

1. Chacun des deux potentiels obtenus respectivement sur la fibre présynaptique en R_1 et sur la fibre postsynaptique en R_2 est un potentiel d'action. Il s'agit d'un signal dont l'amplitude vaut environ 110 mV, il est identifiable par une inversion brutale et temporaire de la polarité membranaire, qui passe de -75 mV à +35 mV.
2. La distance entre les électrodes R_1 et R_2 étant égale à 10 mm et la vitesse de propagation d'un potentiel sur une fibre étant de 11 m.s⁻¹ (soit 11 mm.ms⁻¹), les deux potentiels devraient être séparés d'un délai de 10/11 ms soit 0.91 ms.
3. Sur l'enregistrement, on détermine que le délai séparant l'arrivée d'un potentiel d'action en R_1 et l'arrivée d'un potentiel d'action en R_2 vaut en réalité 1.5 ms, ce qui est supérieur à la valeur attendue. Sachant que le trajet de R_1 à R_2 comporte une synapse, on en déduit que le franchissement de cette dernière ralentit la transmission du message nerveux.

10 Synapse – curare

→ énoncé
p. 298

Lycée Saint-Martin, Rennes

1. La courbe A donne l'amplitude de la contraction du muscle en fonction de la concentration en acétylcholine. On peut observer deux portions dans le tracé :
 - Pour des concentrations en acétylcholine comprises entre 0 et 10⁻¹ u.a., l'amplitude de la contraction musculaire est d'autant plus importante que la concentration en acétylcholine est importante.
 - Pour des concentrations en acétylcholine supérieures ou égales à 10⁻¹ u.a., l'amplitude de la contraction musculaire se stabilise à une valeur proche de 27 et n'augmente plus avec l'augmentation de la concentration en acétylcholine.
2. On sait que l'acétylcholine est le neurotransmetteur impliqué dans le fonctionnement des synapses neuromusculaires. La fixation des molécules d'acétylcholine à leurs récepteurs spécifiques situés sur la membrane postsynaptique déclenche la contraction des fibres musculaires. Lorsque la concentration en acétylcholine augmente, il se forme davantage de complexes acétylcholine-récepteur, ce qui amplifie la contraction musculaire. Toutefois, à partir d'une certaine concentration en acétylcholine, tous les récepteurs sont déjà occupés par de l'acétylcholine ce qui explique que l'amplitude de la contraction du muscle se stabilise à une valeur maximale.
3. En observant la courbe B, on remarque que le muscle mis en présence de curare et d'acétylcholine se contracte moins que lorsqu'il est mis en présence d'acétylcholine

seule. On peut supposer que le curare est une substance qui se fixe sur les récepteurs à l'acétylcholine sans déclencher la contraction des fibres musculaires. De ce fait, la quantité d'acétylcholines fixées aux récepteurs est moins importante en présence de curare, ce qui explique que le muscle se contracte avec moins d'ampleur.

11 Synapse – myasthénie

énoncé
p. 299

Lycée Jules Ferry, Paris

Le document A présente le dispositif d'enregistrement de l'activité musculaire : une microélectrode plantée dans une fibre musculaire permet d'enregistrer les potentiels d'action musculaires. Chaque trait représente un potentiel d'action se propageant dans la fibre musculaire et provoquant son raccourcissement. On sait que le message nerveux est codé en fréquence de potentiels d'action. Plus la fréquence des potentiels d'action (PA) est élevée, plus la contraction est forte.

Chez le sujet sain on compte 10 PA en 2 secondes, soit une fréquence de 5 Hz. Chez le sujet myasthénique, on compte 5 PA en 2 secondes, soit une fréquence de 2,5 Hz.

On comprend de cette comparaison que la faiblesse de la contraction musculaire chez les sujets atteints est due à la faible fréquence des potentiels d'action musculaires.

A quoi la faible fréquence des PA musculaires est-elle due ?

Le document B nous apprend que l'alpha bungarotoxine, extraite du venin de serpent, provoque des symptômes analogues à ceux de la myasthénie et qu'elle se fixe aux récepteurs de l'acétylcholine. On sait que l'acétylcholine est le neuromédiateur qui se fixe aux récepteurs post-synaptiques de la synapse neuro-musculaire et qui provoque la naissance de PA musculaires. On peut donc supposer que la myasthénie est due à une anomalie au niveau des récepteurs de l'acétylcholine.

Ces récepteurs sont dans la membrane plasmique des cellules musculaires.

L'autoradiographie montre les zones de liaison de l'alpha bungarotoxine sur une cellule musculaire. Cela correspond aux récepteurs de l'acétylcholine. On observe qu'il y a moins de sites de liaison de l'alpha bungarotoxine chez les individus atteints. Cela montre que les personnes atteintes ont moins de récepteurs de l'acétylcholine.

On sait que le message dans la synapse est codé en concentration de neurotransmetteurs. Si les récepteurs sont peu nombreux, une faible quantité d'acétylcholine s'y lie et peu de potentiels d'action musculaires seront créés.

La myasthénie est due à un nombre de récepteurs de l'acétylcholine anormalement faible dans la synapse neuro-musculaire. Un nombre insuffisant de potentiels d'action musculaires est créé, d'où la faiblesse musculaire constatée.

12 Récepteur sensoriel – codage

énoncé
p. 300

Lycée Riquet, Saint Orens

Les enregistrements proposés dans le document 1 indiquent que pour de faibles inten-

sités de stimulation (a et b) on obtient, sur la fibre nerveuse reliée au corpuscule de Pacini, à proximité de la zone stimulée, de petites dépolarisations qui ne sont pas des potentiels d'action, alors que pour de plus fortes intensités de stimulation (c et d) un potentiel d'action est obtenu. Ce dernier est identifiable par une inversion brutale de la polarisation membranaire, qui passe de -60 mV à $+35$ mV. Les potentiels d'action obtenus pour les stimulations c et d sont strictement identiques. La première conclusion est que le corpuscule de Pacini émet des potentiels d'action à condition qu'il soit suffisamment stimulé. La deuxième conclusion est que le potentiel d'action obéit à la loi du tout ou rien : soit il n'existe pas, soit il existe et ses caractéristiques (amplitude et durée) sont d'emblée maximales.

Les enregistrements proposés dans le document 2 ont été obtenus à distance de la zone de stimulation. On observe que dans le cas des stimulations a et b aucun signal n'est enregistré sur la fibre afférente alors que dans le cas des stimulations c et d on enregistre un message nerveux formé d'une salve de potentiels d'action tous identiques. Les petites dépolarisations qu'on avait obtenues à proximité de la zone stimulée ne sont donc pas propageables, alors que le potentiel d'action s'est propagé sans atténuation. La troisième conclusion est que le potentiel d'action est un signal électrique propageable.

La comparaison des réponses obtenues dans le cas des stimulations efficaces c et d va permettre de comprendre comment le message nerveux afférent émis par le corpuscule de Pacini peut rendre compte de l'intensité de la stimulation. On observe que dans le cas de la stimulation c, le message nerveux afférent comporte 9 potentiels d'action émis en 0.4 s alors que dans le cas de la stimulation d, le message nerveux afférent comporte 25 potentiels d'action émis en 0.4 s. Ainsi, lorsque l'intensité du stimulus augmente, la fréquence des potentiels d'action composant le message nerveux afférent augmente. La quatrième conclusion est que le message nerveux élaboré par le corpuscule de Pacini est codé en modulation de fréquence des potentiels d'action.

En résumé, le corpuscule de Pacini, lorsqu'il est soumis à une pression d'intensité suffisante, émet un message nerveux afférent constitué d'un train de potentiels d'action propageables dont la fréquence code l'intensité de la stimulation.

13 Axone - PA

→ énoncé
p. 301

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

- Étude de la première série d'expériences

Le tracé 1 permet d'étudier la réponse de l'axone géant de calmar à des stimulations d'intensité croissante.

L'introduction de l'électrode E1 dans le cytoplasme de l'axone permet de visualiser, avant toute stimulation, une différence de potentiel de part et d'autre de la membrane plasmique : la membrane plasmique du neurone au repos est polarisée. Cette différence de potentiel d'environ -70 mV entre le milieu extracellulaire et le cytoplasme est le potentiel de repos.

On observe que pour de faibles intensités de stimulation (S_1 et S_2), on enregistre simplement un artéfact de stimulation contemporain du choc électrique. Par contre, pour des stimulations électriques plus intenses (S_3 puis S_4 puis S_5), on enregistre après l'artéfact de stimulation une réponse caractérisée par une inversion de la polarité membranaire : la différence de potentiel transmembranaire passe de -70 mV à $+30$ mV. Cette réponse est un potentiel d'action. On observe que les trois potentiels d'action obtenus pour les intensités S_3 , S_4 et S_5 sont strictement identiques (même amplitude, même durée).

La première conclusion est que le potentiel d'action est un signal qui prend naissance à la suite d'une stimulation efficace.

La deuxième conclusion est que le potentiel d'action obéit à la loi du tout ou rien : soit il n'existe pas (cas des stimulations S_1 et S_2), soit il existe (cas des stimulations S_3 , S_4 et S_5) et ses caractéristiques (amplitude et durée) sont d'emblée maximales.

Le tracé 2 permet d'observer les phases caractéristiques d'un potentiel d'action : il comporte une dépolarisation (portion B-B'), une inversion transitoire de polarisation (portion B'-C-C') suivie d'une repolarisation (portion C'-D) et d'une hyperpolarisation (portion D-E).

• Étude de la deuxième série d'expériences

Dans la deuxième série d'expériences, on utilise 3 paires d'électrodes réceptrices situées à des distances croissantes de la zone stimulée et on soumet l'axone à une stimulation infraliminaire puis supraliminaire.

Dans le cas de l'application d'une stimulation infraliminaire (document 1), on enregistre au niveau des électrodes réceptrices un signal dont l'amplitude décroît avec la distance au point de stimulation : l'amplitude du signal vaut 10 mV au niveau de l'électrode A, 3 mV au niveau de l'électrode B et 1 mV au niveau de l'électrode C. L'allure des signaux obtenus montre qu'il s'agit de dépolarisations. La conclusion est qu'une stimulation infraliminaire de l'axone provoque une dépolarisation qui n'est pas propageable « à l'identique » sur une grande distance, puisqu'elle s'atténue à distance de la zone stimulée.

⚠ ATTENTION

Les dépolarisations visibles sur le document 1 ne sont pas propageables, n'obéissent pas à la loi du tout ou rien, et ne comportent pas d'inversion de polarisation : vous ne devez surtout pas les confondre avec des potentiels d'action.

Dans le cas de l'application d'une stimulation supraliminaire (document 2), on enregistre au niveau de chaque électrode réceptrice l'arrivée d'un potentiel d'action : à $t = 1$ ms au niveau de l'électrode A, à $t = 1.5$ ms au niveau de l'électrode B et à $t = 2$ ms au niveau de l'électrode C. On démontre ainsi que le potentiel d'action est un signal qui se propage sans atténuation.

En tenant compte de la distance entre deux séries d'électrodes réceptrices et du temps séparant l'arrivée d'un potentiel d'action au niveau de chaque série d'électrodes, on peut proposer un calcul de vitesse de conduction du potentiel d'action : il a fallu 0.5 ms pour parcourir 6 mm ce qui correspond à une vitesse de conduction de 12 m.s^{-1} .

- En conclusion, ces données expérimentales mettent en évidence les propriétés de l'axone : il émet -s'il est suffisamment stimulé- des signaux électriques élémentaires qui sont des potentiels d'action. La genèse d'un potentiel d'action repose sur l'existence d'un potentiel de repos caractérisé par une polarisation membranaire. Un potentiel d'action est une inversion transitoire de la polarisation membranaire. Au cours de sa propagation le long de l'axone, le potentiel d'action conserve toutes ses caractéristiques.

14 Motoneurones – synapse

➔ énoncé
p. 304

Lycée Colbert, Lorient

⚠ ATTENTION

En l'absence d'électromyogrammes, la démonstration de l'antagonisme musculaire se fera en mettant en évidence l'innervation réciproque des deux muscles connectés aux motoneurones M_1 et M_2 .

Les trois neurones étudiés sont le motoneurone M_1 connecté par une synapse S_1 à une fibre présynaptique F_1 , un interneurone connecté par une synapse S_2 à une fibre présynaptique F_1 , et le motoneurone M_2 connecté par une synapse S_3 à l'interneurone.

On observe sur les enregistrements, qu'à la suite d'une stimulation de la fibre sensitive F_1 issue du muscle extenseur, un potentiel d'action est enregistré en E_1 et en E_2 (au niveau de deux extrémités axonales d'une même fibre sensitive F_1 du muscle extenseur) ainsi qu'en M_1 (au niveau de l'axone du motoneurone M_1) tandis qu'aucun potentiel d'action n'est enregistré en M_2 (au niveau de l'axone du motoneurone M_2). On en déduit que la synapse S_1 a permis la transmission du potentiel d'action depuis la fibre F_1 vers le motoneurone M_1 : il s'agit donc d'une synapse excitatrice. La synapse S_2 étant également excitatrice (car S_1 et S_2 sont deux synapses comportant le même élément présynaptique), on déduit du résultat en M_2 que c'est la synapse S_3 qui s'est opposée à la transmission du potentiel d'action depuis l'interneurone vers le motoneurone M_2 : il s'agit donc d'une synapse inhibitrice. Par ce dispositif, le message nerveux propagé par la fibre sensitive du muscle extenseur est transmis au motoneurone M_1 , ce qui permet au muscle extenseur de se contracter, tandis que ce même message nerveux n'est pas transmis par l'interneurone au motoneurone M_2 , ce qui interdit la contraction du muscle fléchisseur. Ce dispositif d'innervation réciproque est la preuve que les deux muscles concernés sont des muscles antagonistes.

Ces deux muscles ne se contractent pas simultanément, ce qui est un argument supplémentaire en faveur de leur rôle antagoniste.

La commande volontaire du mouvement

Plan du chapitre

1. Introduction
2. La commande corticale du mouvement
3. Du cortex moteur au muscle
4. Motricité et plasticité cérébrale

Introduction

Le réflexe myotatique est un exemple de réponse motrice et il permet d'étudier le fonctionnement d'un réseau de neurones très simple. Il explique le contrôle de la posture du corps (station debout par exemple) mais, il n'est pas responsable de la réalisation des mouvements volontaires du corps.

PROBLÉMATIQUE

Quels processus biologiques permettent de faire fonctionner les muscles en réponse à un souhait conscient de mouvement ?

La commande corticale du mouvement

2.1 Les méthodes d'étude

2.1.1 Etude des lésions du système nerveux

Diverses observations ont permis de déterminer les structures nerveuses importantes dans la commande volontaire du mouvement : des lésions accidentelles chez l'Homme ou provoquées chez l'animal ou encore des opérations chirurgicales. Cela a permis d'identifier des zones très localisées du cortex cérébral. On a également montré le rôle essentiel de la moelle épinière : en effet, des lésions de la moelle épinière conduisent à une paralysie d'un ou plusieurs membres en fonction de leur localisation.

2.1.2 Les apports de l'IRM

Actuellement des méthodes non invasives donnent des renseignements très importants sur le fonctionnement du système nerveux : il s'agit de l'IRMf (imagerie par résonance magnétique fonctionnelle). Le sujet est placé dans un appareil créant un champ magnétique qui oriente les molécules biologiques dans le même sens. La suppression du champ magnétique provoque un retour des molécules à une disposition aléatoire. La vitesse de ce retour dépend du type de tissu ; on obtient ainsi une image anatomique de la structure étudiée.

- Lorsqu'une zone cérébrale est activée, ses neurones fonctionnent davantage donc ils consomment davantage de glucose et de dioxygène que quand cette zone n'est pas active ; le sang qui en sort est donc appauvri en ces molécules. La désoxyhémoglobine (hémoglobine sans O_2) émet un signal BOLD différent de l'oxyhémoglobine : plus les neurones sont actifs, plus le sang sortant contient de désoxyhémoglobine.

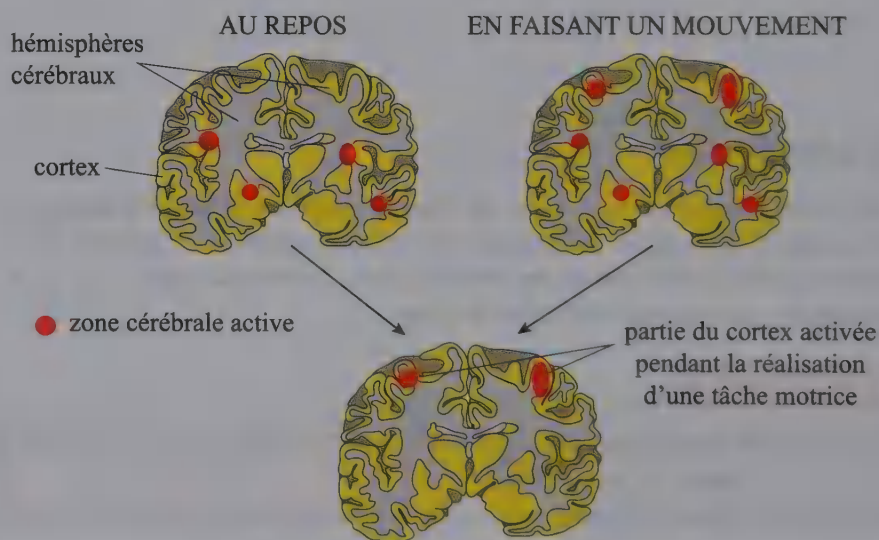


Figure 15.1 – utilisation de l'IRMf dans la localisation des aires corticales motrices (coupe frontale)

- De la même façon, les zones cérébrales actives ont un débit sanguin accru par rapport aux zones voisines : l'injection de glucose radioactif permet de repérer une concentration de glucose dans les zones les plus actives : l'IRM couplée à la scintigraphie montre les zones les plus radioactives.

Afin de déterminer les zones cérébrales impliquées dans la réalisation d'une tâche comme la commande du mouvement d'un bras par exemple, on réalise des acquisitions d'images du sujet au repos et du sujet auquel on demande de bouger le bras. On recherche ensuite les différences entre les deux images et on considère que les différences sont dues à la commande du mouvement du bras.

2.2 Les aires motrices corticales spécialisées dans le mouvement

2.2.1 Localisation du cortex moteur

On appelle cortex cérébral la partie superficielle des hémisphères cérébraux, formée par de la substance grise. Le terme « cerveau » au sens strict désigne les hémisphères cérébraux.

La réalisation de mouvements volontaires est due à une région localisée du cortex située dans le lobe frontal en avant de la scissure de Rolando : le cortex moteur. Le cortex moteur est divisé en plusieurs aires : le cortex moteur primaire (aire de Brodmann n°4), l'aire de Brodmann n°6 (le cortex prémoteur et l'aire motrice supplémentaire).

Les différentes aires motrices n'ont pas un rôle équivalent : le cortex prémoteur et l'aire motrice supplémentaire sont impliqués dans la planification des muscles à mettre en œuvre pour effectuer une action et l'ajustement des mouvements en fonction de l'environnement. Le cortex moteur primaire est responsable directement de la commande motrice.

Remarque : d'autres aires corticales interviennent dans la commande motrice. Il s'agit du cortex préfrontal, siège de la décision du mouvement ainsi que des aires recevant les informations sensorielles.

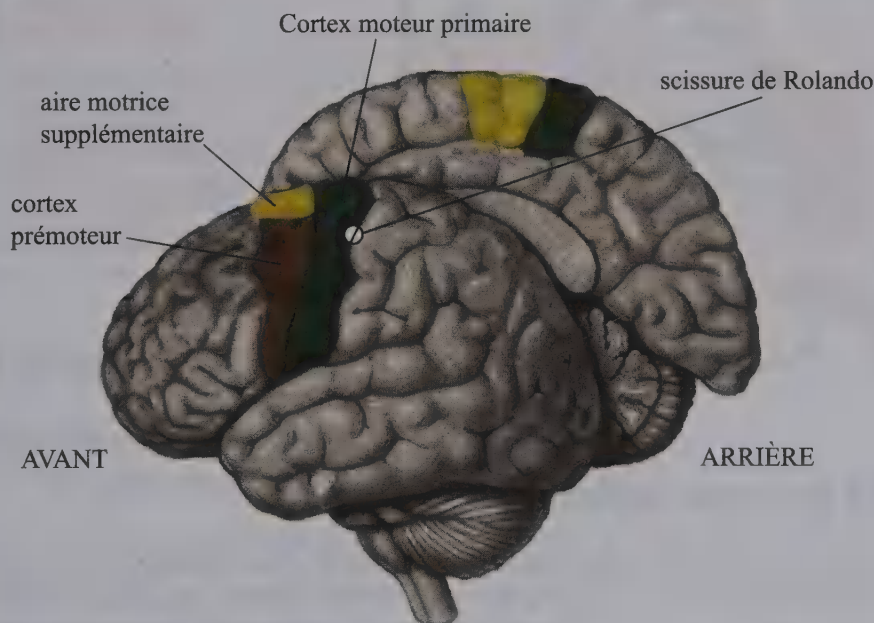


Figure 15.2 – Localisation du cortex moteur sur une vue latérale d'un hémisphère cérébral

2.2.2 Caractéristiques du cortex moteur

Les aires motrices sont présentes au niveau des deux hémisphères. On retrouve la même propriété de décussation de la commande motrice que dans le cas du cortex visuel (programme de 1ère S) : le mouvement de la partie gauche du corps est commandé par les aires corticales de l'hémisphère droit et inversement pour l'autre côté du corps.

L'activation chez un animal d'une zone très précise de l'aire motrice primaire par une stimulation électrique provoque le mouvement d'une seule partie du corps. Il existe une somatotopie du cortex moteur : chaque territoire du corps est commandé par une région très précise du cortex moteur. La représentation sur le cortex des parties du corps commandées en tenant compte de la surface corticale dévolue à chaque partie dessine un individu appelé homoncule moteur. Cet homoncule moteur est disproportionné : les zones du corps dont le mouvement nécessite la commande de nombreux muscles (motricité fine) sont représentés par une surface plus importante que celles qui sont commandés par peu de muscles. Ainsi, les mains et le visage sont plus grands dans l'homoncule moteur qu'en réalité.

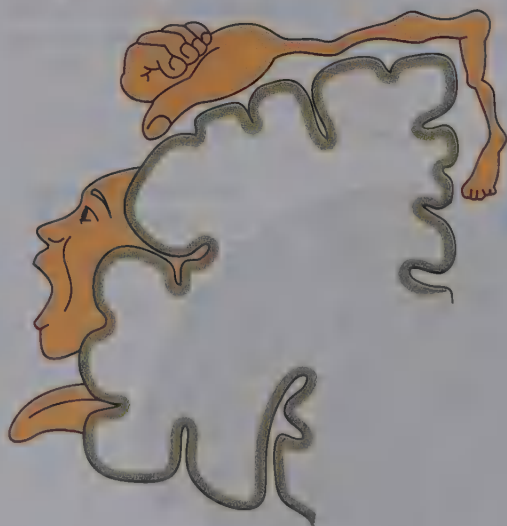


Figure 15.3 – L'homoncule moteur

3 Du cortex moteur au muscle

La moelle épinière est l'organe de passage obligatoire des informations motrices en provenance du cortex. Les messages nerveux moteurs efférents (qui vont du système nerveux central vers les muscles) circulent dans des faisceaux de neurones jusqu'aux motoneurones médullaires. Il s'agit des mêmes motoneurones que ceux qui sont impliqués dans la réalisation du réflexe myotatique.

Un motoneurone reçoit donc différents messages nerveux en provenance du cerveau et des neurones sensoriels. Il intègre ces messages et élabore un message nerveux : on

dit qu'il traite les informations.

Une fibre musculaire est connectée à un seul motoneurone. Elle répond au message nerveux en provenance du motoneurone par une contraction plus ou moins intense et plus ou moins longue.

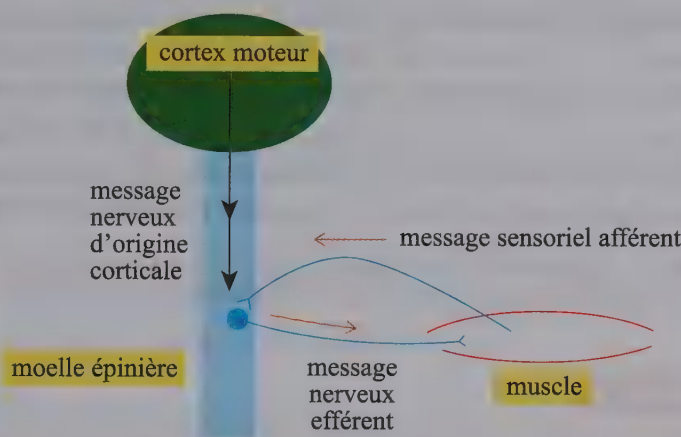


Figure 15.4 – Trajet des messages nerveux du cortex au muscle

À RETENIR

Les contractions musculaires volontaires à l'origine des mouvements sont dues à la création et à la circulation de messages nerveux depuis des aires corticales motrices situés dans le lobe frontal du cerveau. Il existe plusieurs aires motrices, de rôle différent. Des faisceaux de neurones envoient les messages jusqu'aux motoneurones.

Voir exercices 1 et 4.

Motricité et plasticité cérébrale

4.1 Rôle de l'apprentissage dans la construction de la carte motrice d'un individu

La comparaison de la localisation du cortex moteur de plusieurs individus montre une similitude globale : il y a donc une composante innée. Cependant, il existe des différences de cartes motrices entre les individus. Ces différences s'acquièrent au fil du temps en fonction de l'environnement : elles sont dues à l'entraînement physique, l'apprentissage de gestes etc. Elles témoignent des capacités d'organisation des neurones corticaux durant toute la vie. On appelle plasticité cérébrale les mécanismes par lesquels le cerveau est capable de se modifier sous l'influence de facteurs extérieurs.

4.2 Le support de la plasticité du cortex

La modification d'organisation du cortex est liée en grande partie à un remodelage des connexions synaptiques. Des neurones du cortex moteur non sollicités par la commande d'un muscle à la suite d'une amputation par exemple sont réaffectés à d'autres parties du corps ou d'autres fonctions. L'extension d'une zone affectée à la commande d'une partie du corps à la suite d'un entraînement par exemple implique l'augmentation du nombre de connexions synaptiques entre les fibres efférentes et les muscles.

Les capacités de remaniement du cortex existent tout au long de la vie d'une personne. Elles expliquent les possibilités de récupération de motricité après une lésion d'une petite partie du cortex moteur, à la suite d'un accident vasculaire cérébral par exemple.

Cependant, la plasticité cérébrale diminue avec l'âge à cause de la diminution du nombre de neurones et des possibilités de remaniement des connexions synaptiques.

➔ À RETENIR

L'expérience individuelle due à l'apprentissage moteur ou à d'éventuelles lésions modifie l'organisation du cortex moteur de chaque personne. Ces remaniements sont rendus possibles grâce à la propriété de plasticité cérébrale. Ils rendent possibles des récupérations totales ou partielles de fonction après des lésions.

Voir exercices 2, 3, 5, 6.

1 Vérification des connaissances

5 min

→ énoncé
p. 327

Au cours de lésions dues à un accident ou d'expériences réalisées sur des mammifères, on a constaté les résultats indiqués ci-dessous. Expliquez chacun d'eux brièvement.

- 1** Des mammifères auxquels on a enlevé l'enveloppe externe de l'encéphale ne présentent plus d'activité motrice volontaire.
- 2** L'ablation de la région corticale des deux hémisphères en avant de la scissure de Rolando provoque la paralysie.
- 3** L'ablation de cette même région du seul côté droit entraîne la paralysie de la moitié gauche du corps.

2 V/F Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 327

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

- 1** L'homoncule :
 - a** est semblable à la carte motrice des autres espèces
 - b** montre des zones de projection proportionnelles aux surfaces corporelles réelles
 - c** représente l'homme en se basant sur l'importance des zones commandées dans le cortex moteur
- 2** La plasticité du cortex moteur :
 - a** est prouvée par le remodelage du cortex à la suite de la répétition d'un comportement
 - b** est prouvée par le remodelage du cortex à la suite d'expériences d'amputation
 - c** a pour support la création de nouveaux neurones dans le cortex

3 V/F Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 327

Répondez par vrai ou faux et justifiez :

- 1** Le cortex moteur d'un individu a une organisation très précise et immuable
 - a** vrai
 - b** faux
- 2** Chaque région du corps est commandée par une zone du cortex moteur
 - a** vrai
 - b** faux
- 3** L'ablation d'un muscle chez un animal a pour effet d'augmenter la surface des zones corticales correspondantes
 - a** vrai
 - b** faux

4 Cortex moteur – Réflexe

★★★

25 min

→ corrigé
p. 327

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	Accru	Diminué
Tonus	Accru	Diminué

Tableau 15.1 – Les symptômes des troubles moteurs liés à la sclérose latérale amyotrophique

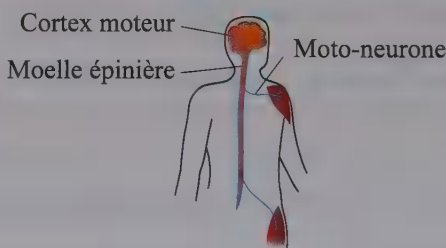


Figure 15.5 – Schéma à compléter présentant le circuit neuronique de la commande volontaire du mouvement

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.

5 Cortex moteur – apprentissage



20 min

→ corrigé
p. 330

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.

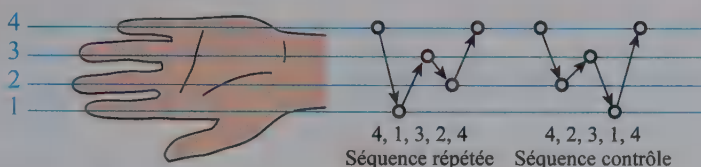


Figure 15.6 – Séquence de mouvements des doigts réalisés au cours de l'expérience

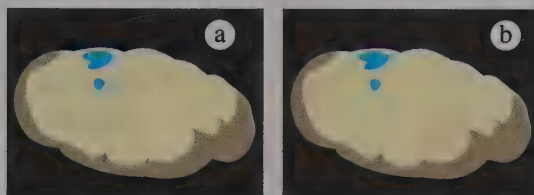


Figure 15.7 – Résultats obtenus par imagerie cérébrale montrant les zones corticales activées le premier jour de l'entraînement (a : 4, 1, 3, 2, 4 ; b : séquence contrôle)

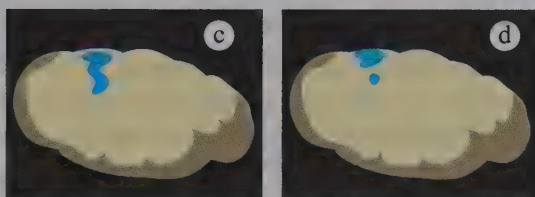


Figure 15.8 – Résultats obtenus par imagerie cérébrale montrant les zones corticales activées à la fin des trois semaines d'apprentissage (c : 4, 1, 3, 2, 4 ; d : séquence contrôle)

Quelles informations et conclusions peut-on tirer de cette expérience ?

1. Diviser : 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. Lier : faire une synthèse des observations de manière à répondre à la problématique de départ (mécanismes neuronaux d'apprentissage).

6 Cortex frontal – apprentissage



15 min

corrigé
p. 331

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

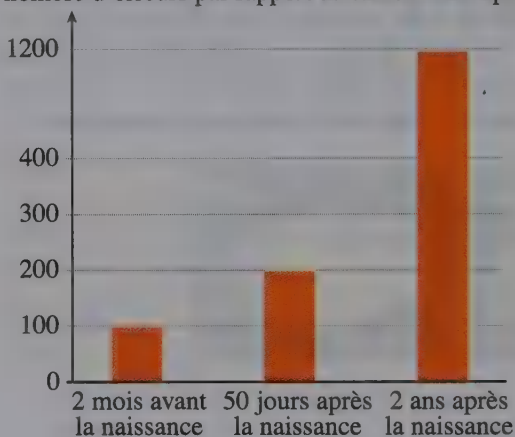


Figure 15.9 – Comparaison des performances des singes de même âge, opérés (ablation du cortex frontal) deux mois avant la naissance, 50 jours après la naissance et deux ans après la naissance, dans un test d'apprentissage

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.

nombre moyen d'erreurs



Figure 15.10 – 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.

1 QCM Vérification des connaissances→ énoncé
p. 323

- 1 L'enveloppe externe de l'encéphale est le cortex. On sait qu'une partie du cortex, le cortex moteur, est responsable de la commande volontaire des mouvements.
- 2 La zone corticale située dans le lobe frontal en avant de la scissure de Rolando contrôle la motricité : c'est l'aire motrice primaire.
- 3 La commande motrice est latéralisée : le cortex moteur primaire droit commande les mouvements de la partie gauche du corps. On dit qu'il y a décrossation.

2 V/F Vérification des connaissances→ énoncé
p. 323

- 1 Affirmations inexactes = **a** et **b**.

Rectifications :

a L'homoncule est différent (et non semblable à) de la carte motrice des autres espèces.

b L'homoncule montre des zones de projection (proportionnelles) disproportionnées par rapport aux surfaces corporelles réelles.

- 3 Affirmation inexacte = **c**.

Rectification :

c La plasticité du cortex moteur a pour support la création de nouvelles connexions synaptiques (et non nouveaux neurones) dans le cortex.

3 V/F Vérification des connaissances→ énoncé
p. 323

- 1 Faux : l'organisation du cortex moteur n'est pas immuable. On assiste à un remodelage du cortex dicté par l'expérience de l'individu.
- 2 Vrai : cette représentation s'appelle l'organisation somatotopique du cortex.
- 3 Faux : l'ablation d'un muscle chez un animal a au contraire pour effet de restreindre la surface des zones corticales correspondantes.

4 Cortex moteur – Réflexe→ énoncé
p. 323

Lycée Hoche, Versailles

MÉTHODE

La réponse attendue à cet exercice est essentiellement sous forme de schémas. Il est cependant vivement conseillé d'écrire au brouillon toutes les informations apportées par l'énoncé en distinguant le cas normal du cas pathologique.

On ajoute sur le schéma les neurones pyramidaux qui proviennent du cortex et projettent dans la moelle épinière ; on peut penser qu'ils établissent des synapses avec les motoneurones. On sait également que les neurones sensitifs en T transportent des messages nerveux depuis le fuseau neuro-musculaire jusqu'aux motoneurones commandant la contraction du muscle.

Les troubles périphériques sont dus, d'après l'énoncé, à l'atteinte des motoneurones. On sait que ces neurones sont directement responsables du raccourcissement des cellules musculaires. Leur absence empêche la contraction des muscles. Cela explique la faiblesse musculaire et la diminution du réflexe et du tonus. La faible contraction musculaire provoque l'atrophie des muscles.

Les troubles moteurs centraux sont liés, d'après l'énoncé, à la perte des neurones pyramidaux. La faiblesse musculaire montre que ces neurones commandent la contraction musculaire. Cela confirme qu'ils sont connectés aux motoneurones et stimulent leur activité nerveuse.

Il n'y a pas d'atrophie musculaire et les réflexes et le tonus sont augmentés : on comprend que les neurones pyramidaux ont également une activité inhibitrice sur les motoneurones. L'intégration par le motoneurone des messages inhibiteurs et des messages sensitifs des neurones en T crée une réponse du motoneurone moins importante qu'en l'absence des messages inhibiteurs. Cela explique pourquoi les réflexes et le tonus sont augmentés en l'absence des neurones pyramidaux : seuls les neurones sensitifs envoient des messages stimulateurs aux motoneurones.

Remarque : il est très peu probable que le même neurone (pyramidal) puisse envoyer à la fois des messages stimulateurs et des messages inhibiteurs à un autre neurone (le motoneurone). On doit faire l'hypothèse que le neurone pyramidal a des synapses avec un autre type de neurone, qui lui, envoie des messages inhibiteurs au motoneurone.

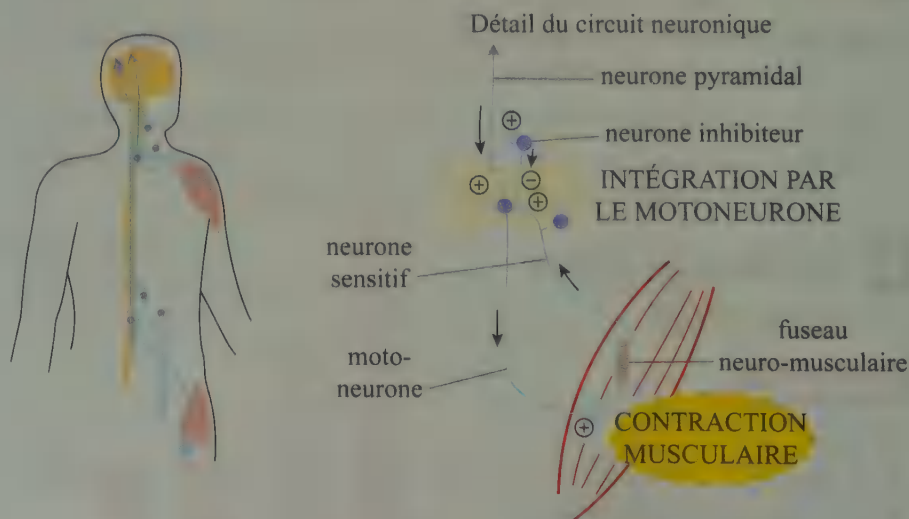


Figure 15.11 – Schéma complété en fonction des informations et de nos connaissances dans le cas d'un individu non atteint

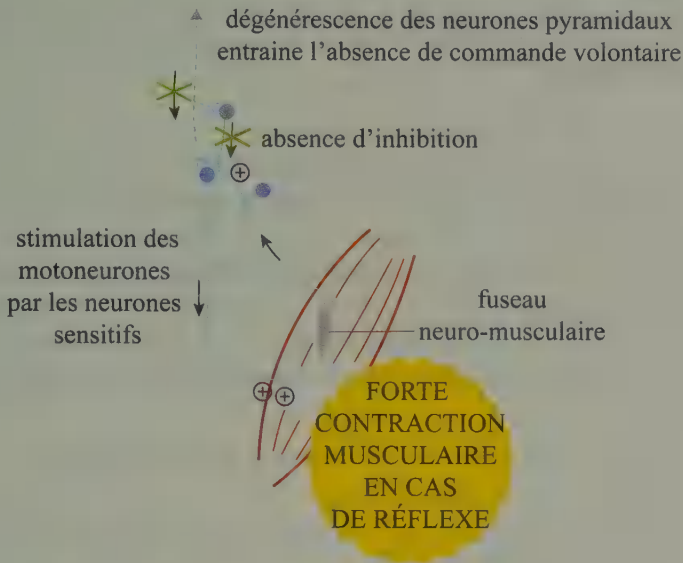


Figure 15.12 – Cas du fonctionnement du circuit neuronique en cas d'atteinte centrale

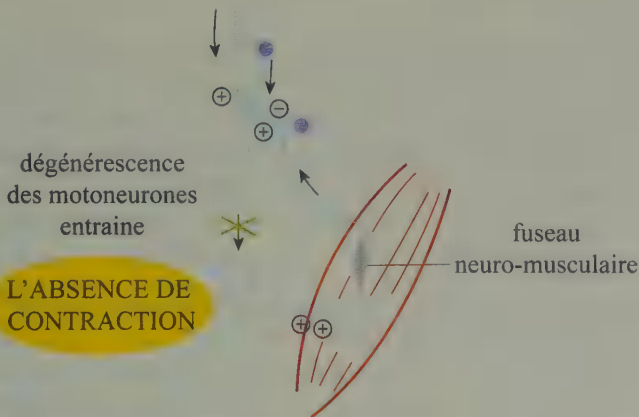


Figure 15.13 – Cas du fonctionnement du circuit neuronique en cas d'atteinte périphérique

5 Cortex moteur – apprentissage

énoncé
p. 324

Lycée Hoche, Versailles

- Le fait de faire réaliser une commande motrice sans que la personne regarde montre qu'on veut étudier la commande motrice de la main sans qu'il n'y ait d'interférence avec la vision. On s'intéresse à la main non dominante, c'est-à-dire la main la moins entraînée et la moins agile. Cela permettra de constater de manière plus nette une amélioration des capacités motrices. On compare les résultats obtenus pour cette main avec la réalisation d'une autre séquence non répétée. La différence est uniquement la répétition ou non de la séquence pendant 3 semaines. On pourra ainsi voir l'effet de la répétition donc de l'apprentissage moteur sur l'activité cérébrale.

L'expérience cherche à tester l'hypothèse selon laquelle l'apprentissage modifie l'activité cérébrale.

La comparaison de l'activité corticale entre les quatre situations montre des résultats identiques dans les cas a, b et d :

Résultats comparés Analyse des résultats	a - b	a - c	b - d	c - d
Facteur variant entre les deux situations	Type de séquence réalisée par la main non dominante : apprise ou non apprise	Moment de l'acquisition : au début ou à la fin de l'apprentissage	Moment de l'acquisition : au début ou 3 semaines plus tard (pas d'apprentissage)	Type de séquence réalisée par la main non dominante : apprise ou non apprise
Résultats	Activité cérébrale identique	Augmentation de l'activité cérébrale	Activité cérébrale identique	Activité cérébrale plus importante avec apprentissage

- Une zone corticale précise est à l'origine de la commande motrice des doigts et permet d'effectuer des mouvements. Cette zone a la même localisation et la même extension quelle que soit la séquence réalisée au début de l'apprentissage. Cependant, on note une évolution de la zone corticale activée dans le cas où la séquence est répétée pendant 3 semaines : la zone corticale a la même position mais elle est plus étendue que quand la séquence n'a pas été apprise.

On peut en conclure que davantage de neurones corticaux sont sollicités pour effectuer une séquence de mouvements des doigts quand le geste a été appris. L'apprentissage a donc créé de nouveaux réseaux de neurones.

6 Cortex frontal – apprentissage

→ énoncé
p. 325

Lycée Saint Michel de Picpus, Paris

1. On observe que chez des singes de même âge ayant tous subi une ablation du cortex frontal, plus l'ablation du cortex frontal est réalisée précocement, plus le nombre d'erreurs commises lors d'un test d'apprentissage est faible : par exemple, le singe opéré 50 jours après la naissance a commis 200 fois plus d'erreurs que le témoin non opéré alors que le singe opéré 2 ans après la naissance a commis 1200 fois plus d'erreurs que le témoin non opéré.

On sait qu'il existe une plasticité cérébrale. On peut penser que dans le cas de l'ablation précoce du cortex frontal, il y a eu une compensation : la zone fonctionnelle manquante a pu être recréée en un autre secteur du cortex cérébral.

2. On observe que les rats du groupe B (ayant subi une lésion corticale et fortement stimulés) commettent environ deux fois plus d'erreurs que les rats du groupe A (pseudo-opérés et fortement stimulés) alors que les rats du groupe D (ayant subi une lésion corticale et faiblement stimulés) commettent environ 3 fois plus d'erreurs que les rats du groupe C (pseudo-opérés et faiblement stimulés). Les rats du lot B sont donc plus performants que ceux du lot D alors que les deux lots ont subi la lésion corticale. La seule différence entre ces deux lots est que le lot B a été placé dans un milieu fortement stimulant alors que le lot D a été placé dans un milieu pauvre en stimulations. Cela montre qu'un environnement riche en stimulations a amélioré la capacité de récupération des rats ayant subi une lésion du cortex. Cette étude souligne l'influence de l'environnement sur le remodelage du cortex à la suite d'une lésion.

Energie et cellule vivante (spécialité)

Plan du chapitre

1. Introduction
2. La photosynthèse des cellules chlorophylliennes
3. L'ATP, molécule à rôle majeur dans les couplages énergétiques dans toutes les cellules
4. Le renouvellement de l'ATP dans les cellules par la respiration cellulaire
5. Fermentation et renouvellement d'ATP dans certaines cellules

1 Introduction

Une cellule est caractérisée, entre autres, par sa capacité à échanger de la matière avec le milieu extérieur. Elle maintient son organisation interne, réalise des synthèses et conserve un milieu interne de composition différente de l'extérieur grâce à de l'énergie. On s'intéresse dans ce chapitre aux cellules eucaryotes uniquement.

? PROBLÉMATIQUE

De quelle manière une cellule eucaryote se procure-t-elle l'énergie nécessaire à son fonctionnement ?

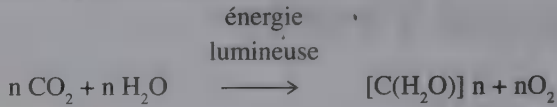
2 La photosynthèse des cellules chlorophylliennes

Les producteurs primaires que sont les plantes vertes consomment le dioxyde de carbone (CO_2) ou les ions hydrogénocarbonates pour les végétaux aquatiques, et l'intègrent à la matière organique. Cette réaction qui se réalise sous l'action de la lumière s'appelle la photosynthèse et dégage du dioxygène.

Elle nécessite un apport de carbone, d'eau (et d'ions minéraux pour la synthèse de molécules autres que les glucides). Le carbone dans la matière organique est à l'état réduit, ce qui signifie qu'il faut fournir de l'énergie pour qu'il y soit intégré. L'énergie

est apportée par les photons de la lumière. En effet, un végétal placé en permanence à l'obscurité ne se développe pas, même si on lui fournit de l'eau, du CO_2 et des ions minéraux.

L'équation globale de la photosynthèse est :



? PROBLÉMATIQUE

Quels sont les processus permettant aux végétaux chlorophylliens d'utiliser l'énergie lumineuse pour la synthèse de leurs molécules organiques ?

2.1 Arrivée des matières premières dans la cellule végétale chlorophyllienne

Les feuilles sont les organes de la photosynthèse. Elles sont constituées d'un tissu chlorophyllien ou parenchyme. La face supérieure comprend le parenchyme palissadique avec des cellules chlorophylliennes jointives. La face inférieure comprend le parenchyme lacuneux avec des cellules chlorophylliennes séparées et des vaisseaux conducteurs de sève. L'épiderme de la feuille, en particulier l'épiderme inférieur comporte des stomates : structure formée de deux cellules stomatiques entourant un espace. Le CO_2 atmosphérique entre dans la feuille par les stomates et circule dans la feuille entre les cellules du parenchyme lacuneux. L'eau arrive par les vaisseaux conducteurs de sève brute depuis les racines (voir chapitre 5).

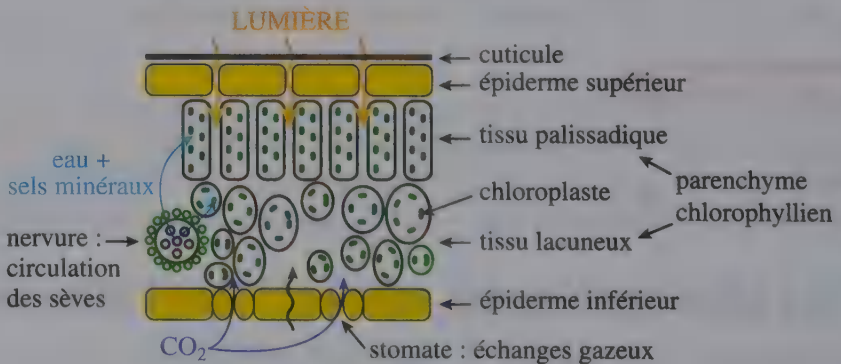


Figure 16.1 – L'entrée des matières premières nécessaires à la photosynthèse dans une feuille en coupe transversale

2.2 La phase photochimique de la photosynthèse

C'est l'ensemble des étapes de la photosynthèse nécessitant directement de la lumière pour avoir lieu.

2.2.1 Action de la lumière sur les pigments photosynthétiques des chloroplastes

a) Qu'est-ce qu'un chloroplaste ?

Les chloroplastes sont des organites des cellules chlorophylliennes. Ils doivent leur couleur à la présence de pigments. Ils sont riches en enzymes. Ils contiennent un liquide appelé stroma, délimité par une double membrane, et des sacs de forme aplatis appelés thylakoïdes.

Les thylakoïdes peuvent s'empiler en granum. L'espace intrathylakoïdal est clos et la membrane porte des complexes enzymatiques appelés sphères pédonculées. Le chloroplaste contient dans son stroma des grains d'amidon lorsque le végétal est placé à la lumière.

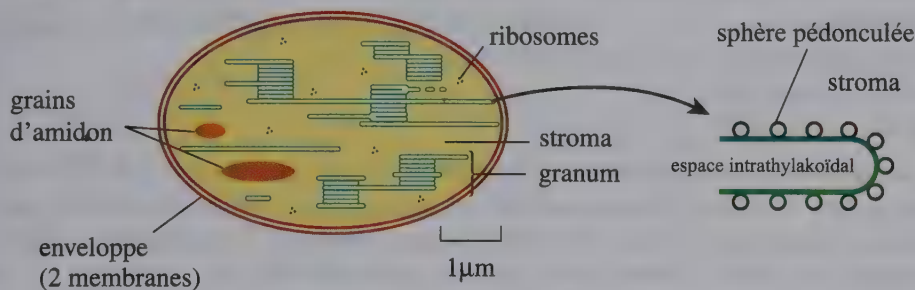


Figure 16.2 – Organisation d'un chloroplaste

b) Rôle des pigments photosynthétiques des thylakoïdes

Lors de la photosynthèse, les chloroplastes contenus dans les cellules du tissu chlorophyllien transforment l'énergie lumineuse (soleil) en énergie chimique contenue dans les molécules organiques $[C(H_2O)]_n$.

Cependant, la photosynthèse n'est pas aussi efficace dans toutes les radiations. On évalue l'activité photosynthétique par mesure de la production de dioxygène pour différentes longueurs d'onde : c'est le spectre d'action de la lumière sur un végétal.

Ce spectre correspond physiquement à une absorption différente selon la longueur d'onde par le végétal. Ainsi la majorité des végétaux ont une activité photosynthétique maximale dans les radiations rouges (environ 450 nm), avec un deuxième maximum dans les bleus (environ 660 nm). Il y a une bonne corrélation entre le spectre d'action de la lumière et le spectre d'absorption par les pigments photosynthétiques.

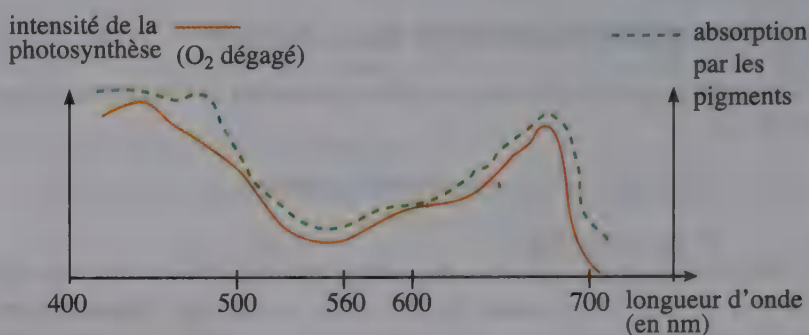


Figure 16.3 – Spectre d'action de la lumière comparé au spectre d'absorption de la lumière par les pigments photosynthétiques d'une feuille

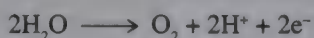
On différencie les pigments photosynthétiques contenus dans une feuille verte par chromatographie. Les constituants se séparent et migrent plus ou moins loin selon leur solubilité dans un solvant. La plupart des végétaux contiennent trois types de pigments :

- les chlorophylles : a et b, de couleur verte ;
- les xanthophylles ;
- les caroténoïdes.

Les pigments photosynthétiques sont regroupés dans la membrane des thylakoïdes en de gros complexes pigment-protéine : les photosystèmes. La lumière constitue un apport énergétique : les photons sont captés par les pigments et permettent à la chlorophylle de réaliser la photolyse de l'eau (voir paragraphe suivant).

2.2.2 Création d'ATP et de coenzymes réduits

Cette phase désigne tous les processus nécessitant directement un apport de lumière. Le dioxygène dégagé provient de l'oxydation de l'eau (photolyse de l'eau) selon l'équation :



Cette réaction ne se déroule pas spontanément. Elle est rendue possible par l'énergie captée par les pigments photosynthétiques. Elle ne se déroule pas seule et nécessite un couplage avec une autre réaction : les protons et électrons produits sont captés par un oxydant R appelé coenzyme. Cet oxydant passe donc à l'état réduit RH_2 . Le bilan est une réaction d'oxydoréduction :



Grâce à l'enzyme ATP synthétase des sphères pédonculées de la membrane des thylakoïdes, il y a également synthèse de molécules d'ATP (adénosine triphosphate), qui constituent des intermédiaires énergétiques utiles pour la phase chimique (voir paragraphe 3.1 pour le détail sur l'ATP). Cette synthèse est rendue possible par le passage des protons à travers les sphères pédonculées. En effet la différence de concentration en protons entre l'intérieur et l'extérieur des thylakoïdes les fait naturellement sortir du thylakoïde et l'énergie libérée à cette occasion est utilisée pour la synthèse d'ATP.

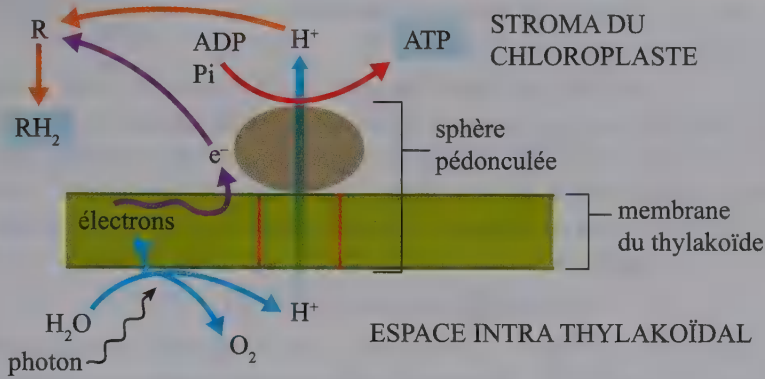


Figure 16.4 – Synthèse d'ATP et de coenzymes réduits lors de la phase photochimique de la photosynthèse

2.3 La phase chimique de la photosynthèse

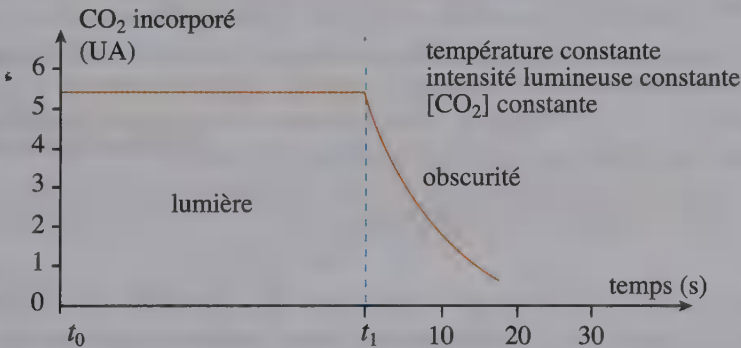


Figure 16.5 – Incorporation du CO_2 à la lumière et à l'obscurité par un végétal

Du dioxyde de carbone continue à être incorporé à des molécules organiques comme le glucose pendant quelques instants après le passage à l'obscurité. Ce processus est donc dépendant de la lumière puisqu'il finit par s'arrêter, mais il n'en dépend pas directement. Il constitue la phase chimique de la photosynthèse.

PROBLÉMATIQUE

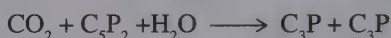
Comment se fait le lien entre les deux phases de la photosynthèse ?

2.4 Couplage entre la phase photochimique et la phase chimique de la photosynthèse

La phase chimique se déroule dans le stroma des chloroplastes comme le montre les

expériences de localisation de la radioactivité des molécules organiques après la fourniture de CO_2 avec du carbone radioactif ^{14}C .

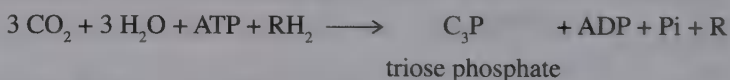
Lors de la phase photochimique, des molécules d'ATP et de coenzymes réduits sont formées dans le stroma. Le CO_2 issu de l'atmosphère est incorporé dans une molécule à cinq atomes de carbone : le ribulose 1,5-bisphosphate (symbolisé par C_5P_2). Cette molécule est le premier glucide à incorporer le carbone d'origine minéral. On obtient une molécule à 6 atomes de carbone, qui est scindée en deux molécules à trois atomes de carbones (des trioses) :



Cette équation est une réduction ; elle nécessite de l'énergie qui est fournie par l'hydrolyse de l'ATP en ADP et phosphate Pi ; elle nécessite également un gain d'électrons (un pouvoir réducteur) qui est fourni par les coenzymes réduits RH_2 . L'équilibre de la réaction nécessite l'hydrolyse d'une molécule d'eau. Cette réaction est catalysée par une enzyme, la ribulose 1-5 bisphosphate carboxylase oxygénase ou RuBisCO. Cette enzyme est la plus importante quantitativement dans le monde.

Les molécules de trioses servent :

- d'une part à régénérer le C_5P_2 qui est l'accepteur initial du CO_2 ;
- d'autre part à permettre à la cellule de réaliser d'autres synthèses de glucides, comme le saccharose (sucre à 12 atomes de carbone). Quand 3 molécules de CO_2 sont incorporées à 3 C_5P_2 , il se forme 6 trioses phosphate. Or seulement 5 trioses seront nécessaires à la régénération des 3 C_5P_2 . Le bilan est le suivant :



Le gain net est d'une molécule de C_3P pour trois CO_2 incorporés. Cet ensemble de réaction est appelé cycle de Calvin-Benson. Il n'est pas directement dépendant de la lumière mais est couplé avec les molécules produites lors de la phase photochimique (ATP et RH_2).

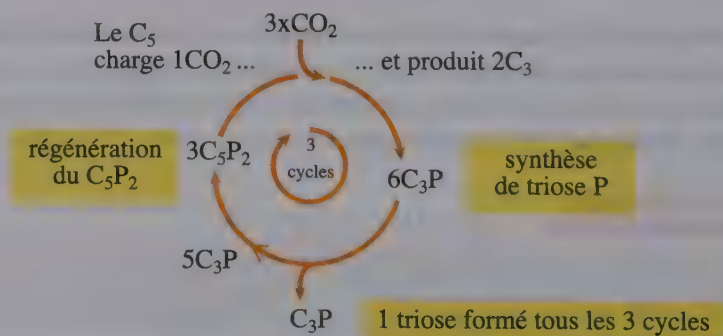


Figure 16.6 – La synthèse de molécules organiques lors de la phase chimique de la photosynthèse

➔ À RETENIR

La synthèse de molécules organiques à partir d'eau et de carbone minéral (dans le CO_2) qui caractérise la photosynthèse débute par la capture de photons par les pigments photosynthétiques de la membrane thylakoïdale. Cet apport énergétique permet la formation d'ATP, de coenzymes réduits, et accessoirement de dioxygène (non utile pour la suite). L'ATP et les coenzymes réduits permettent l'incorporation du carbone minéral (provenant du CO_2) à une molécule organique, le C_5P_2 . Il en résulte une synthèse de glucides et d'autres molécules organiques.

Voir exercices 1, 4 à 8.

■ L'ATP, molécule à rôle majeur dans les couplages énergétiques dans toutes les cellules

On sait que l'ATP est produit dans une cellule chlorophyllienne grâce à la photosynthèse et que son hydrolyse fournit l'énergie nécessaire aux synthèses organiques. Cette molécule effectue la liaison énergétique entre ces deux phases de la photosynthèse.

? PROBLÉMATIQUE

Quelle est la place de l'ATP dans le fonctionnement de toutes les cellules ?

3.1 Qu'est-ce que l'ATP ?

L'ATP (Adénosine triphosphate) est un nucléotide qui porte 3 groupements phosphate (H_2PO_3^-) sur le ribose. L'hydrolyse de la liaison entre les groupements phosphates libère une quantité importante d'énergie. Cette réaction est catalysée par une enzyme ATPase et produit de l'ADP et du phosphate inorganique Pi :



Cette réaction est réversible : la synthèse d'ATP par phosphorylation (ajout de Pi) à de l'ADP est catalysée par l'enzyme ATP synthétase et consomme de l'énergie :



3.2 Un exemple d'utilisation de l'ATP : la production d'énergie mécanique dans les fibres musculaires

Un muscle est formé de fibres musculaires, ou cellules musculaires. La contraction du muscle correspond au raccourcissement de ses fibres musculaires.

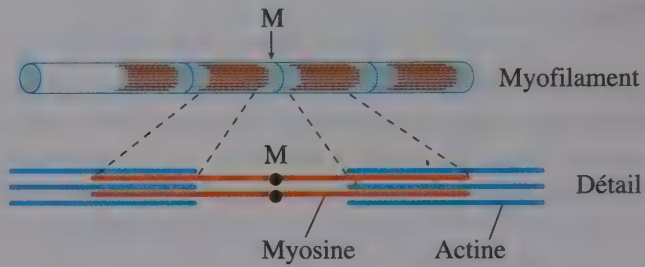


Figure 16.7 – Organisation du complexe actine-myosine dans une cellule musculaire

Les cellules musculaires contiennent des protéines contractiles : l'actine et la myosine. La myosine peut se lier à l'actine par sa tête. Cette tête, quand elle pivote, entraîne un glissement relatif des deux molécules l'une par rapport à l'autre, d'où le raccourcissement. Le fonctionnement du complexe actine-myosine consomme de l'ATP.

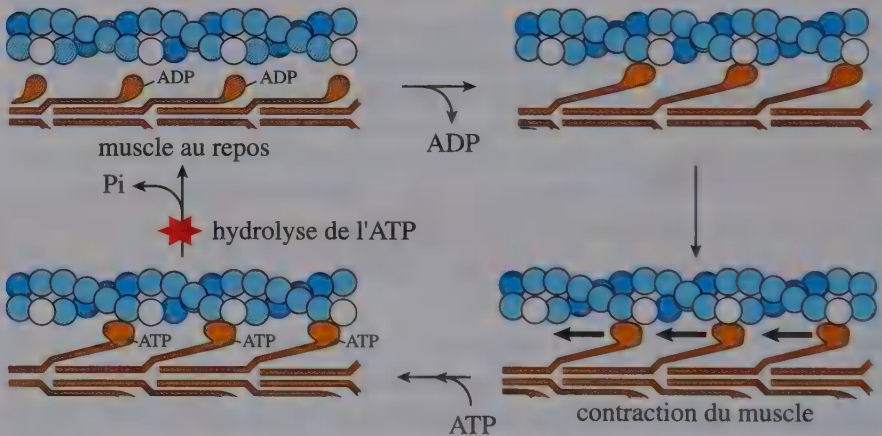


Figure 16.8 – Rôle du couple ATP-ADP dans la contraction musculaire

➔ À RETENIR

L'ATP est une molécule présente dans toutes les cellules du monde vivant. C'est un intermédiaire énergétique qui permet leur fonctionnement. Elle permet de convertir des énergies de nature différente (énergie chimique en énergie mécanique par exemple).

Voir exercices 9.

? PROBLÉMATIQUE

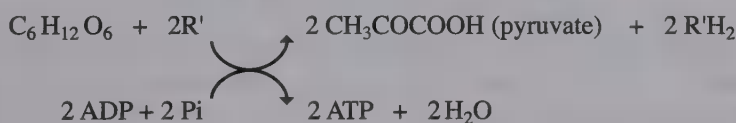
Il n'existe pas de réserves d'ATP. Cette molécule doit être renouvelée en permanence. Dans les cellules chlorophylliennes, la synthèse d'ATP est réalisée au cours de la photosynthèse. Comment les cellules animales et végétales hétérotrophes réalisent-elles leur synthèse d'ATP ?

Le renouvellement de l'ATP dans les cellules par la respiration cellulaire

Le renouvellement de l'ATP est réalisé dans quasiment toutes les cellules, y compris dans les cellules chlorophylliennes, grâce à la respiration. La respiration consiste en l'oxydation complète de molécules organiques avec libération d'énergie. Cette énergie permet la synthèse d'ATP à partir d'ADP et Pi.

4.1 Une première étape dans le cytoplasme : la glycolyse

La glycolyse est une série de réactions qui se déroulent dans le cytoplasme, catalysées par des enzymes appelées déshydrogénases. Au bilan, cette première étape de dégradation du glucose conduit à la formation de deux molécules à trois atomes de carbone : le pyruvate ou acide pyruvique, selon l'équation bilan suivante :



Une partie de l'énergie libérée par l'oxydation s'accompagne de la production de deux coenzymes réduits $\text{R}'\text{H}_2$ (proches des composés RH_2 fabriqués au cours de la photosynthèse). Ces réactions ne consomment pas de dioxygène.

L'autre partie de l'énergie utile permet aussi, par couplage enzymatique, la synthèse de deux molécules d'ATP par molécule de glucose oxydé en pyruvate.

4.2 Seconde étape : la respiration mitochondriale

4.2.1 Le déroulement

Le pyruvate entre dans la matrice de la mitochondrie (son espace interne) où il subit des décarboxylations (réactions irréversibles, le groupement carboxyle $-\text{COO}^-$ du pyruvate est retiré sous forme d'une molécule de CO_2). Ces réactions forment le cycle de Krebs. À chaque tour de cycle, deux atomes de carbone sont éliminés sous forme de CO_2 . Les déshydrogénations qui accompagnent le cycle de Krebs permettent la formation de quatre coenzymes réduits $\text{R}'\text{H}_2$ et d'un ATP par tour de cycle.

4.2.2 Synthèse d'ATP grâce aux coenzymes réduits $R'H_2$

La glycolyse cytoplasmique et la respiration mitochondriale permettent la création de 12 coenzymes réduits $R'H_2$ et de 4 ATP à partir d'une molécule de glucose.

Les coenzymes réduits sont oxydés dans les mitochondries. Observée en détail, la mitochondrie révèle une double membrane limitant un espace important entre la membrane externe lisse et la membrane interne, qui forme ce que l'on nomme des crêtes mitochondriales.

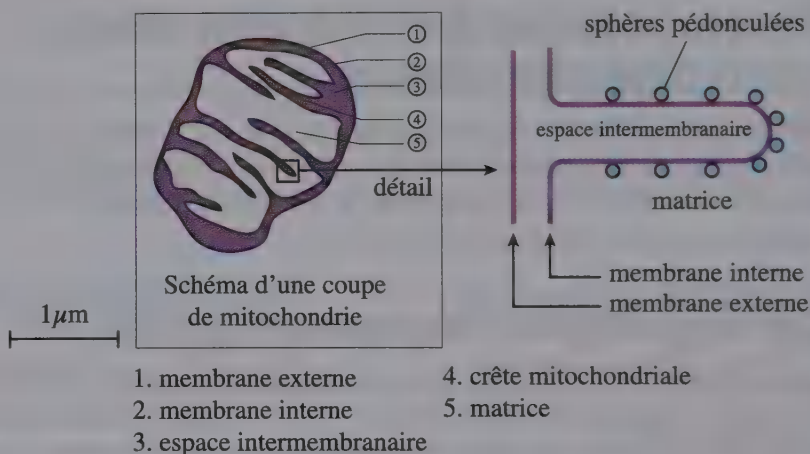


Figure 16.9 – Organisation d'une mitochondrie

La membrane interne porte des sphères pédonculées tournées vers la matrice mitochondriale. Comme dans le chloroplaste, ce sont des enzymes qui réalisent la synthèse d'ATP grâce à un flux de protons.

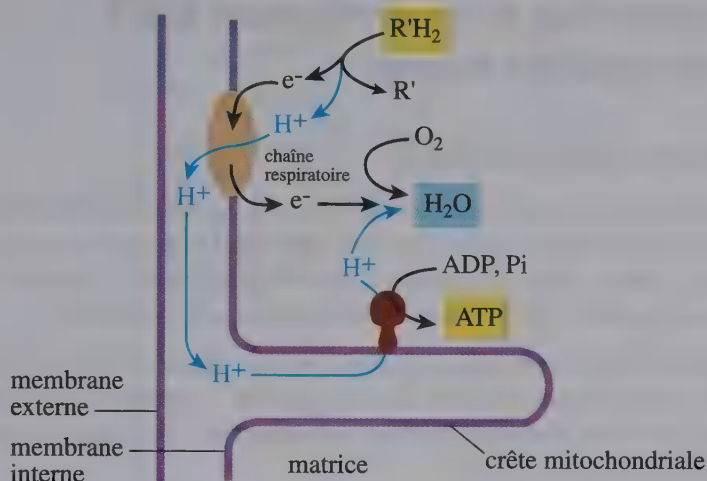
Une chaîne de transporteurs prend en charge les électrons et protons libérés. L'énergie libérée par les électrons permet la phosphorylation de 32 ADP, P_i en 32 ATP.

Cette chaîne de transfert d'électrons et de transport de protons est appelée chaîne respiratoire car l'accepteur final des électrons et des protons est le dioxygène présent dans la matrice :



Bilan de l'oxydation des coenzymes dans les crêtes mitochondriales :





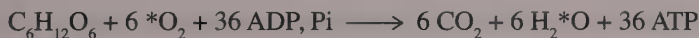
MITOCHONDRIE

Figure 16.10 – Production d'ATP grâce aux coenzymes réduits $R'H_2$

À RETENIR

La respiration est un ensemble de réactions biochimiques catalysées par des enzymes. Les molécules organiques sont minéralisées sous forme de dioxyde de carbone et d'eau. Dans le cas le plus fréquent, le substrat est une molécule de glucose. La respiration nécessite un accepteur d'électrons et de protons qui est le dioxygène. C'est donc un processus aérobie. Elle engendre une production de CO_2 , donc un retour du carbone à l'état oxydé.

Les réactions débutent dans le hyaloplasme et se terminent dans les mitochondries. Elles s'accompagnent de transferts d'énergie, d'électrons et de protons. Elles permettent la création intermédiaire de molécules de coenzymes réduits. Au final, grâce à la chaîne de transport d'électrons, un nombre important de molécules d'ATP est formé. La synthèse d'ATP résulte donc d'un processus d'oxydo-réduction.



Voir exercices 2, 3, 10 à 16.

5 Fermentation et renouvellement d'ATP dans certaines cellules

5.1 La fermentation alcoolique

La fermentation alcoolique est réalisée dans le cytoplasme des cellules par les Levures, par exemple *Saccharomyces cerevisiae*. Elle débute par la même étape que la respiration : la glycolyse. Elle correspond à l'oxydation incomplète du glucose après la glycolyse qui produit 2 ATP et 2 coenzymes réduits dans le cytoplasme.

Les coenzymes réduits sont à nouveau oxydés et ainsi régénérés par des réactions de dégradation incomplète du pyruvate. Dans le cadre de la fermentation alcoolique, on observe la production d'éthanol, molécule organique non totalement oxydée lors du processus de dégradation :



Il y a donc production de 2 molécules d'ATP seulement par fermentation et il reste des composés organiques.

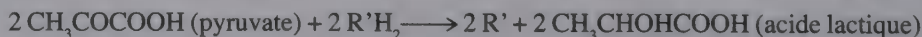
Cependant, une oxydation incomplète permet un renouvellement des intermédiaires métaboliques (ATP), ce qui autorise dans le cas de la fermentation alcoolique, une vie anaérobie (sans dioxygène).

5.2 La fermentation lactique des cellules musculaires

La fermentation lactique est réalisée dans le cytoplasme de cellules comme les bactéries *Lactobacillus*, et dans le cas des cellules eucaryotes, des cellules musculaires. Elle se déroule de la même façon que la fermentation alcoolique des levures, mais elle aboutit à un produit différent : l'acide lactique à la place de l'éthanol. Dans les deux cas, il s'agit d'une oxydation incomplète puisque le produit final est une molécule organique.

Dans le cas de la fermentation lactique, l'acide lactique est une molécule à trois atomes de carbone et il n'y a pas de production de CO_2 .

C'est un déchet du métabolisme qui doit être éliminé après un transport dans le sang.



La cellule musculaire dispose donc de deux voies métaboliques lui permettant de synthétiser de l'ATP. L'orientation vers l'une ou l'autre voie dépend de la quantité d' O_2 disponible et de l'équipement enzymatique de la cellule.

Voir la figure page suivante.

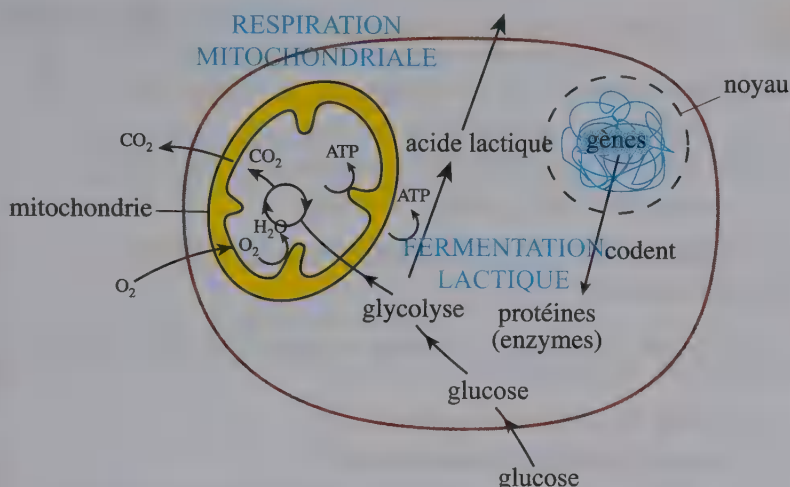


Figure 16.11 – Les deux voies métaboliques de production d'ATP dans la cellule musculaire

À RETENIR

La fermentation alcoolique chez les levures et la fermentation lactique chez certaines bactéries et les cellules musculaires des eucaryotes sont 2 processus qui se déroulent dans le cytoplasme des cellules. Dans les deux cas, il s'agit d'une oxydation incomplète puisque le produit final est une molécule (éthanol pour la fermentation alcoolique et l'acide lactique pour la fermentation lactique). Le bilan énergétique est la formation de 2 ATP et de 2 coenzymes réduits (lors de la glycolyse). Les réactions de la fermentation permettent la régénération des coenzymes oxydés nécessaires à la glycolyse.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

 corrigé
p. 365

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1** Le carbone présent dans la matière organique :
- a** est tantôt sous forme minérale tantôt sous forme organique
 - b** est sous forme de CO_2 dans les végétaux
 - c** existe dans toutes les molécules organiques à l'état réduit
 - d** provient du sol
- 2** Le dioxygène produit par les végétaux chlorophylliens lors de la photosynthèse :
- a** provient des atomes d'oxygène du CO_2
 - b** est partiellement rejeté dans l'atmosphère
 - c** est entièrement consommé par les végétaux pour leur respiration
 - d** est produit de jour comme de nuit
- 3** Les pigments photosynthétiques présents chez les végétaux :
- a** protègent les végétaux contre les rayons du soleil
 - b** absorbent les radiations lumineuses lors de la phase photochimique de la photosynthèse
 - c** sont des enzymes qui catalysent la synthèse des molécules organiques dans les cellules chlorophylliennes

2 QCM Vérification des connaissances

5 min

 corrigé
p. 365

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

- 1** L'ATP :
- a** est une molécule synthétisée uniquement dans les cellules chlorophylliennes
 - b** est un intermédiaire énergétique
 - c** est produit par le processus de respiration cellulaire
 - d** est indispensable à l'absorption de la lumière par les cellules chlorophylliennes
- 2** La glycolyse :
- a** est le premier processus cellulaire de production d'énergie à partir d'une molécule de glucose
 - b** se déroule dans les mitochondries
 - c** consomme des coenzymes réduits $\text{R}'\text{H}_2$

- 1** La respiration mitochondriale :
- a** est la suite de la glycolyse dans toutes les cellules
 - b** nécessite la consommation de O_2
 - c** se déroule entièrement dans l'espace intermembranaire de la mitochondrie
 - d** produit de l'acide lactique dans certaines cellules

3 Vérification des connaissances

10 min

→ corrigé
p. 365

Répondez brièvement aux questions suivantes :

- 1** Précisez le lien entre les deux phases de la photosynthèse (photochimique et chimique).
- 2** En quoi l'ATP est-il une molécule indispensable au fonctionnement cellulaire ?
- 3** Comparez la production d'ATP par respiration et par fermentation.

4 Photosynthèse – Echanges gazeux

★★

15 min

→ corrigé
p. 366

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 $^{16}O_2$ et du dioxygène lourd $^{18}O_2$. 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.

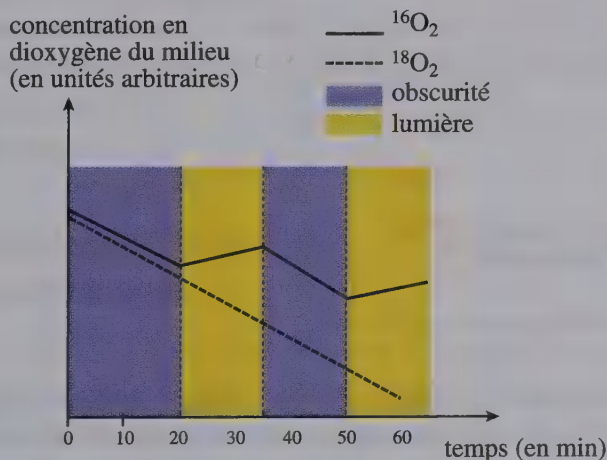


Figure 16.12 – Concentration en dioxygène $^{16}O_2$ et $^{18}O_2$ en fonction du temps et de l'éclairement

À partir des informations fournies par le document, expliquez comment on peut distinguer l'origine du dioxygène impliqué dans la respiration et la photosynthèse.

5 Photosynthèse

★★★

40 min

corrigé
p. 366

Lycée La Rochefoucauld, Paris

Les documents présentent la structure d'algues vertes unicellulaires : les Chlorelles, ainsi que des expériences effectuées sur ces dernières afin de déterminer les premières molécules organiques formées lors de la photosynthèse.

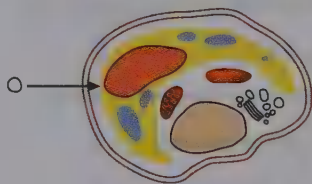


Figure 16.13 – Document A : ultrastructure d'une cellule de Chlorelle d'après une observation au microscope électronique

Document B : des Chlorelles fortement éclairées sont mises en présence de $^{14}\text{CO}_2$ pendant des temps variables. A 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 radiographiés.

O : position initiale de l'extrait

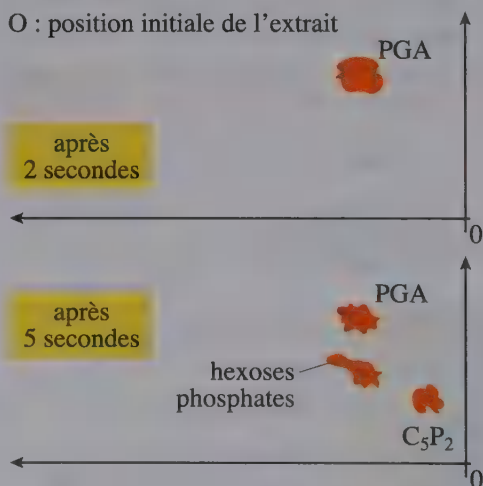


Figure 16.14 – Résultat des chromatographie et autoradiographie après culture sur milieu avec $^{14}\text{CO}_2$ (les hexoses sont des oses à 6 atomes de carbone)

Document C : on mesure les variations de concentration des molécules mises en évidence par la 1ère 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).

Voir figure à la page suivante.

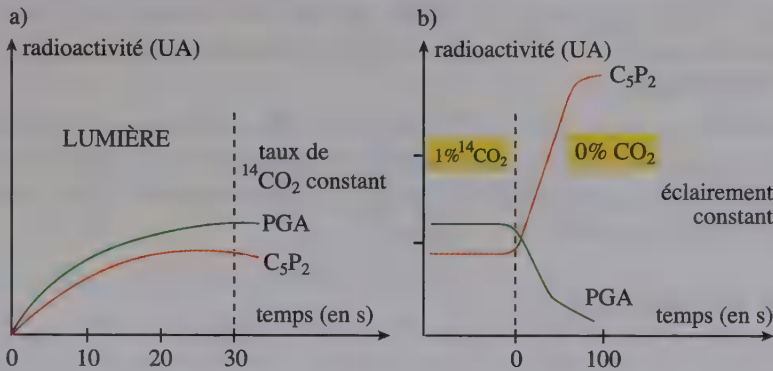


Figure 16.15 – Mesure de la radioactivité des molécules organiques produites à la lumière avec CO_2 tout le temps (a) et avec CO_2 pendant le début de l'expérience uniquement (b)

- 1 Identifiez l'organite O visible sur le document A, puis faites un schéma annoté de cet organite en indiquant où se déroule la synthèse des premières molécules organiques.
- 2 D'après la simple analyse des autoradiographies, dans quelle mesure peut-on préciser l'ordre de formation des 3 molécules organiques ?
- 3 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 que le PGA est une molécule à 3 atomes de carbone).
- 4 Pour quelle raison le C_5P_2 n'est-il pas visible sur le 1er chromatogramme ?
- 5 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).
- 6 Comment interprétez-vous l'évolution de ces taux lorsque l'on supprime le CO_2 (cas b) ?

6 Photosynthèse – Pigments

★★★

35 min

corrigé p. 367

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 vertes unicellulaires. A la suite d'une mutation, on a pu obtenir des chlorelles incolores. A 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.

Quantité de ^{32}P incorporé

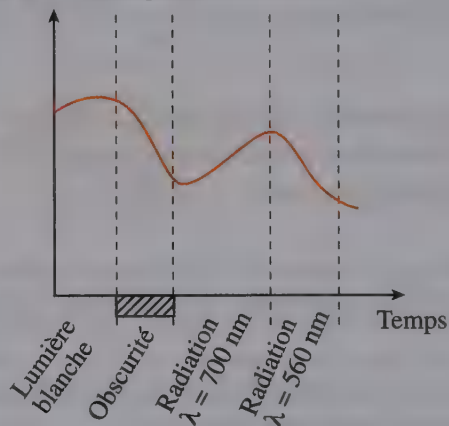


Figure 16.16 – Incorporation de ^{32}P dans l'ATP par une suspension de chloroplastes en fonction de l'éclairement

% absorption

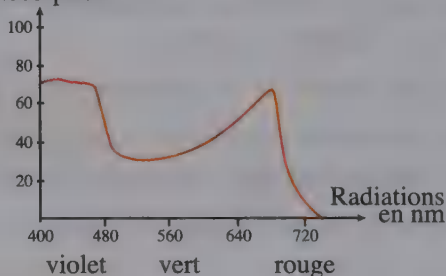


Figure 16.17 – Spectre d'absorption d'une suspension de chloroplastes

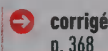
Document C : des expériences sont réalisées à partir de fragments de chloroplastes séparés en deux fractions :

- 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
2	Stroma laissé à l'obscurité	3500
3	Stroma laissé à l'obscurité et thylakoïdes ayant séjourné à la lumière	100 000

Tableau 16.25 – Résultats des expériences sur les conditions de la fixation du dioxyde de carbone dans les chloroplastes

7 Photosynthèse – biosynthèse



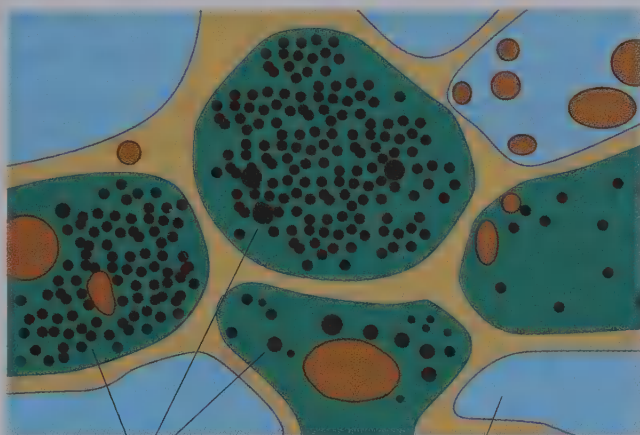
corrigé
p. 368

Lycée 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 16.18 – Schéma d'une électronographie d'une coupe d'écorce (non chlorophyllienne) d'un hévéa

Les cellules laticifères possèdent une enzyme particulière : la rubbertransférase-REF.

nombreuses
réactions

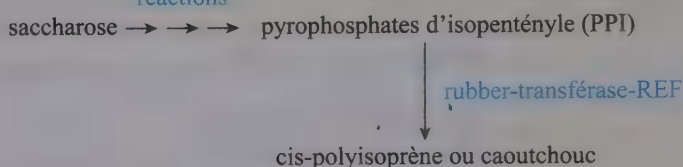


Figure 16.19 – Etapes simplifiées de la biosynthèse du caoutchouc

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.

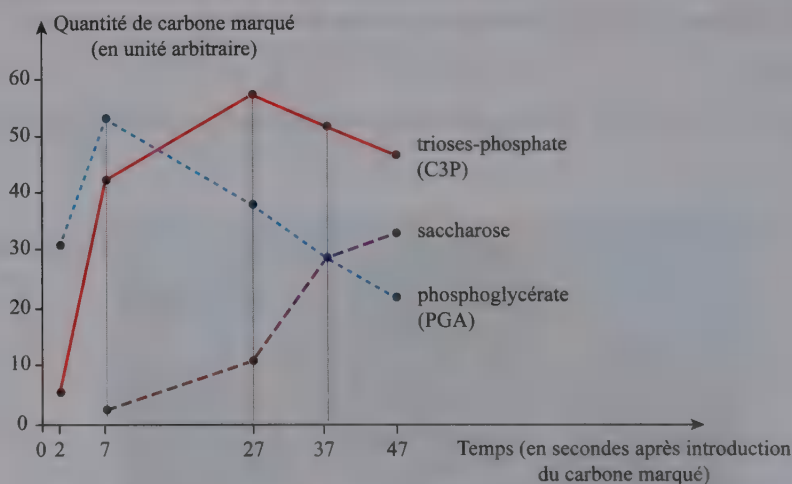


Figure 16.20 – Evolution au cours du temps de la radioactivité de molécules des cellules chlorophylliennes



Photosynthèse – Biocarburants



25 min



corrigé
p. 369

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).

A 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 les 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 7ème jour (J7), on mesure à l'aide d'un spectrophotomètre l'absorbance de la lumière des suspensions d'algues.

Absorbance en unités arbitraires	A la lumière		A 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 16.2 – 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)

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.

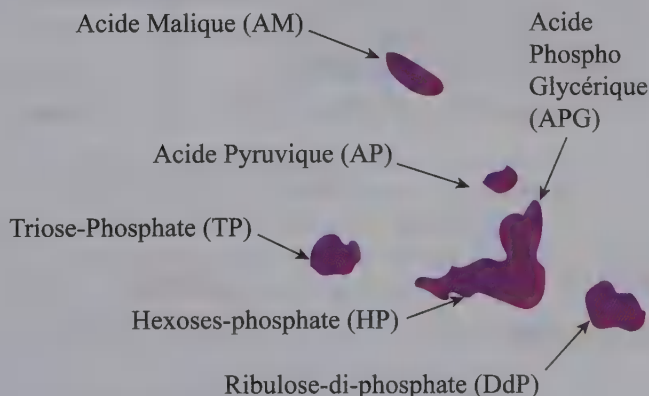


Figure 16.21 – Résultat de la chromatographie

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.

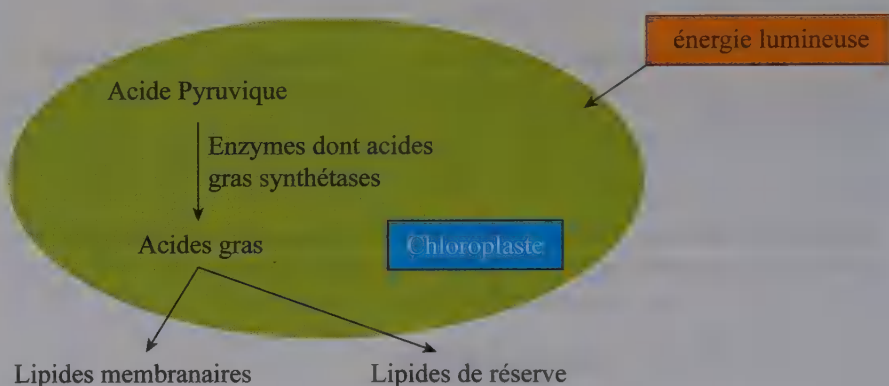


Figure 16.22 – Une voie de synthèse des lipides

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 16.3 – Document D : comparaison de la production de biocarburants de différentes cultures en fonction de la surface cultivée

9 Rôle de l'ATP



25 min

→ corrigé p. 370

Lycée Corot, Savigny/Orge

L'Euglène est une algue chlorophyllienne unicellulaire, vivant dans les eaux douces. Le mouvement de son flagelle, qui lui permet de se déplacer dans le milieu aquatique, est dû à l'interaction de protéines qui glissent les unes par rapport aux autres, un peu à la manière de l'actine et de la myosine. Le flagelle décrit une hélice, à la façon d'une

vis qui s'enfonce dans un support.

Document A : on observe l'Euglène au microscope électronique.



Figure 16.23 – Un organe X du cytoplasme (MET x 30 000)

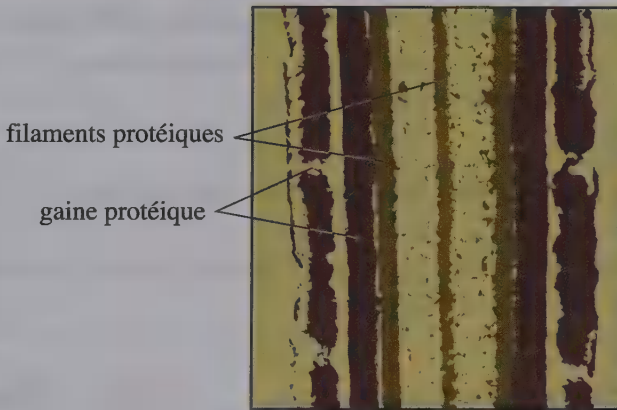


Figure 16.24 – Coupe longitudinale de flagelle (MET x 50 000)

Document B : on réalise plusieurs expériences.

- Incubés dans un milieu oxygéné contenant un substrat oxydable, de l'ADP et du P_i , les organites X permettent une oxydation du substrat, une consommation de dioxygène, d'ADP et de P_i et un dégagement de CO_2 .
- L'utilisation de poisons métaboliques comme le salyrgran et le cyanure, qui bloquent le fonctionnement des ATP synthétases ou le transfert d'électrons, aboutit à l'arrêt de tout mouvement du flagelle.
- On traite les organites X de façon à détacher les ATP synthétases présentes dans les membranes internes avant de replacer l'ensemble dans le même milieu d'incuba-

tion (expérience b). On constate que ces organites réalisent l'oxydation du substrat, consomment du dioxygène et dégagent du dioxyde de carbone. Par contre, les concentrations d'ADP et P_i ne varient pas.

d) On place les Euglènes à l'obscurité dans un milieu dépourvu de substrat oxydable, très vite les battements du flagelle cessent. Ils réapparaissent rapidement après le retour à la lumière.

- 1 Après avoir interprété chacun des résultats expérimentaux (a, b, c) et identifié les organites X, expliquez comment l'ATP est l'intermédiaire métabolique probable impliqué dans la mise en mouvement du flagelle chez les Euglènes.
- 2 Comment peut-on expliquer les résultats de l'expérience d ?

10 Production d'ATP – Respiration



10 min

→ corrigé
p. 371

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 ($^{18}O_2$) produisent de la vapeur d'eau contenant de l'eau avec ^{18}O .

Expliquez pourquoi :

- 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.

11 Production d'ATP – Respiration



25 min

→ corrigé
p. 371

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.

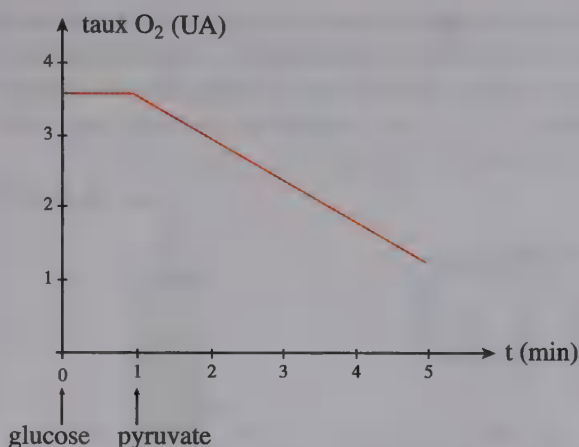


Figure 16.25 – Résultat des mesures du taux d'O₂ dans la suspension de mitochondries

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 ¹⁴C. On désigne ce glucose par la lettre G. Des prélèvements effectués aux temps t₀, t₁, t₂, t₃, t₄ permettent de noter l'apparition de nouvelles substances radioactives :

- du pyruvate (désigné par la lettre P) ;
- du dioxyde de carbone.

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 16.4 – Localisation et abondance des molécules dans le milieu extérieur et dans deux compartiments cellulaires en fonction du temps

12 Production d'ATP – Respiration



20 min

corrigé
p. 372

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.

À l'aide des deux expériences suivantes, précisez le rôle et le fonctionnement des sphères pédonculées, 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.

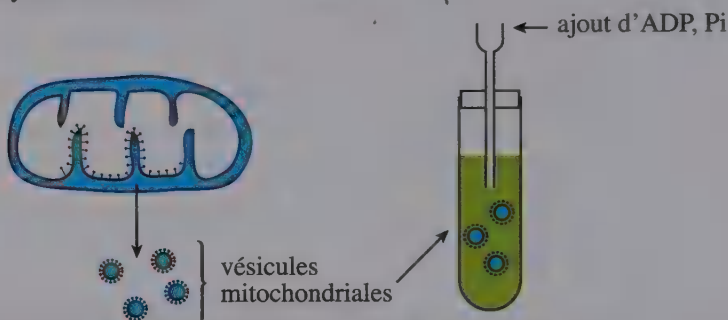


Figure 16.26 – Protocole de l'expérience

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 P_i , 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 16.5 – Suivi de la phosphorylation de l'ADP grâce aux vésicules selon les conditions de pH

13 Production d'ATP – Respiration



35 min

➔ corrigé p. 373

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.

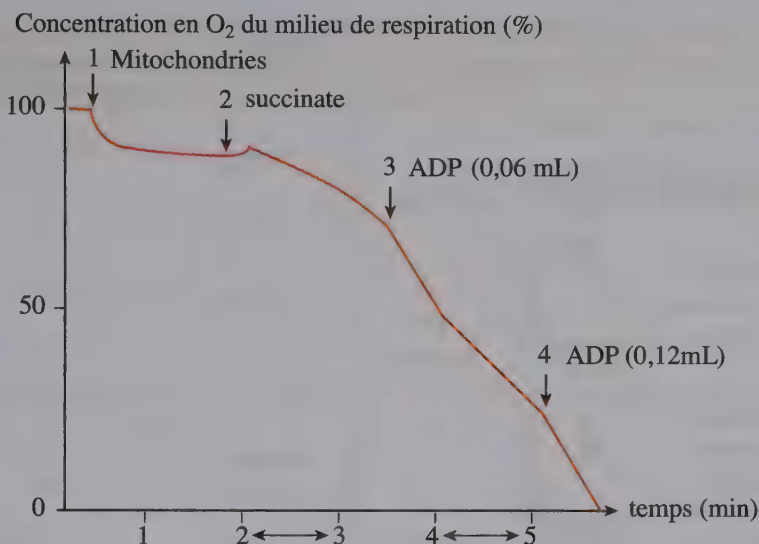


Figure 16.27 – Résultats obtenus pour la concentration en dioxygène au cours du temps

- 1 A partir des résultats expérimentaux, 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 A 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.

14 ATP – fermentation – respiration



15 min



corrigé
p. 374

Lycée Vieljeux, La Rochelle

Les expériences consignées dans le tableau sont réalisées sur des levures.

Voir la figure page suivante.

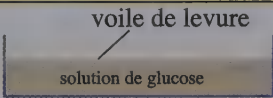
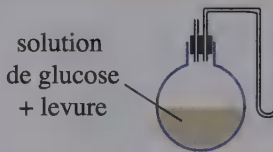
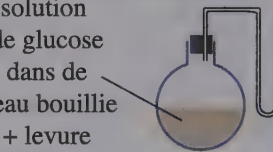
conditions expérimentales	présence d'éthanol	g de glucose consommé par g de levure formée
 voile de levure solution de glucose aérobiose	traces	4
 solution de glucose + levure air peu renouvelé	++++	25
 solution de glucose dans de l'eau bouillie + levure anaérobiose	+++++ +++++	176

Tableau 16.6 – Production d'éthanol et consommation de glucose par une solution de levures dans trois conditions expérimentales

- 1. Rappelez l'équation de la réaction de la fermentation alcoolique.
- 2. Expliquez la quantité d'éthanol présente dans chaque tube à la fin du processus.
- 3. Expliquez pourquoi les trois expériences montrent des rendements énergétiques très différents.

15 Fermentation



25 min

→ corrigé p. 375

Lycée Notre Dame du Grandchamp, Versailles

Au cours d'une autopsie, des résultats contradictoires sont observés dans le dosage de la concentration en éthanol d'échantillons de sang. On cherche à comprendre l'origine de cette anomalie.

À partir des informations extraites des documents mises en relation avec vos connaissances, rédigez un compte rendu médical expliquant l'évolution de la concentration en éthanol dans l'échantillon de sang A provenant de l'autopsie de Monsieur X.

Document A : Dosages effectués sur des échantillons de sang après une autopsie

Monsieur X, victime de malaises sur son lieu de travail, décède quelques heures après son hospitalisation. Une expertise médico-légale est demandée et une autopsie est effectuée.

Le médecin légiste procède à deux prélèvements sanguins (A et B). Les prélèvements parviennent au laboratoire six jours après l'autopsie et un dosage d'alcool (éthanol) est réalisé sur chacun des échantillons.

Les résultats étant discordants ($0,2 \text{ g.L}^{-1}$ dans A et 0 g.L^{-1} dans B), le dosage d'éthanol sur ces deux échantillons est poursuivi pendant une dizaine de jours.

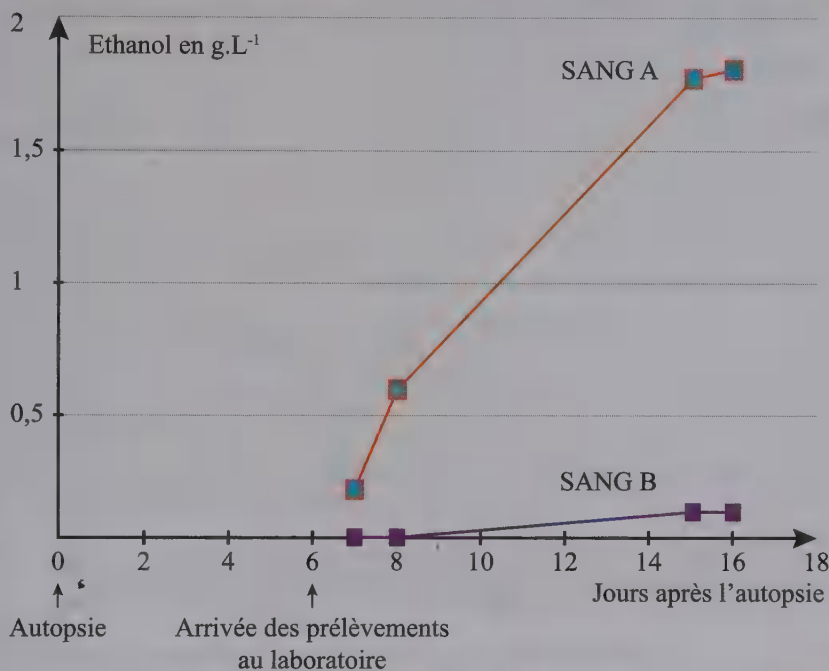


Figure 16.28 – Résultats des dosages d'éthanol dans le sang de Monsieur X en fonction du temps

Document B : recherche de micro-organismes dans les échantillons de sang A et B prélevés chez Monsieur X

Les échantillons de sang A et B ont été mis en culture afin de déterminer s'ils contiennent des micro-organismes.

Micro-organismes	Sang A	Sang B
Bactéries <i>Hafnia alvei</i>	présentes	absentes
Levures <i>Candida albicans</i>	présentes	absentes
Autres	absents	présentes

Tableau 16.7 – Type de micro-organismes présents dans les échantillons de sang

Ces micro-organismes se trouvent naturellement dans l'intestin humain (flore intestinale).

Remarque : le sang contient du glucose.

Document C : données sur le métabolisme des micro-organismes (d'après Banque de schéma, <http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt>)

Des cultures de levures dont le métabolisme est le même que celui de *Candida albicans* et *Hafnia alvei* ont été réalisées. On a mesuré l'évolution des concentrations en éthanol, glucose, O_2 et CO_2 au cours du temps.

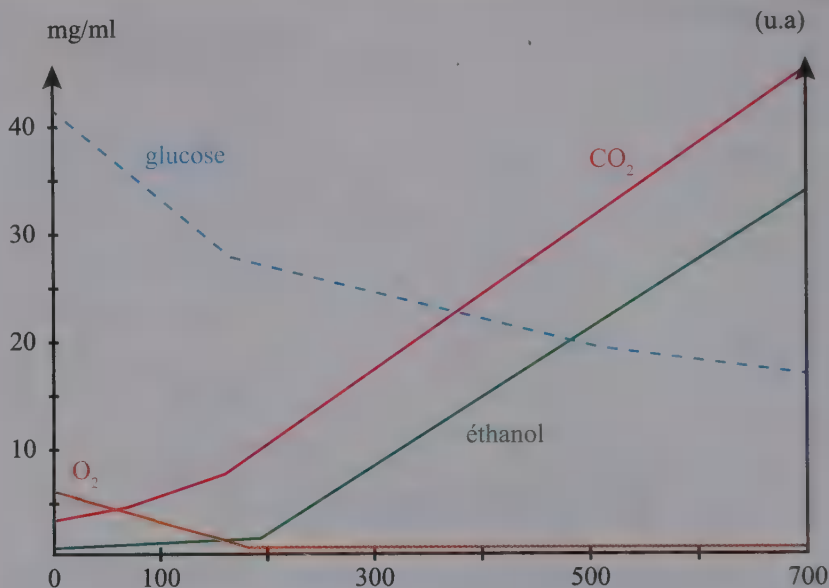


Figure 16.29 – Evolution au cours du temps de la concentration d' O_2 , de CO_2 , de glucose et d'éthanol d'une culture de levures

16 Fermentation



30 min

corrigé
p. 376

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.

Types de fibres	Fibres de type I	Fibres de type II
Caractéristiques		
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 16.8 – Caractéristiques structurales et métaboliques des 2 types de fibres musculaires

Document B : la production d'ATP par les cellules musculaires

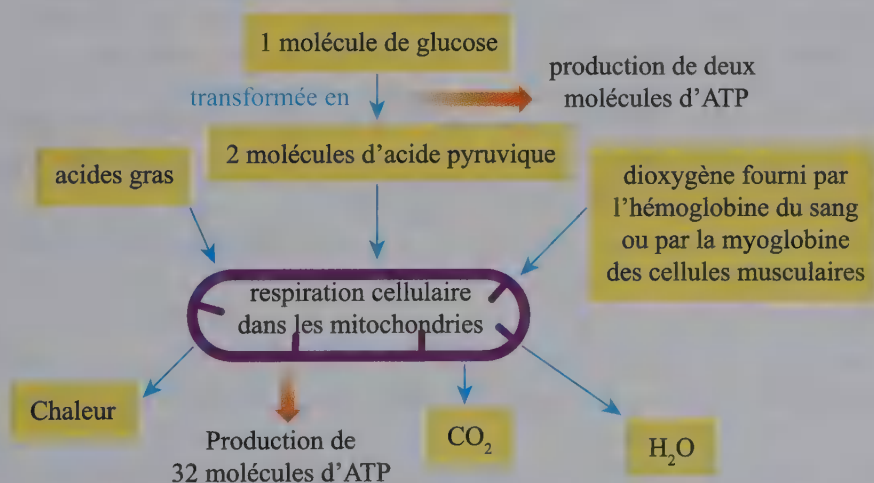


Figure 16.30 – Production d'ATP dans les cellules musculaires de type I

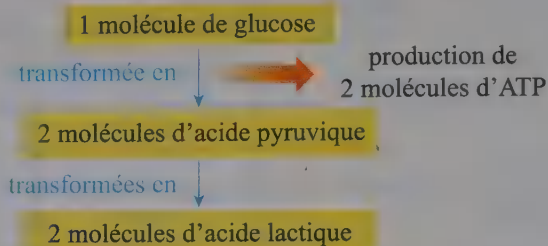


Figure 16.31 – Production d'ATP dans les cellules musculaires de type II

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.

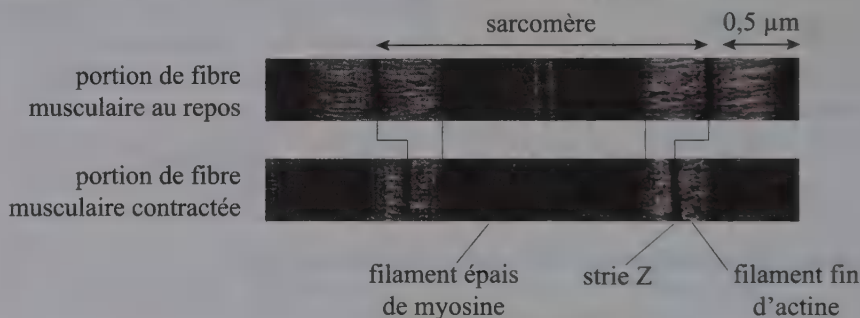


Figure 16.32 – Électronographie d'une fibre musculaire dans deux états différents

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.

1 QCM Vérification des connaissances→ énoncé
p. 3461 réponse **c**2 réponse **b**3 réponse **b****2 QCM Vérification des connaissances**→ énoncé
p. 3461 **b c** : L'ATP est synthétisé dans toutes les cellules.2 **a** La glycolyse a lieu dans le cytoplasme et elle permet de produire des molécules de coenzymes réduits.3 **b** La respiration mitochondriale n'a pas lieu dans toutes les cellules. Elle a lieu au niveau de la membrane interne de la mitochondrie et du stroma. Elle produit du dioxyde de carbone et de l'eau mais pas d'acide lactique.**3 Vérification des connaissances**→ énoncé
p. 3471 Ces deux phases de la photosynthèse se suivent dans le temps, mais elles sont indissociables, l'une n'existant pas sans l'autre. La phase chimique nécessite de l'énergie pour l'incorporation du carbone minéral du CO_2 dans les molécules organiques. Cette énergie, apportée sous forme d'ATP et de coenzymes réduits, est formée lors de la phase photochimique par conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique.

2 L'ATP est souvent qualifié « d'intermédiaire énergétique » car son hydrolyse en ADP et phosphate fournit de l'énergie. Cela permet à des processus consommateurs d'énergie d'avoir lieu grâce à un couplage énergétique. Ainsi, l'ATP permet les synthèses de molécules organiques dans toutes les cellules, il permet les mouvements cellulaires.

3 La respiration et la fermentation sont deux processus cellulaires permettant la production d'ATP. Elles commencent toutes les deux par la glycolyse. La fermentation se déroule dans le cytoplasme et il reste une molécule organique, donc le carbone n'est pas totalement oxydé. Elle ne nécessite pas la présence de dioxygène, mais elle demande des enzymes particulières que ne possèdent pas toutes les cellules. Elle permet de produire une faible quantité d'ATP : 2 molécules d'ATP par molécule de glucose grâce à la glycolyse, alors que la respiration, qui se déroule dans les mitochondries, permet l'oxydation complète du carbone et produit une grande quantité d'ATP : 32 molécules d'ATP pour 2 pyruvates issus de la glycolyse.

4 Photosynthèse – échanges gazeux

→ énoncé
p. 347

Lycée Corot, Savigny/Orge

La consommation de dioxygène due à la respiration fait diminuer la concentration d' O_2 aussi bien à la lumière qu'à l'obscurité, et les diminutions sont égales quelque soit l'éclairement. La production de dioxygène due à la photosynthèse n'a lieu qu'à la lumière.

On constate que le taux de $^{18}O_2$ diminue régulièrement avec le temps indépendamment des conditions de lumière. Il y a une consommation régulière de $^{18}O_2$. Donc cette molécule n'entre pas dans le métabolisme photosynthétique qui rejette du dioxygène, elle est utilisée lors de la respiration.

Le taux de dioxygène $^{16}O_2$ diminue aussi à l'obscurité : il est donc consommé par la respiration en même temps que le $^{18}O_2$. La respiration utilise donc indifféremment de l'oxygène normal ou lourd.

En revanche, à la lumière, le taux augmente : il y a production de dioxygène. Ce dioxygène est produit par photosynthèse à partir de l'eau du milieu. C'est donc uniquement $^{16}O_2$.



Photosynthèse

→ énoncé
p. 348

Lycée La Rochefoucauld, Paris

- 1 Les Chlorelles étant des algues vertes, l'organite de grande taille que la cellule possède est un chloroplaste. Les inclusions sont des grains d'amidon. On sait que la synthèse des premières molécules organiques a lieu dans le stroma du chloroplaste.

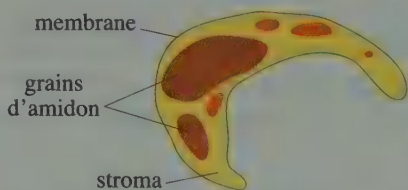


Figure 16.33 – Schéma légendé du chloroplaste de Chlorelle

- 2 On observe que l'autoradiographie du chromatogramme réalisée après 2 secondes d'exposition au $^{14}CO_2$ ne comporte qu'une molécule : le PGA. Après 5 secondes d'exposition, on observe qu'il y a en plus du C_5P_2 et des hexoses phosphates. Il y a donc d'abord formation de PGA, puis de C_5P_2 et hexoses phosphates. Les résultats ne permettent pas de déterminer l'ordre d'apparition de C_5P_2 et des hexoses phosphates l'un par rapport à l'autre.
- 3 On sait que le CO_2 est incorporé au cours de la phase non photochimique de la photosynthèse à une molécule de C_5P_2 . Cette molécule à 6 atomes de carbone subit le cycle de Calvin-Benson : elle est scindée en 2 molécules de PGA. L'une de ces deux molécules possède le carbone radioactif du CO_2 . C'est pour-

quoi le PGA est le premier à apparaître après autoradiographie.

Le PGA est ensuite transformé en triose phosphate. Or on sait qu'une partie des trioses-phosphate sert à régénérer le C_5P_2 du cycle de Calvin-Benson. Il est logique que certaines molécules de C_5P_2 possèdent un atome de ^{14}C . On sait également que l'autre partie des trioses-phosphate permet la formation de glucides à 6 atomes de carbone (fructose et glucose). Cela explique que des hexoses phosphates possèdent un atome de ^{14}C .

- On n'observe pas de tache correspondant au C_5P_2 sur le premier chromatogramme car le CO_2 est d'abord incorporé au PGA. Le C_5P_2 présent au moment de la mort des Chlorelles n'est pas radioactif.
- On observe que la radioactivité présente dans le PGA et le C_5P_2 augmente puis se stabilise au bout de 30 minutes malgré la présence de $^{14}CO_2$ durant toute l'expérience. On peut supposer que toutes les molécules de PGA et C_5P_2 ont un carbone 14 au bout de 30 minutes.
- On observe dans le graphique b que la radioactivité présente dans le PGA diminue à partir du retrait du $^{14}CO_2$ et s'annule au bout de 100 secondes. Cela signifie qu'aucune molécule de PGA n'est radioactive après 100 secondes. La radioactivité présente dans le C_5P_2 augmente à partir du retrait du CO_2 jusqu'à atteindre un plateau. Tout se passe comme s'il y avait un transfert des atomes de ^{14}C du PGA vers le C_5P_2 . Le PGA permet la formation de C_5P_2 , qui hérite donc des atomes de carbone du premier. Le PGA tire ses atomes de carbone directement du CO_2 , d'où l'évolution observée de sa radioactivité.

6 Photosynthèse – Pigments

→ énoncé
p. 349

Lycée La Favorite Sainte Thérèse, Lyon

- D'après le document A, on observe que les chlorelles ne peuvent se multiplier sur un milieu exclusivement minéral que si elles sont à la lumière et si elles sont vertes. Leur multiplication est un indicateur de leur synthèse de molécules organiques. Cela signifie que les chlorelles peuvent synthétiser leur matière organique à partir de matière minérale à condition d'être à la lumière et de posséder des chloroplastes (contenant leurs pigments photosynthétiques).
- Dans le document B, on observe que ^{32}P est incorporé par les chloroplastes en quantité variable selon l'éclairement et la longueur d'onde d'éclairement. A la lumière blanche, la quantité incorporée augmente. Or on sait que l'ADP peut être phosphorylé grâce à un groupement phosphate et donner de l'ATP. On peut donc affirmer qu'il y a une synthèse d'ATP par les chloroplastes à la lumière.

A l'obscurité, la quantité de ^{32}P incorporé diminue. Cela signifie que l'ATP contenant le ^{32}P qui a été produit à la lumière est hydrolysé, ce qui libère le phosphate contenant ^{32}P . Il n'y a pas de production d'ATP à l'obscurité.

De même, on observe qu'il y a une production d'ATP avec un éclairage de 700 nm de longueur d'onde, mais pas avec une longueur d'onde de 560 nm. Or les chloroplastes n'absorbent pas toutes les longueurs d'onde de la lumière visible avec la même efficacité : ils absorbent 70 % des radiations de 700 nm et 35 % des radiations de 560 nm. On peut donc corréler les différences d'absorption et les différences de synthèse d'ATP par le chloroplaste : la synthèse d'ATP par le chloroplaste s'effectue grâce à la lumière, mais seules les radiations qui sont suffisamment absorbées par les pigments de l'organite sont efficaces.

- Le document C donne la quantité de ^{14}C fixé dans le stroma des chloroplastes, c'est-à-dire de carbone incorporé à des molécules organiques. La comparaison des résultats 1 et 2 montre le rôle de l'ATP : en effet, dans le stroma laissé à l'obscurité, il y a incorporation beaucoup plus importante de ^{14}C si on ajoute de l'ATP (45 000 cpm contre 3 500 sans ATP). L'ATP est donc essentiel à la synthèse des molécules organiques. On remarque que la présence de lumière n'est pas indispensable à cette synthèse, à condition qu'on fournisse de l'ATP.

Il y a également incorporation de ^{14}C si on ajoute au stroma des thylakoïdes laissés préalablement à la lumière. Cela montre que les thylakoïdes ont synthétisé de l'ATP à la lumière ou un équivalent qui permet les synthèses de molécules organiques.

- L'ensemble de ces documents permet de préciser le lien entre la lumière, l'ATP et la synthèse de molécules organiques dans les chloroplastes. En effet, la lumière est indispensable à la synthèse de molécules organiques (doc. A). Cependant, son rôle n'est pas direct : la lumière est absorbée par les pigments photosynthétiques des thylakoïdes des chloroplastes. Cette absorption est différente selon la longueur d'onde. Les longueurs d'onde « efficaces », c'est-à-dire ayant une action positive sur la photosynthèse, permettent la synthèse d'ATP à partir d'ADP et de phosphate (doc. B). L'ATP produit à cette occasion permet l'incorporation du carbone minéral du CO_2 dans des molécules organiques dans le stroma du chloroplaste (doc. C).

7 Photosynthèse – biosynthèse

➔ énoncé
p. 351

Lycée du Grandchamp, Versailles

Une production dans les cellules laticifères...

Le document A indique que les molécules de caoutchouc, ou cis-polyisoprène sont présentes dans des cellules de l'écorce, les cellules laticifères. Ces cellules ne sont pas chlorophylliennes et sont proches de tubes criblés : il s'agit de cellules apportant des acides aminés et du saccharose dans la sève.

Les cellules n'étant pas chlorophylliennes, on sait qu'elles ne peuvent pas produire de molécules organiques à partir de carbone minéral. Elles doivent disposer de molécules organiques comme point de départ à leur synthèse. La synthèse du caoutchouc est possible dans les cellules laticifères grâce à une enzyme : la rubbertransférase-REF. Cette enzyme catalyse la transformation de PPI en caoutchouc. Le substrat de départ est le saccharose. On comprend que le saccharose apporté dans les tubes criblés est prélevé

par les cellules pour leur synthèse.

Comment le saccharose est-il produit ?

... à partir du saccharose produit dans les cellules chlorophylliennes

Le document B est le protocole et le résultat d'une expérience concernant les cellules chlorophylliennes. Au temps zéro, on fournit du carbone radioactif dans le CO_2 . On mesure ensuite la radioactivité contenue dans des molécules organiques des cellules chlorophylliennes. On observe que la radioactivité se retrouve dans trois molécules organiques : trioses phosphate, saccharose et phosphoglycérate. Deux secondes après l'introduction de CO_2 marqué, des trioses phosphates radioactifs sont présents ; ils sont suivis de peu par l'apparition de PGA radioactif. La quantité de carbone radioactif présent dans ces deux types de molécules augmente jusqu'à 7 secondes puis elle diminue. A partir de 7 secondes, de la radioactivité apparaît dans le saccharose et sa quantité augmente alors qu'elle diminue dans les deux autres molécules. On comprend que le carbone du CO_2 qui est incorporé par les cellules chlorophylliennes lors de la photosynthèse est ajouté à des molécules organiques et permet de produire des trioses phosphate puis du PGA ; des réactions biochimiques à partir de PGA permettent la synthèse de saccharose.

Le saccharose synthétisé à partir de CO_2 au cours de la photosynthèse dans les cellules de feuilles de l'hévéa est exporté par la sève élaborée. Il arrive par les tubes criblés dans l'écorce et est prélevé par les cellules laticifères. Dans ces cellules il est transformé au cours de plusieurs réactions successives grâce à des enzymes, conduisant à la synthèse de caoutchouc.

8 Photosynthèse – Biocarburants

➔ énoncé
p. 352

Lycée Notre Dame du Grandchamp, Versailles

Une production de lipides, molécules sources de biocarburants

Le dioxyde de carbone est une molécule permettant un fort développement des algues vertes en présence de lumière. En effet, le document A montre que l'absorbance d'une culture augmente lorsque les algues sont placées à la lumière ; cette augmentation est d'autant plus grande que le milieu a été enrichi en CO_2 : de 0.05 à 0.62. Cela signifie que les algues sont devenues plus abondantes. La multiplication des algues a nécessité la production de matière par les cellules. On en conclut que la production de matière organique nécessite la présence de CO_2 et de lumière.

Les molécules organiques produites sont de plusieurs natures : d'après le document B, on observe sur le chromatogramme la présence de divers acides organiques (acide malique, acide pyruvique etc.) ainsi que des trioses phosphate, hexoses phosphate etc. Ces molécules sont radioactives et on a fourni du CO_2 radioactif aux algues vertes : on en déduit que les molécules organiques sont synthétisées à partir de CO_2 . On sait que c'est le carbone du CO_2 qui est utilisé pour produire les molécules organiques.

Parmi les molécules produites, on trouve l'acide pyruvique. Cette molécule est le substrat d'enzymes, certaines étant des acides gras synthétases (document C). Ainsi, dans les chloroplastes des végétaux, on a une production d'acides gras, qui sont ensuite convertis en lipides. Le document nous apprend que les lipides de réserve des algues unicellulaires peuvent être extraits et raffinés pour produire des biocarburants.

Différentes origines possibles pour les biocarburants

Le document D montre que différents végétaux permettent de produire des biocarburants : des végétaux terrestres cultivés sur des terres agricoles et des algues vertes unicellulaires cultivées sur des surfaces non agricoles. Le rendement des végétaux terrestres est variable et beaucoup plus important dans le cas du palmier à huile : environ 13 fois plus important que le soja. Le rendement est beaucoup plus élevé dans le cas des algues et ne nécessite pas de terres agricoles. Cela doit conduire à privilégier la culture des algues unicellulaires pour la production des biocarburants.

Les biocarburants ont pour origine des molécules organiques produites grâce à la photosynthèse des végétaux. Cela nécessite de la lumière et l'utilisation de CO_2 . Cette production entre en concurrence avec les cultures à but alimentaire. Le fort rendement et la localisation des cultures donnent un net avantage à la culture des algues pour la production des biocarburants.



Rôle de l'ATP



énoncé
p. 354

Lycée Corot, Savigny/Orge



Dans l'expérience a, les organites X permettent l'oxydation du substrat et une consommation de O_2 . C'est sans doute le dioxygène qui permet l'oxydation du substrat organique. Il y a un dégagement de dioxyde de carbone, ce qui correspond au produit de l'oxydation d'une molécule contenant du carbone à l'état réduit (le substrat). Il y a également une consommation d'ADP et P_i . L'organite X est une mitochondrie ; en effet, on observe la présence de crêtes à l'intérieur de cet organite sur le document A.

- Dans l'expérience b, le mouvement du flagelle s'arrête si les ATP synthétases ne fonctionnent pas. On sait que ce sont des enzymes permettant la synthèse d'ATP à partir d'ADP et P_i . L'ATP est donc nécessaire au mouvement du flagelle. De même, l'arrêt du transfert des électrons arrête le flagelle. Il est donc indispensable. On sait qu'un transfert d'électrons permet la synthèse d'ATP au cours de la respiration.
- Dans l'expérience c, on observe que l'absence des ATP synthétases permet les processus qui se déroulent dans l'expérience a sauf la diminution de la concentration d'ADP et P_i . Il y a toujours oxydation du substrat grâce à O_2 et formation de CO_2 . Les ATP synthétases ont donc pour seul rôle de synthétiser l'ATP au cours de la respiration.

- On peut conclure de l'exploitation de ces trois résultats d'expérience que l'ATP est synthétisé à partir d'ADP et P_i dans les mitochondries grâce à l'énergie fournie par l'oxydation du substrat organique en CO_2 au cours de la respiration. L'enzyme ATP synthétase de la membrane interne des mitochondries catalyse cette synthèse. L'ATP permet le mouvement relatif des filaments protéiques du flagelle (comme pour la cellule musculaire), ce qui explique son mouvement.

■ Dans un milieu sans substrat oxydable, les mitochondries ne peuvent plus synthétiser de l'ATP. Cela explique l'arrêt du mouvement du flagelle.

Cependant, les mouvements reprennent à la lumière. Cela signifie que de l'ATP est de nouveau synthétisé malgré l'absence de substrat oxydable. Cela ne peut pas être réalisé par les mitochondries. Or l'Euglène est une algue verte : cela implique qu'elle possède des chloroplastes et qu'elle puisse réaliser la photosynthèse. Elle peut donc produire de l'ATP lors de la phase photochimique de la photosynthèse.

10 Production d'ATP – Respiration

→ énoncé
p. 356

Lycée Richelieu, Rueil Malmaison

■ On observe que les animaux ayant consommé des glucides avec du ^{14}C rejettent du CO_2 comportant du ^{14}C . Cela signifie que les glucides ont subi des transformations qui ont fait passer le carbone d'un état réduit (dans les glucides) à un état oxydé (dans le CO_2). Le carbone des glucides ne se trouve plus dans une molécule organique. Il y a donc bien eu des décarboxylations complètes des métabolites (glucides).

■ Les atomes d'oxygène ^{18}O provenant du dioxygène gazeux se retrouvent dans de l'eau, associés à des atomes d'hydrogène. Le dioxygène a donc été réduit : il a gagné deux électrons, et dans notre cas, deux protons pour former de l'eau H_2O . Ces protons et électrons peuvent provenir de la déshydrogénation des métabolites. En effet, on sait qu'il y a synthèse de coenzymes réduits $R'H_2$ au cours de la respiration à partir de R' , et grâce au substrat oxydé.

11 Production d'ATP – Respiration

→ énoncé
p. 356

Lycée La Rochefoucauld, Paris

• On observe dans le graphique du document A que le taux de O_2 du milieu entourant les mitochondries reste constant au départ. Cela signifie qu'il n'y a ni consommation ni production de O_2 par les mitochondries. A partir de l'ajout de pyruvate, le taux de O_2 diminue régulièrement : cela montre que les mitochondries consomment le dioxygène en présence de pyruvate et pas de glucose. Le pyruvate est donc le substrat d'une oxydation dans les mitochondries. Le glucose ne peut pas être oxydé dans ces organites. Or le substrat de départ de la respiration cellulaire est le glucose. On

peut donc supposer que le glucose est transformé en pyruvate.

- On observe dans le document B qu'il n'y a que du glucose dans le milieu externe au temps zéro. Le taux de glucose du milieu extérieur diminue et on en voit apparaître dans le hyaloplasme. Cela signifie que le glucose est entré dans les cellules. Il n'entre jamais dans les mitochondries. Au temps t_2 , il n'y a plus de glucose dans aucun des milieux. Cela montre que le glucose a été consommé dans le hyaloplasme : il a été oxydé dans le cadre de la glycolyse.

On observe qu'il apparaît du pyruvate dans la cellule au temps t_2 , et qu'il n'y en a plus que dans les mitochondries au temps t_3 . Cela montre que du pyruvate est produit dans le hyaloplasme et qu'il entre ensuite dans les mitochondries. On peut supposer qu'il est formé à partir du glucose.

Le dioxyde de carbone apparaît dans le milieu extérieur au temps t_3 , et il est plus abondant au temps t_4 . Son apparition tardive montre qu'il est le produit de réactions qui ont mis du temps à se dérouler. Or, d'après l'énoncé, le glucose est oxydé en CO_2 . Cela conforte donc l'idée selon laquelle le CO_2 qui apparaît résulte de la dégradation du glucose fourni.

- En mettant en relation les informations tirées des deux documents, on peut conclure que le glucose qui entre dans les cellules animales reste dans le hyaloplasme. Il y est transformé en pyruvate. Cette molécule peut entrer dans les mitochondries. Dans ces organites, elle subit un ensemble d'oxydations qui conduisent à la production de CO_2 . Ce CO_2 sort de la cellule.
- On sait d'après nos connaissances que la production d'ATP est réalisée à deux niveaux : une production directe dans le hyaloplasme par couplage entre la transformation du glucose en pyruvate, et une production indirecte grâce aux coenzymes réduits $\text{R}'\text{H}_2$ dans les mitochondries.

12 Production d'ATP – Respiration

→ énoncé
p. 357

Lycée Balzac, Caen

- Le protocole d'éclatement du document A conduit à créer des vésicules mitochondriales avec les sphères pédonculées dirigées vers l'extérieur ; ainsi l'intérieur de la vésicule correspond à l'ancien espace intermembranaire dans une mitochondrie et l'extérieur correspond à la matrice.

On observe qu'il y a phosphorylation de l'ADP en ATP. Les éléments nécessaires à la synthèse de l'ATP sont donc présents sur ou dans ces vésicules issues de la membrane interne des mitochondries.

- D'après le document B, les sphères isolées de la membrane interne permettent la synthèse de l'ATP, ce qui n'est pas le cas des vésicules avec pédoncules. Ce sont donc les sphères qui sont les responsables de la synthèse d'ATP dans la mitochondrie.
- D'après le document C, la phosphorylation de l'ADP dépend du pH du milieu

extérieur aux vésicules. Il n'y a synthèse d'ATP que si le pH extérieur est plus important que le pH de l'intérieur des vésicules. Or le pH dépend de la concentration de protons du milieu : plus la concentration de protons est faible, plus le pH est élevé. Dans notre cas, la concentration intravésiculaire en protons est plus importante que celle de l'extérieur. Il y aura donc une tendance des protons à sortir des vésicules.

Les résultats montrent qu'il faut une sortie de protons vers l'extérieur des vésicules pour que la synthèse d'ATP puisse s'effectuer. Cette sortie a certainement lieu par les sphères pédonculées, qui sont, elles aussi indispensables à la synthèse de l'ATP.

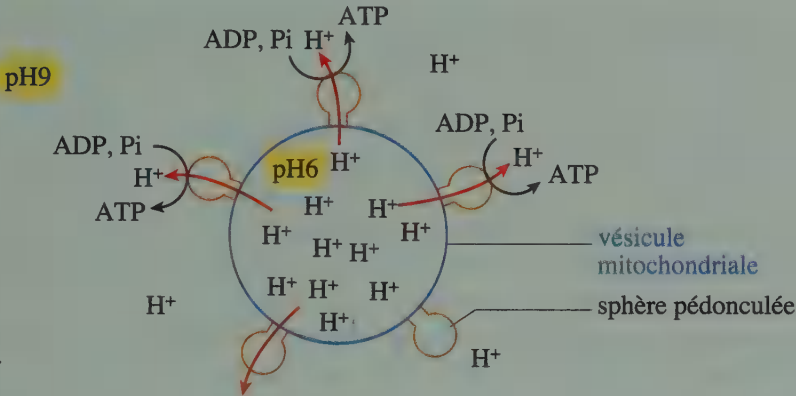


Figure 16.34 – Déroulement de la synthèse d'ATP dans les conditions expérimentales du document C

- Dans les conditions cellulaires, les sphères pédonculées de la membrane interne des mitochondries catalysent la synthèse d'ATP dans la matrice. L'énergie nécessaire à cette synthèse vient d'un flux de protons : les protons, présents en concentration plus importante dans l'espace intermembranaire que dans la matrice, gagnent la matrice en passant par les sphères pédonculées.

13 Production d'ATP – Respiration

énoncé
p. 358

Lycée Balzac, Caen

- On observe une légère diminution de la concentration d'O₂ après introduction des mitochondries (environ 10 %). Cela s'explique par la persistance de leur activité respiratoire. Elles ont encore des substrats à oxyder lorsqu'on les introduit dans la solution.

La légère augmentation de concentration d'O₂ après injection de succinate est due à l'injection elle-même, qui a introduit une solution plus riche en O₂ que celle qui est étudiée. C'est un artefact.

- On observe que la concentration d'O₂ diminue après injection de succinate, plus encore après injection de 0,06 mL d'ADP et après injection de 0,12 mL

d'ADP. Cela montre que les mitochondries consomment de l' O_2 lorsqu'elles disposent de succinate, et que plus elles ont d'ADP, plus elles en consomment. Le succinate étant un intermédiaire des décarboxylations oxydatives de la matrice mitochondriale, il fait partie du cycle de Krebs. Lorsque les mitochondries en disposent, elles peuvent faire fonctionner ce cycle donc il y a production de coenzymes réduits. Ces coenzymes réduits sont ensuite oxydés dans les crêtes mitochondriales et l'accepteur final des protons et électrons est le dioxygène. Cela explique la diminution de la teneur en O_2 après ajout de succinate.

La présence d'ADP stimule la consommation d' O_2 , donc elle stimule l'oxydation des coenzymes réduits. Plus il y a d'ADP, plus il y a d'oxydation des coenzymes. Comme la diminution de la teneur en O_2 est moins importante entre 4 et 5 minutes, on en déduit que les coenzymes sont moins oxydés à ce moment. Ce peut être parce qu'il y a moins de coenzymes produits (le succinate s'épuise par exemple) ou parce que l'oxydation des coenzymes dépend de la quantité d'ADP et que celle-ci diminue. Or l'ajout d'un nouveau volume d'ADP fait reprendre la diminution du taux d' O_2 comme au début de la première injection d'ADP. Cela montre que le facteur ayant fait chuter moins fortement la teneur en O_2 n'est pas le succinate puisqu'on n'en a pas rajouté. C'est bien la quantité d'ADP qui influe sur la consommation d' O_2 .

Or on sait que l'ADP peut être phosphorylé en ATP grâce à de l'énergie. Il y a donc bien un couplage entre l'utilisation du succinate dans la matrice mitochondriale et la production d'ATP.

3

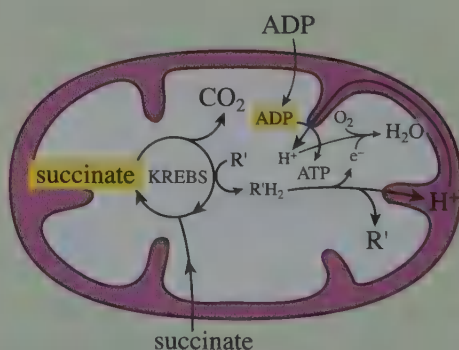


Figure 16.35 – Relations fonctionnelles entre les différentes molécules étudiées dans l'expérience

14 ATP – fermentation – respiration

Lycée Vieljeux, La Rochelle

→ énoncé
p. 359

1 La fermentation alcoolique est une réaction de dégradation du glucose per-

mettant de synthétiser deux molécules d'ATP. Elle produit de l'éthanol et du dioxyde de carbone :



■ La quantité d'éthanol produite nous renseigne sur le métabolisme emprunté par les levures :

- en aérobiose, il n'y a que des traces d'éthanol. Les levures fermentent donc très peu, elles respirent. Lorsqu'elles disposent de dioxygène, la voie métabolique préférentielle est la respiration ;
- en air peu renouvelé, il y a présence d'éthanol. Les levures disposant de peu de dioxygène, se mettent à fermenter de manière plus importante qu'en aérobiose ;
- en anaérobiose, la production d'éthanol est plus importante. La fermentation alcoolique est la seule voie métabolique utilisée par les levures pour renouveler leur ATP puisqu'elles n'ont plus du tout de O_2 .

■ Le rendement énergétique est la quantité d'ATP produit par gramme de glucose consommé. On observe que les levures consomment de plus en plus de glucose pour former un gramme de levure (de 4 à 176 g) quand la quantité d' O_2 disponible diminue. Cela signifie que le rendement énergétique diminue : les levures sont obligées de dégrader de plus en plus de substrat pour avoir le même niveau de fonctionnement. Cette observation est corrélée à nos connaissances : nous savons que la fermentation permet la synthèse de 2 molécules d'ATP par molécule de glucose consommée, alors que la respiration permet de produire 36 molécules d'ATP par molécule de glucose consommée, soit 18 fois plus.

15 Fermentation

➔ énoncé
p. 360

Lycée Notre Dame du Grandchamp, Versailles

Les analyses sanguines pratiquées sur Monsieur X à son arrivée à l'institut médico-légal étaient discordantes puisque l'un des échantillons contenait une quantité d'éthanol non nulle alors que l'autre n'en contenait pas du tout (document A). Afin de lever le doute, nous avons poursuivi les dosages durant une dizaine de jours. La concentration d'éthanol du sang B a très peu évolué et est restée faible, alors que celle de l'échantillon A a augmenté, atteignant presque 2g.L^{-1} au bout de 10 jours. Il y a donc eu une production d'éthanol dans le sang après la mort de Monsieur X.

Cela faisant penser à une production biologique, nous avons recherché la présence de micro-organismes dans le sang de Monsieur X (document B) : nous en avons effectivement trouvé dans l'échantillon A (bactéries *Hafnia alvei* et levures *Candida albicans*). Ces deux types cellulaires étaient absents de l'échantillon B, dans lequel se trouvaient d'autres micro-organismes.

Nos recherches se sont alors concentrées sur les bactéries et levures, qui sont normalement présentes dans l'intestin. Nous avons mis en culture des micro-organismes au métabolisme similaire afin de l'étudier (document C). Nous avons observé que la concentration de glucose du milieu a diminué, montrant une consommation par les cellules. De même la concentration de dioxygène a diminué et est devenue nulle au bout de 200 secondes. Les cellules ont donc réalisé la respiration cellulaire avec production de CO_2 comme en témoigne l'augmentation de la concentration de CO_2 . En l'absence d' O_2 , la concentration de glucose continue à diminuer alors que celles du CO_2 et de l'éthanol augmentent fortement. Les micro-organismes sont donc capables de consommer du glucose en l'absence d' O_2 et de produire du CO_2 et de l'éthanol : ils pratiquent la fermentation alcoolique. On peut en conclure que le sang de Monsieur X ne contenait pas d'éthanol au moment de son décès. L'échantillon de sang A a été contaminé par des micro-organismes d'origine intestinale, qui ont utilisé le glucose présent dans le sang, d'abord en pratiquant la respiration, puis en pratiquant la fermentation. L'éthanol a ainsi été produit par ces micro-organismes, ce qui explique la différence de résultats entre les deux échantillons de sang.

16 Fermentation

énoncé
p. 362

Lycée Teilhard de Chardin, Saint Maur des Fossés

MÉTHODE

Il est demandé de présenter la solution d'un problème scientifique à un sportif. Il s'agit donc de rédiger un raisonnement sans perdre de vue le fait que l'on doit adresser à une personne intéressée par le résultat de la contraction musculaire, qui est la performance physique.

La contraction musculaire est réalisée par les cellules musculaires, également appelées fibres musculaires. Elles contiennent des unités appelées sarcomères (document C). Un sarcomère est formé de deux types de protéines : la myosine et l'actine. Lors d'une contraction, le sarcomère se raccourcit par glissement des filaments d'actine à l'intérieur des filaments de myosine et ce mouvement nécessite de l'énergie. L'énergie est apportée par l'hydrolyse de l'ATP.

Elles sont de deux types : les fibres I et les fibres II. Elles ont des caractéristiques différentes (document A) : les fibres I sont de couleur rouge ; elles sont riches en une protéine permettant de stocker le dioxygène : la myoglobine. Elles sont fortement irriguées, riches en mitochondries et ont un important métabolisme aérobie. Elles produisent donc l'ATP nécessaire à la contraction musculaire essentiellement grâce à la respiration mitochondriale. Il s'agit d'un ensemble de réactions biochimiques conduisant à l'oxydation complète du glucose et produisant du dioxyde de carbone.

Au contraire, les fibres II sont de couleur blanches ; elles sont peu irriguées, peu riches en myoglobine et en mitochondries et elles ont un important métabolisme anaérobie.

Elles produisent donc l'ATP nécessaire à la contraction musculaire essentiellement grâce à la fermentation. Il s'agit d'un ensemble de réactions biochimiques conduisant à l'oxydation incomplète du glucose et produisant de l'acide lactique.

La respiration cellulaire a lieu dans les mitochondries (document B) à partir de glucose transformé en acide pyruvique ou d'acide gras. Elle produit 36 molécules d'ATP. Ce processus est prédominant dans les fibres I. Il est corrélé à un important contenu en lipides (fournisseurs d'acides gras). La fermentation lactique produit deux molécules d'acide lactique et 2 molécules d'ATP à partir de glucose. Ce processus est prédominant dans les fibres II. Elle est corrélée à un important contenu en glycogène (source de glucose). La faible quantité d'ATP produite explique la faible résistance à la fatigue des fibres II. Une fois que ces fibres ont consommé leur ATP, elles mettent davantage de temps à le renouveler que les fibres I. Elles ont cependant une vitesse de contraction plus grande que les fibres I. Elles ont donc une grande importance dans les efforts intenses et brefs.

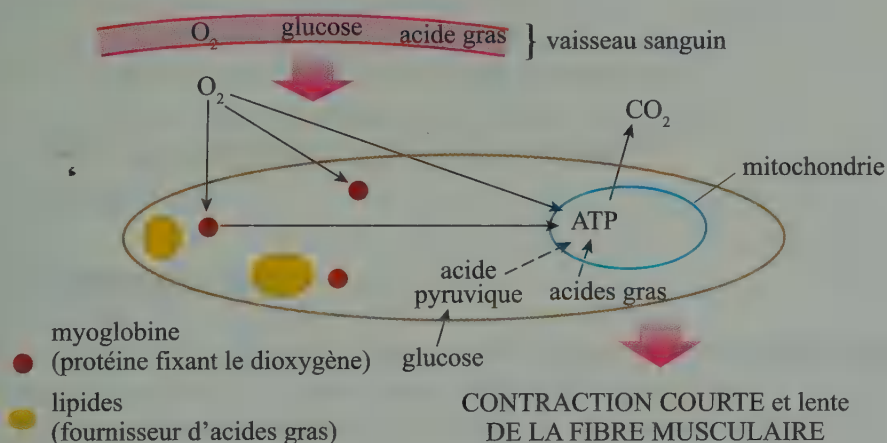


Figure 16.36 – Fonctionnement d'une fibre musculaire de type I

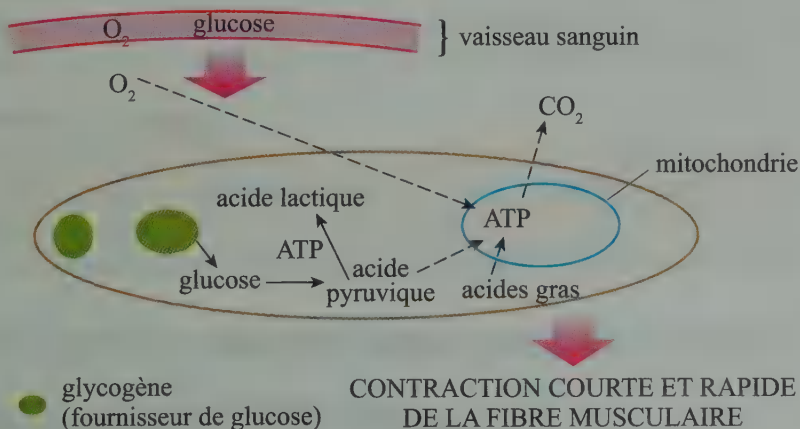


Figure 16.47 – Fonctionnement d'une fibre musculaire de type II

Atmosphère, hydrosphère, climats : du passé à l'avenir (spécialité)

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Transformations de l'atmosphère de la Terre
3. Reconstitution de la composition de l'atmosphère et des évolutions climatiques des 800 000 dernières années
4. Un facteur majeur influençant le climat global : l'effet de serre
5. La variation du climat à l'échelle des temps géologiques

1 Introduction

L'évolution du climat de la Terre est une préoccupation de la communauté scientifique. Se pencher sur les climats passés, à différentes échelles de temps, est indispensable pour rechercher les mécanismes agissant sur les climats et mettre au point des modèles climatiques pour l'avenir.

L'atmosphère et l'hydrosphère sont deux enveloppes externes fluides de la Terre, mises en mouvement par l'énergie solaire, qui interagissent avec la biosphère et la géosphère, influencent le climat et sont soumises à l'influence de ce dernier.

? PROBLÉMATIQUE

De quelle manière les évolutions de l'atmosphère et de l'hydrosphère sont-elles liées à celle du climat ?

2 Transformations de l'atmosphère de la Terre

2.1 L'atmosphère initiale de la Terre

L'atmosphère initiale de la Terre, ou atmosphère primitive correspond à la première

enveloppe gazeuse formée après la naissance de la Terre. Elle était constituée majoritairement d'hydrogène et d'hélium. Les vents solaires les ont chassés.

L'atmosphère actuelle, très riche en diazote (environ 79%) et en dioxygène (environ 21%) est donc très différente de l'atmosphère initiale.

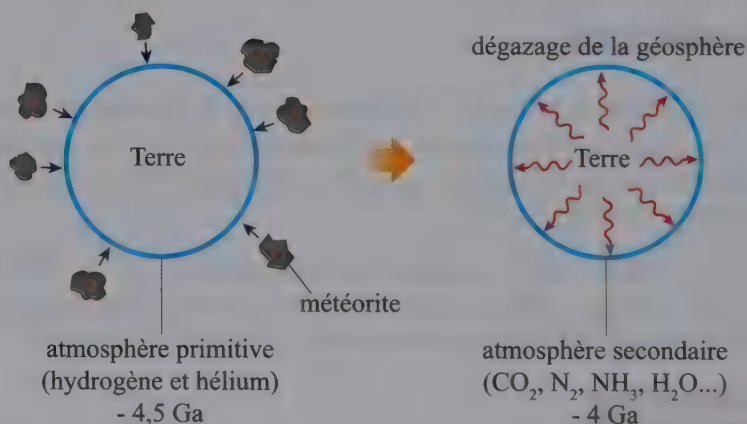
? PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les étapes et l'origine des transformations subies par l'atmosphère jusqu'à la période actuelle ?

2.2 Une atmosphère secondaire formée par dégazage de la géosphère

Vers -4 Ga la Terre a été soumise à un intense bombardement météoritique. Celui-ci, couplé au volcanisme, a eu pour conséquence un dégazage de la géosphère, qui s'est traduit par l'émission de gaz comme CO_2 , H_2O , NH_3 ... On peut noter la présence de vapeur d'eau et l'absence de dioxygène dans cette atmosphère.

La condensation de la vapeur d'eau en eau liquide dépend des conditions de pression et de température. Lorsque la température de surface est descendue en-dessous de 374°C , température critique, des pluies très abondantes se sont produites ; elles sont appelées « déluge universel ».



NB : l'épaisseur de l'atmosphère a été exagérée par rapport à celle de la Terre

Figure 17.1 – Passage de l'atmosphère primitive à une atmosphère secondaire

2.3 Liens entre l'évolution de l'atmosphère et la vie

2.3.1 Le rôle des océans

Les océans formés grâce aux pluies très abondantes ont permis la dissolution de gaz

dans l'eau. Cela a fait diminuer la pression atmosphérique. La diminution de la pression atmosphérique en CO_2 a considérablement abaissé la température de surface par diminution de l'effet de serre.

La présence d'eau liquide sur Terre a permis le développement des premières formes de vie. Les plus anciennes roches actuellement connues sur Terre se situent au Groenland et sont datées de 3,8 Ga. Elles sont proportionnellement plus riches en l'isotope 12 du carbone que des roches carbonées d'origine non biologique et attestent de la présence d'êtres vivants à cette période.

2.3.2 Photosynthèse et apparition du dioxygène dans l'atmosphère

En Australie, une formation rocheuse datée de -3,5 Ga contient des structures analogues aux stromatolithes fabriqués actuellement par des cyanobactéries : il s'agit de fins feuillets de calcaire dus à la précipitation des carbonates autour des filaments des cyanobactéries. Il semble donc que des bactéries photosynthétiques aient existé dès cette période. Cependant, l'atmosphère est restée réductrice, donc dépourvue d' O_2 comme en témoigne la présence de roches caractéristiques de milieu réducteur (pechblende par exemple).

Les premières traces de la présence de dioxygène en milieu océanique sont les gisements de fer rubané : il s'agit d'une alternance de couches de silice et d'oxydes de fer. L' O_2 produit a donc d'abord oxydé les roches présentes sur le lieu de sa production avant d'être produit en quantité suffisante pour passer dans l'atmosphère.

Le passage dans l'atmosphère a eu lieu vers -1,7 Ga comme en témoignent les « couches rouges » contenant du fer continental oxydé : des grès rouges datés du Dévonien (Paléozoïque).

2.3.3 Formation de la couche d'ozone

L'ozone, O_3 , est un gaz formé à partir du dioxygène. On estime qu'il a commencé à se former vers -1 Ga. Il absorbe les rayons ultraviolets les plus énergétiques et destructeurs du soleil. Il est particulièrement abondant actuellement entre 20 et 50 km : c'est la couche d'ozone. Sans la couche d'ozone la vie en dehors de l'eau serait impossible.

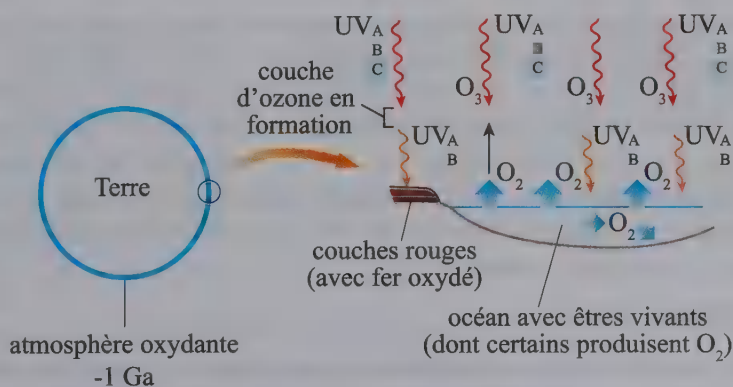


Figure 17.2 – L'atmosphère oxydante

2.3.4 Evolution actuelle de l'atmosphère

Actuellement les activités industrielles et agricoles de l'Homme modifient la composition de l'atmosphère (cf. paragraphe 4.4) comme par exemple :

- les CFC (chlorofluorocarbures) utilisés par le passé pour la réfrigération ont détruit une partie de la couche d'ozone ;
- la combustion de pétrole, gaz naturel et charbon libère du CO_2 dans l'atmosphère et fait augmenter la concentration en ce gaz (et par conséquent l'effet de serre),
- l'élevage intensif est un grand producteur de méthane (gaz à effet de serre).

➔ À RETENIR

L'atmosphère actuelle de la Terre n'a plus rien à voir avec l'atmosphère initiale. Sa transformation résulte de l'activité des vents solaires suivie par le dégazage. Les conditions de température et de pression ont permis la création d'eau liquide, et par là même la diminution de la concentration atmosphérique de CO_2 et le développement de la vie. L'activité photosynthétique productrice d' O_2 a laissé des traces dans les roches en milieu océanique puis émergé.

Voir exercices 1 et 4.

Reconstitution de la composition de l'atmosphère et des évolutions climatiques des 800 000 dernières années

3.1 L'analyse des bulles d'air contenues dans les glaces

3.1.1 Fondements scientifiques

Les calottes glaciaires présentes dans les régions polaires se forment par accumulation et tassement progressif des précipitations neigeuses au cours des années. Lors de ce processus, la glace emprisonne de l'air -sous forme de bulles- et des poussières. En forant cette glace, les scientifiques retirent des carottes. Couplées à la datation de la glace, les carottes de glace permettent donc, par l'analyse des bulles d'air emprisonnées depuis des centaines de milliers d'années, de reconstituer les variations de la composition de l'atmosphère. En particulier, les scientifiques mesurent la teneur en gaz à effet de serre (méthane et dioxyde de carbone) et recherchent la présence éventuelle de polluants d'origine humaine.

3.1.2 Résultats des mesures

Une carotte de glace forée en Antarctique, à proximité de la base franco-italienne Concordia (Dôme C), a permis d'atteindre une profondeur de 3 270 mètres permettant de « remonter » jusqu'à une glace âgée de 800 000 ans. Des variations similaires et

cycliques de la teneur en CO_2 et en CH_4 de l'atmosphère sont remarquées, selon une périodicité de 100 000 ans. Il s'agit de variations naturelles.

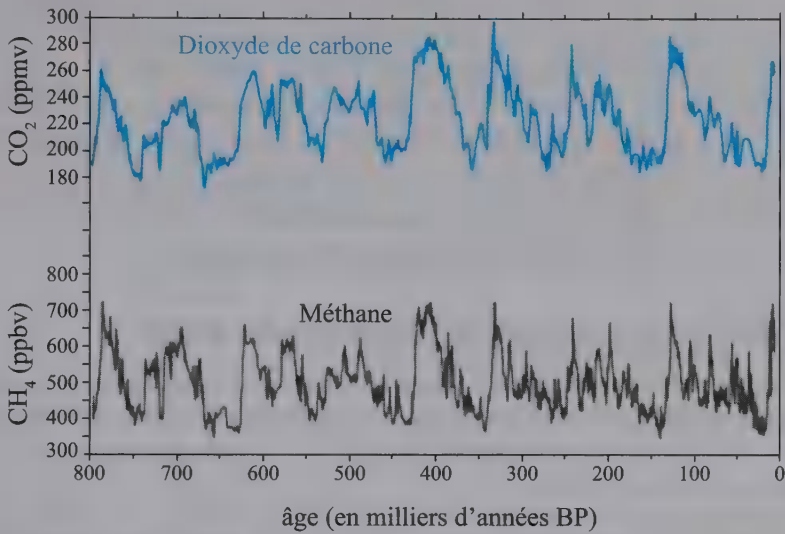


Figure 17.3 – Evolution de la teneur en dioxyde de carbone et en méthane de l'atmosphère, à partir des données de carottes de glace, depuis 800 000 ans

(BP : Before Present ; ppmv = partie par million de volume ; ppbv = partie par billion de volume)

3.1.3 Contraste avec l'évolution récente et actuelle

Pour des mesures plus récentes, les mesures sont directement faites sur des échantillons atmosphériques. Depuis 1750 (démarrage de la révolution industrielle), les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre se sont fortement accrues selon un rythme sans commune mesure avec les variations enregistrées dans le passé. Le taux actuel de gaz à effet de serre est le plus fort observé depuis 800 000 ans.

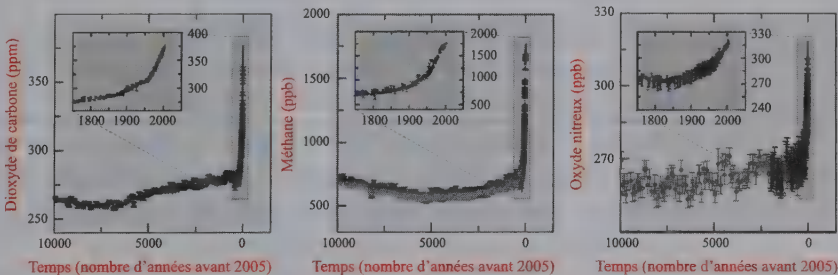


Figure 17.4 – Concentrations atmosphériques de CO_2 , de CH_4 et de N_2O durant les 10 000 dernières années (grands graphiques) et depuis 1750 (médaillons) (Graphiques extraits du rapport de synthèse publié par le GIEC en 2007)

➔ À RETENIR

Les calottes glaciaires sont des archives dans lesquelles l'analyse de la composition des bulles d'air hébergées par la glace renseigne sur la composition de l'atmosphère. Si depuis 800 000 ans des variations naturelles et cycliques de la teneur en gaz à effet de serre sont observées, une élévation très importante a lieu depuis au moins deux cents ans. On attribue sans ambiguïté cette augmentation aux activités humaines.

Voir exercices 10 et 11.

3.2 L'analyse de la composition isotopique des glaces

Pour reconstituer les variations climatiques à partir de la composition de la glace-hôte, et non des bulles d'air qu'elle héberge, on se sert d'un indice physico-chimique : le delta isotopique des glaces polaires (delta $\delta^{18}\text{O}$). Le tableau ci-après présente le principe de la méthode utilisée.

Ce qu'on mesure, où on le mesure et comment on y accède	On mesure le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans la glace polaire constituée par l'accumulation de précipitations neigeuses, à laquelle on a accès par les carottes de glace forées dans les calottes polaires.
Pourquoi on le mesure ?	On sait que la proportion de ^{18}O dans les eaux de pluie et les précipitations neigeuses actuelles diminue avec la température, car les masses d'air subissent depuis leur formation à l'équateur jusque vers les pôles des épisodes de condensation ; au cours de ces épisodes de condensation elles s'appauvrissent en ^{18}O , ce dernier se retrouvant préférentiellement dans la phase liquide à l'origine des précipitations (voir figure ci-après).
L'indice qu'on obtient à partir de la mesure	À partir de la mesure effectuée on calcule un $\delta^{18}\text{O}$ dans la glace : $\delta^{18}\text{O} = \left[\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{échantillon}} / \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}} - 1 \right] \times 1000$ *Le rapport $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}$ représente le rapport de référence pour l'eau («Standard Mean Ocean Water» ; ce rapport est proche de la composition moyenne des océans actuels).
La signification de cet indice	Les variations observées du $\delta^{18}\text{O}$ traduisent les changements dans la température de l'air au cours du temps au-dessus du site où sont effectuées les mesures. Aux latitudes élevées la relation entre le $\delta^{18}\text{O}$ et la température est linéaire (voir figure ci-après). Le $\delta^{18}\text{O}$ sert de thermomètre isotopique de la glace puisque la température se calcule à partir de la valeur du $\delta^{18}\text{O}$: aux pôles une diminution de 1 unité de $\delta^{18}\text{O}$ correspond à une diminution de $1,5^\circ\text{C}$. Le $\delta^{18}\text{O}$ est d'autant plus négatif que la température est basse au moment de la formation de l'échantillon de glace.

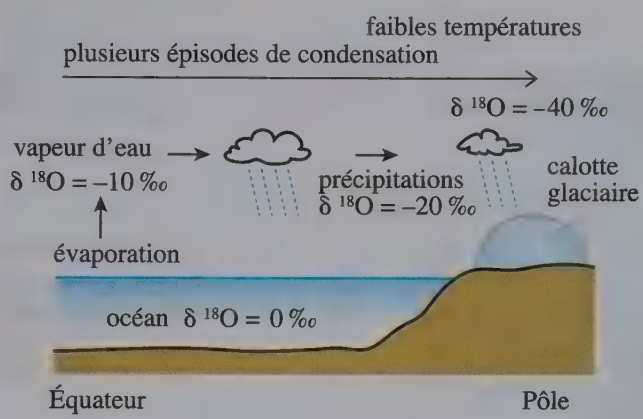


Figure 17.5 – Le cycle externe de l’eau et le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations

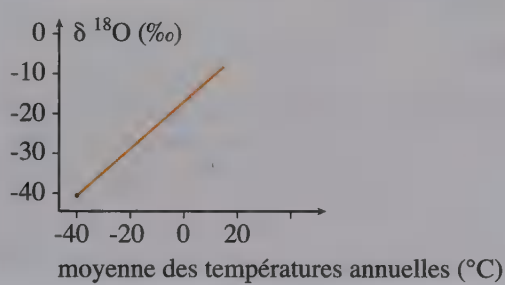


Figure 17.6 – Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations et température

Les renseignements tirés de l’analyse du $\delta^{18}\text{O}$ sont présentés dans le tableau ci-après et illustrés par la figure ci-après :

Les résultats bruts	Dans les différentes carottes glaciaires analysées on observe, au pôle Nord comme au pôle Sud, un $\delta^{18}\text{O}$ plus ou moins fortement négatif, avec une alternance de périodes à $\delta^{18}\text{O}$ faible intercalées entre des périodes à $\delta^{18}\text{O}$ plus élevé.
L’interprétation des résultats	Des variations périodiques de la température de l’air sont survenues au cours des 800 000 dernières années, correspondant à des cycles climatiques d’une durée approximative de 100 000 ans. Chaque cycle climatique comporte une longue phase de refroidissement (période glaciaire) et une phase de réchauffement plus rapide (période interglaciaire). La similitude des résultats obtenus au pôle Nord et au pôle Sud suggère la notion de changement climatique global.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

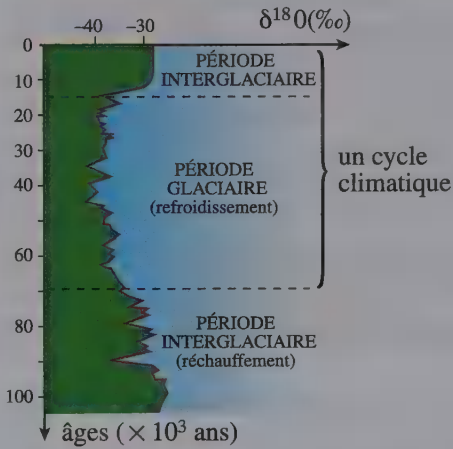


Figure 17.7 – Exemple de données rapportées par une calotte glaciaire au Groenland

➔ À RETENIR

Les calottes glaciaires sont des archives dans lesquelles la teneur relative en ^{18}O de la glace renseigne sur le climat, car la proportion de ^{18}O dans les précipitations neigeuses diminue avec la température. Un $\delta^{18}\text{O}$ fortement négatif dans les calottes glaciaires est révélateur d'un climat froid.

3.3 D'autres indices utilisés pour retracer les évolutions climatiques

La variabilité climatique peut être mise en évidence en analysant les pollens fossilisés dans les séries sédimentaires. L'intérêt de l'étude des pollens fossiles est fondé sur plusieurs faits et principes scientifiques :

- l'ornementation spécifique des grains de pollen permet d'identifier les espèces végétales auxquelles ils appartiennent ;
- les espèces végétales ont des exigences climatiques précises et spécifiques ;
- selon le principe de l'actualisme, les représentants anciens d'une espèce avaient les mêmes exigences climatiques que ceux d'aujourd'hui.

En un lieu donné, il est possible d'établir, à partir d'une carotte sédimentaire forée dans un lac ou dans une tourbière, un diagramme pollinique qui représente pour chaque niveau (que l'on sait dater) de la carotte les pourcentages de pollens des différentes espèces, c'est-à-dire le spectre pollinique.

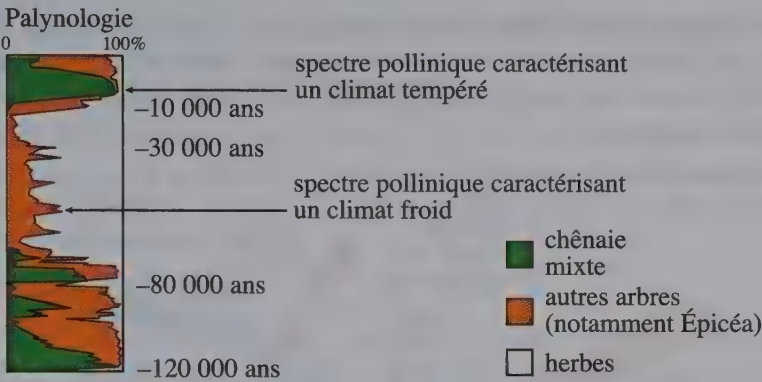


Figure 17.8 – Exemple de diagramme pollinique

Lecture du spectre pollinique	Interprétation tenant compte des préférences climatiques des espèces
Prédominance de pollens d'espèces végétales caractérisant une forêt de feuillus (hêtres, bouleaux)	Climat tempéré
Prédominance de pollens d'espèces végétales caractérisant une zone de steppe (graminées, plantes herbacées et genévriers)	Climat froid

Tableau 17.1 – Exemple simplifié d'interprétation d'un diagramme pollinique

➔ À RETENIR

Les pollens recueillis en des lieux différents confirment l'alternance d'épisodes froids et d'épisodes plus chauds et font percevoir l'étendue planétaire des changements climatiques.

Voir exercices 2, 4, 5 à 7 et 14.

Un facteur majeur influençant le climat global : l'effet de serre

4.1 La notion de bilan radiatif de la Terre

La Terre est en équilibre thermique quand l'énergie qu'elle reçoit (en W.m^{-2}) est égale à l'énergie qu'elle dissipe (en W.m^{-2}).

L'énergie reçue par la Terre correspond d'une part à l'énergie solaire incidente, d'autre part à l'effet de serre, non anthropique et anthropique.

L'énergie dissipée par la Terre a deux origines :

- d'une part, l'énergie réfléchie ; on définit à ce propos l'albédo d'une surface terrestre comme le rapport de l'énergie solaire réfléchie par la surface de la Terre sur l'énergie solaire incidente.
- d'autre part, l'énergie rayonnée.

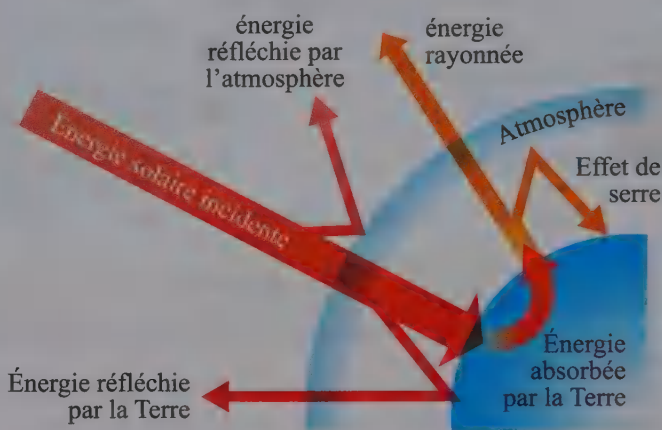


Figure 17.9 – Energie reçue et énergie émise par la Terre

4.2 Le mécanisme de l'effet de serre

La surface de la Terre reçoit une certaine quantité d'énergie solaire. Une partie de l'énergie solaire arrivant au sommet de l'atmosphère est absorbée par la surface de la Terre, et l'autre partie est réfléchie directement vers l'espace. La plus grande partie de l'énergie absorbée est réémise par la surface de la Terre, sous la forme de rayonnement infrarouge. Les couches les plus basses de l'atmosphère contiennent des gaz (CO_2 , H_2O , méthane) qui absorbent ce rayonnement infrarouge, ce qui provoque un échauffement de l'air (ces gaz sont appelés gaz à effet de serre car ils se comportent de la même manière que les vitres d'une serre). Une partie de cette énergie s'échappe de l'atmosphère vers le haut (énergie rayonnée), mais l'autre partie est redirigée vers la surface de la Terre pour être absorbée.

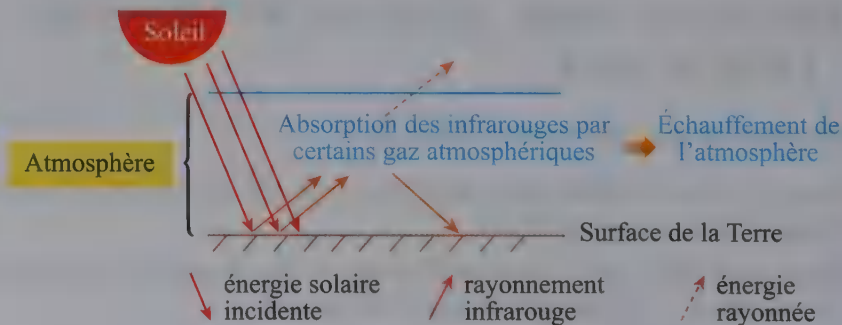


Figure 17.10 – Représentation très simplifiée de l'effet de serre

4.3 La complexité de la relation entre effet de serre et climat

4.3.1 Influence de la teneur en gaz à effet de serre

Le dioxyde de carbone est un gaz naturellement présent dans l'atmosphère. Sa teneur atmosphérique est actuellement en augmentation constante à cause des activités industrielles humaines. Le dioxyde de carbone participe à l'effet de serre, contribuant ainsi au réchauffement de la Terre.

4.3.2 Influence de la température

L'océan contient du dioxyde de carbone dissous, en équilibre avec la teneur en dioxyde de carbone atmosphérique. La solubilité du CO_2 est fonction de la température : plus il fait chaud, moins la teneur en CO_2 dissous dans l'océan est importante. Lors d'un réchauffement climatique, la température des eaux de surface de l'océan augmente et la solubilité du dioxyde de carbone diminue : il se produit alors un dégagement de dioxyde de carbone de l'océan vers l'atmosphère qui entraîne une augmentation de l'effet de serre et par là même un réchauffement du climat.

Inversement, un refroidissement climatique entraîne un flux de CO_2 depuis l'atmosphère vers l'océan et une diminution de l'effet de serre qui accompagne le refroidissement.

➔ À RETENIR

Il existe des interactions réciproques entre le climat (influence de la température) et la concentration en gaz à effet de serre. La modélisation de la relation effet de serre/climat est complexe.

Remarque : l'effet de serre est un facteur parmi d'autres influençant le climat global. D'autres mécanismes agissent sur le climat. En particulier, les variations périodiques et naturelles du climat enregistrées au cours des 8 000 000 dernières années sont pilotées par des modifications de paramètres astronomiques : excentricité de l'orbite terrestre et obliquité de l'axe de rotation de la Terre.

Voir exercices 8 et 9.

4.4 Les modèles d'évolutions climatiques en fonction des émissions de gaz à effet de serre

Les activités humaines ont pour effet d'augmenter la quantité de CO_2 dans l'atmosphère à une vitesse jamais atteinte au cours des temps géologiques. Dans le but d'engager des actions concertées entre les différents états, la communauté scientifique, et en particulier le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) constitué en 1988, tente de prévoir l'évolution du climat en tenant compte des activités humaines.

En s'appuyant sur la connaissance des climats du passé et de la physico-chimie de l'atmosphère et de l'hydrosphère, les scientifiques élaborent des modèles numériques

du climat : les différents paramètres du climat sont reliés entre eux par un système d'équations et leur évolution est calculée à l'aide d'un programme informatique.

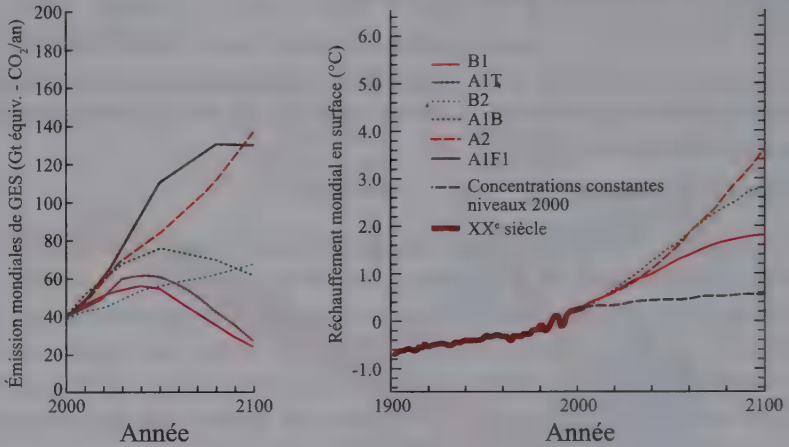


Figure 17.11 – Scénarii d'émissions de GES (gaz à effet de serre) pour la période 2000–2100 et projections relatives aux températures en surface (Graphiques extraits du rapport de synthèse publié par le GIEC en 2007)

Tous les modèles prévoient une poursuite du réchauffement au cours du XXI^{ème} siècle. Selon le dernier rapport du GIEC, publié en 2007, un réchauffement d'environ 0,2 °C par décennie au cours des vingt prochaines années est attendu. En 2100, la température pourrait avoir augmenté de 1,4°C à plus de 6°C par rapport aux années 1990 : la fourchette est large mais elle tient à la fois aux incertitudes des modèles climatiques et aux différents scénarii d'émission de gaz à effet de serre.

2 PROBLÉMATIQUE

Sur de plus grandes durées (par exemple le dernier milliard d'années), quelles étaient les conditions climatiques ?

5 La variation du climat à l'échelle des temps géologiques

5.1 Deux exemples de reconstitutions climatiques anciennes

5.1.1 La période froide du Carbonifère

Le Carbonifère est une subdivision des temps géologiques s'étalant entre -360 Ma et -295 Ma. À cette époque, les continents sont regroupés en un « supercontinent » appelé Pangée, situé vers le sud. La France se trouve dans la zone équatoriale, et montre des forêts tropicales luxuriantes que l'on reconstitue grâce aux fossiles d'arbres contenus dans les dépôts de charbon. On trouve également à cette époque des coraux

et des sols tropicaux.

Le climat de l'Antarctique, de l'Amérique du Sud, de l'Afrique du Sud, de l'Australie et de l'Inde est beaucoup moins clément au vu des traces de glaciation (moraines, blocs erratiques, stries glaciaires) contemporaines. Les régions de la Pangée étaient donc recouvertes d'une immense calotte glaciaire. Une glaciation d'une ampleur considérable a eu lieu à cette époque. Deux facteurs expliquent l'ampleur de cette glaciation :

- la présence de forêts luxuriantes a pu constituer un puits de carbone : en se développant, les végétaux de ces forêts ont pompé le CO_2 atmosphérique. La formation de bassins houillers a empêché le retour à l'atmosphère de ce carbone ;
- la chaîne de montagne hercynienne est en cours d'érosion et ses matériaux subissent une altération intense. L'altération des chaînes de montagne a pour effet de soutirer du CO_2 de l'atmosphère, diminuant ainsi l'effet de serre.

5.1.2 La période chaude du Crétacé

Le Crétacé est une subdivision des temps géologiques s'étalant entre -135 Ma et -65 Ma. À cette époque, la Terre connaît une période chaude qui dure jusqu'à -40 millions d'années (Eocène). La Terre est entièrement dépourvue de calottes glaciaires (on ne trouve aucune trace de glaciation datant de cette époque). Une immense transgression a lieu comme le montre l'extension des roches sédimentaires d'âge crétacé partout dans le monde. Des coraux voient leur zone d'existence largement étendue : ils se développent jusqu'à 40° de latitude nord et sud. La végétation de cette époque est typique de climats chauds jusqu'à des latitudes de 50°N.

On explique ce climat très chaud par des teneurs en CO_2 très supérieures aux teneurs actuelles. Le CO_2 atmosphérique est probablement libéré par l'activité volcanique intense de cette époque : les dorsales montrent de forts taux d'expansion et des épanchements volcaniques spectaculaires ont lieu (Trapps du Deccan en Inde notamment). La température de l'époque est estimée à 10°C de plus que la température actuelle.

➔ À RETENIR

À l'échelle des temps géologiques, des conditions climatiques très éloignées de celles de l'époque actuelle ont existé. Le Carbonifère et le Crétacé illustrent respectivement deux phases possibles dans les climats anciens à grande échelle de temps :

- « Icehouse » : phase de climat froid caractérisé par une large glaciation continentale.
- « Greenhouse » : phase de climat chaud pendant laquelle la Terre est totalement dépourvue de glace.

5.2 Les mécanismes qui contrôlent les variations climatiques aux grandes échelles et temps

La principale variable expliquant les changements climatiques aux grandes échelles de temps est la concentration en gaz à effet de serre de l'atmosphère. Plusieurs mécanismes expliquent ces variations.

5.2.1 Le piégeage du carbone organique dans les roches

Les végétaux et les bactéries photosynthétiques forment leur matière organique à partir du CO_2 puisé dans l'atmosphère ou l'hydrosphère. La respiration est un processus qui libère du CO_2 à partir de la matière organique. Si ces deux processus sont équilibrés, leur action sur la concentration en CO_2 atmosphérique est nulle. Néanmoins, de la matière organique peut être piégée géologiquement et former des roches carbonées (pétrole, charbon). Tout le carbone organique piégé dans ces réservoirs ne retourne pas dans l'atmosphère. Sur le long terme (les roches carbonées mettent des millions d'années à se constituer), la biosphère peut soustraire du CO_2 à l'atmosphère.

5.2.2 L'altération des silicates et des carbonates

À la surface des continents, la dissolution des carbonates (calcaires) consomme du CO_2 selon la réaction :



Les ions HCO_3^- étant dissous dans l'eau, ils sont apportés dans les océans par les rivières. Le bilan de cette réaction est un transfert de CO_2 de l'atmosphère vers l'océan.

L'altération des silicates consomme également du CO_2 . Pour un silicate classique contenant du calcium, on peut écrire la réaction :



Là encore, du CO_2 est transféré depuis l'atmosphère vers l'océan.

Dans l'océan, la précipitation des carbonates libère du CO_2 selon la réaction inverse de la dissolution des carbonates. Les deux réactions s'équilibrent et leur influence sur la teneur en CO_2 atmosphérique est nulle.

En revanche, l'altération des silicates calciques consomme irréversiblement du CO_2 . Lors de la mise en place et de l'érosion de chaînes de montagnes, des quantités énormes de silicates sont altérées, consommant ainsi des quantités considérables de CO_2 . De fait, on a mis en évidence une corrélation entre les différentes orogèneses et les épisodes de refroidissement du climat.

5.2.3 Le volcanisme

L'éruption d'un volcan libère, outre les coulées de lave, des gaz dissous dans les magmas (CO_2 , H_2S). À l'échelle d'une année, les éruptions volcaniques n'apportent qu'une quantité négligeable de CO_2 à l'atmosphère. Cet apport est bien plus considérable à l'échelle du million d'années quand il est continu. Lors de phases de volcanisme intense, le dégazage du manteau est un facteur majeur de l'augmentation de l'effet de serre.

➔ À RETENIR

Les variations climatiques aux grandes échelles de temps sont contrôlées par les variations de la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère, au gré de processus géologiques qui libèrent (précipitation des carbonates, dégazage du manteau par le volcanisme) ou qui consomment (altération des silicates calciques et magnésiens de reliefs orogéniques, dissolution des carbonates, piégeage de la matière organique dans les roches carbonées) du CO_2 .

Voir exercices 3, 12 et 13.

1 V/F Vérification des connaissances

5 min

→ énoncé
p. 408

Répondez par vrai ou faux et justifiez si nécessaire :

- ☒ La Terre possède une atmosphère depuis sa naissance.
 - ☐ a) vrai
 - ☐ b) faux
- ☒ L'atmosphère initiale de la Terre contenait du dioxygène.
 - ☐ a) vrai
 - ☐ b) faux
- ☒ Les êtres vivants sont en partie responsables de l'évolution de l'atmosphère.
 - ☐ a) vrai
 - ☐ b) faux
- ☒ L'atmosphère est devenue oxydante quand des êtres vivants photosynthétiques sont apparus sur la terre ferme.
 - ☐ a) vrai
 - ☐ b) faux

2 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 408

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- ☒ La teneur en CO_2 des bulles d'air hébergées par les glaces polaires :
 - ☐ a) est restée 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
- ☒ 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
- ☒ 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) permet de reconstituer les variations climatiques au cours du dernier milliard d'années
 - ☐ d) varie de la même manière que le delta ^{18}O mesuré dans les glaces polaires

3 V/F Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 409

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

- ☒ Le climat froid du Carbonifère :

- a** est mis en évidence par des traces de glaciation dispersées sur de nombreux continents
- b** s'explique par le rejet important de CO_2 par la forêt houillère
- c** est corrélé à des modifications de la géosphère

2 Le climat chaud du Crétacé

- a** a eu pour conséquence une importante activité volcanique
- b** est révélé par l'extension des coraux à des latitudes élevées et par l'absence de traces de glaciation
- c** est contemporain d'une époque où la teneur en CO_2 atmosphérique était basse

3 Les variations climatiques aux grandes échelles de temps :

- a** sont en relation avec des modifications de la teneur en CO_2 atmosphérique
- b** sont caractérisées par l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires
- c** sont en relation avec des événements géologiques

4 Evolution de l'atmosphère



25 min

→ corrigé
p. 409

Lycée Vieljeux, La Rochelle

L'étude du rapport des isotopes de l'argon dans l'atmosphère terrestre a permis de dater son apparition vers -4,5 milliard d'années, par dégazage de la planète peu après sa naissance. Ce dégazage se poursuit actuellement au niveau des volcans des points chauds ; les gaz émis par ce volcanisme sont : vapeur d'eau (82 +/- 3%) ; CO_2 (12 +/- 4%), N_2 et gaz rares (5 +/- 3%). L'atmosphère actuelle a une composition fort différente.

A l'aide des informations tirées des données, identifiez les étapes de l'évolution de l'atmosphère. Présentez sur un axe les étapes identifiées.

Voir la figure page suivante.

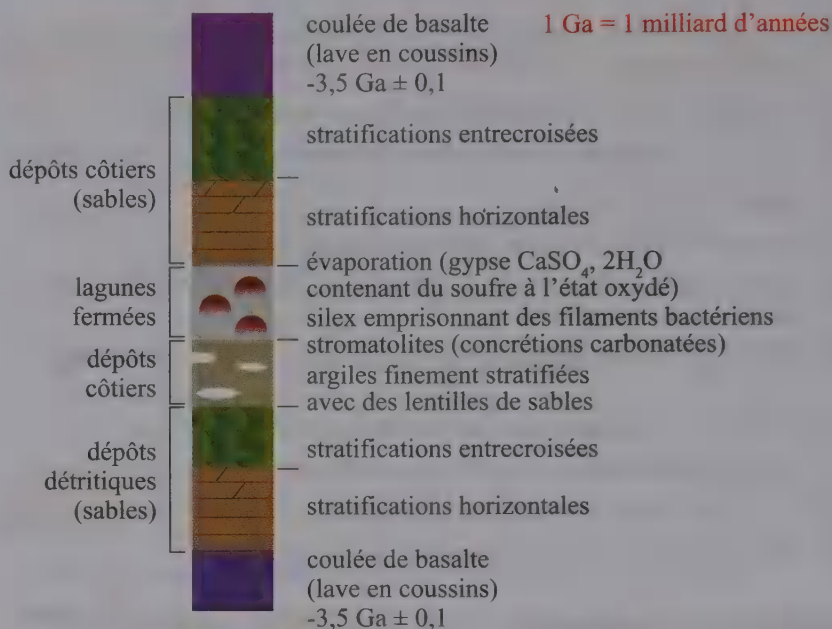


Figure 17.12 – Document A : Caractéristiques de dépôts sédimentaires de l'Archéen (série de Warrawoona à North Pole en Australie)

Les stromatolithes sont des formations sédimentaires apparaissant par précipitation de carbonates autour de cyanobactéries.

Les premiers sols contenant de l'oxyde ferrique Fe_2O_3 (fer à l'état oxydé) n'apparaissent que vers -2 Ga. Auparavant, les sols et les dépôts détritiques contiennent des minéraux constitués d'éléments à l'état réduit (pyrite, FeS_2 par exemple) ; ces minéraux n'existent plus dans les dépôts détritiques après -2 Ga.

tonnage des gisements mondiaux de Fe_2O_3

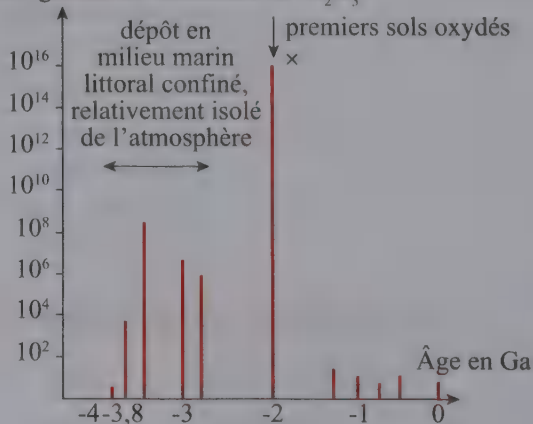


Figure 17.13 – Document B : Importance des gisements d'oxyde ferrique Fe_2O_3 en fonction de leur âge

5 Effet de serre – forçage



Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Julie et Julien préparent un exposé sur le réchauffement climatique, destiné à convaincre les « climato-sceptiques » de leur lycée. S'ils s'accordent sur le fait que l'élévation de la teneur en CO_2 , gaz à effet de serre, provoque un réchauffement, ils ne s'entendent pas sur d'autres facteurs responsables d'un forçage positif. Julien pense que la seule augmentation de la teneur en CO_2 explique directement le réchauffement. Julie affirme qu'il faut aussi prendre en compte, dans l'explication du réchauffement, d'autres mécanismes comme la modification de l'albédo et de la solubilité du CO_2 dans les océans.

En partant de la seule élévation de la teneur en CO_2 atmosphérique et en exploitant les documents proposés, produisez un schéma de causalité montrant divers forçages positifs exagérant le réchauffement et donnant raison à Julie.

Document 1 : L'albédo (également appelé réflectance) est le rapport de l'énergie solaire réfléchi par la surface de la Terre sur l'énergie solaire incidente.

Actuellement, 30% de l'énergie solaire arrivant sur toute la surface de la Terre est réfléchi vers l'espace : l'albédo est de 0,3. Il reflète la proportion actuelle de nuages et de terrains de nature différente (végétation, glace, océan) à la surface de la Terre.

Type de surface	sable	terre sèche	terre humide	basalte	calcaire
Albédo (%)	52	34	15	10	66
Type de surface	neige	béton	Briques et tuiles	Feuilles vertes	Herbes vertes
Albédo (%)	84	54	25	49	41

Tableau 17.2 – Albédo de différentes surfaces

Document 2 :

L'eau de mer est capable de dissoudre du CO_2 de l'atmosphère. La concentration de CO_2 dans l'atmosphère est en équilibre avec celle de l'océan. La dissolution du CO_2 de l'atmosphère dans l'eau de mer dépend de la température de cette dernière.

Voir tableau page suivante.

Température (°C)	Solubilité du CO ₂ (g.L ⁻¹)
0	3,346
10	2,318
20	1,688
30	1,257
40	0,973
50	0,761
60	0,576

Tableau 17.3 - Résultats de la mesure de la solubilité du CO₂ dans une eau de mer portée à différentes températures

6 Climats passés - delta ¹⁸O



20 min

→ corrigé
p. 412

Lycée Turgot, Paris

À partir des informations tirées des documents ci-après, expliquez comment des informations extraites de carottes de sédiments marins peuvent fournir des informations sur l'évolution de la température.

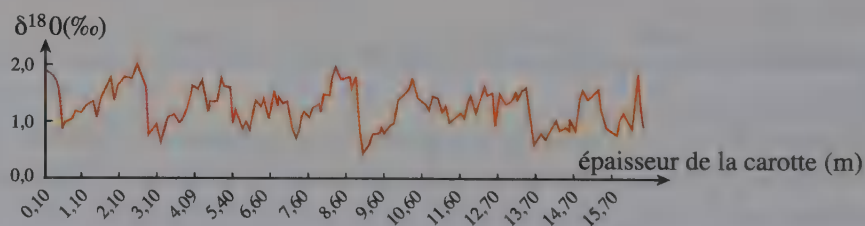


Figure 17.14 – Variation du $\delta^{18}\text{O}$ dans les tests calcaires de Foraminifères planctoniques prélevés le long d'une carotte marine du Pacifique équatorial

Les isotopes de l'oxygène

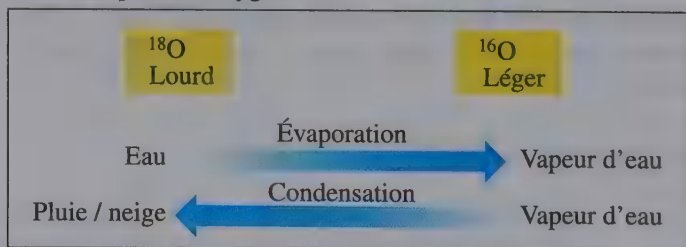


Figure 17.15 – Mécanismes physiques à l'origine de la ségrégation des isotopes de l'oxygène

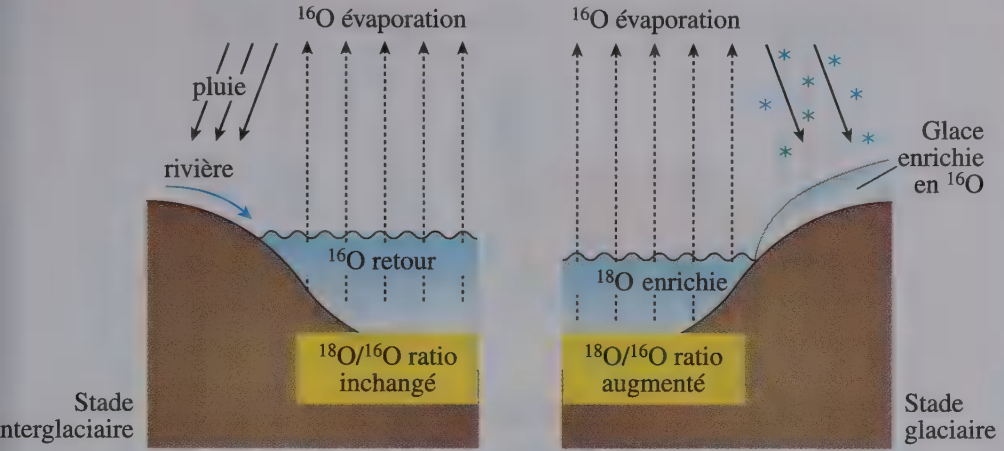


Figure 17.16 – Variations du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ entre les stades glaciaires et interglaciaires

7 Pollens – variations climatiques



10 min

➔ corrigé p. 413

Lycée Guy Nolllet, Arras

Montrez en quoi les documents proposés illustrent l'intérêt de l'étude des pollens dans la reconstitution des climats du passé.

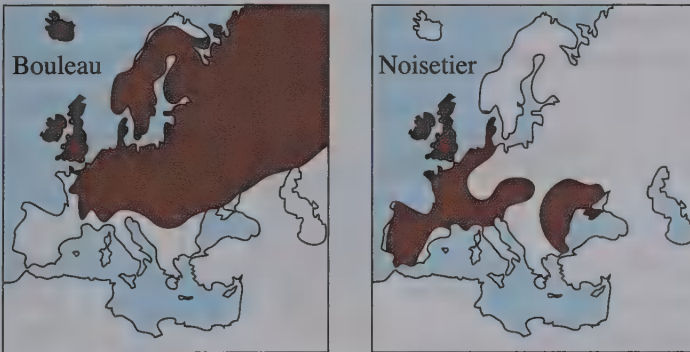


Figure 17.17 – Aires de répartition actuelles du bouleau et du noisetier

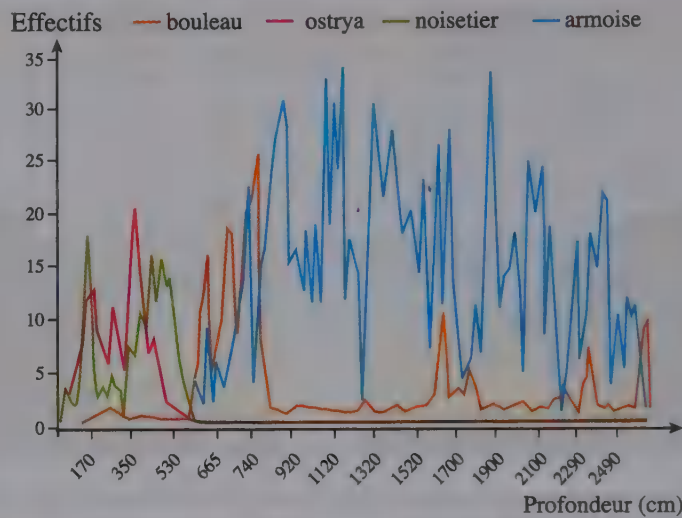


Figure 17.18 – Diagramme pollinique réalisé à partir de l'abondance des pollens récoltés dans une carotte sédimentaire du Laco Grande (Italie)

8 Pollens - delta 18O

★★

25 min

➔ corrigé p. 414

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.

Document 1

Tableau 17.4 –
Préférences de
quelques végétaux
actuels

Végétaux actuels		Plantes herbacées					Arbres			
Préférences		Poacées	Armoise	Chénopodes	Bruyère	Pin	Bouleau	Saule	Aulne	Chêne
Température	Très froide (<-10°C)									
	Froide (-10 à +5°C)	+	+	+	+	+	+			
	Tempérée (+3 à +18°C)	+	+	+	+	+	+	+	+	+

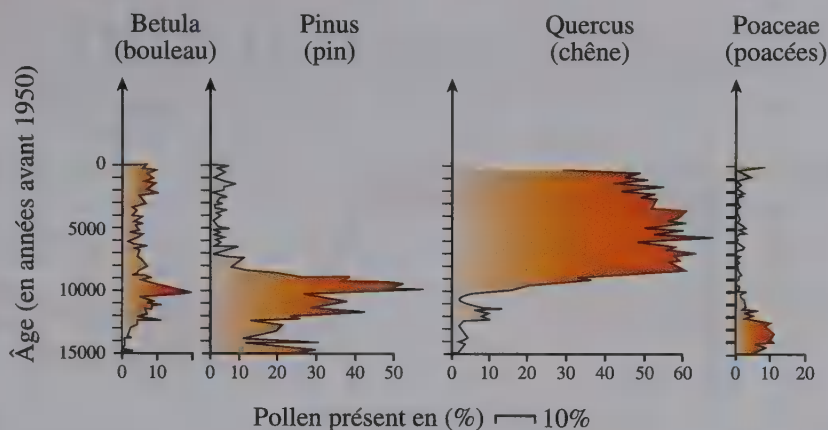


Figure 17.19 – Analyse du contenu en pollen des couches déposées à Rogers Lake, Connecticut, États-Unis

Document 2

Des données géologiques ont permis de reconstituer l'extension des glaciers en Amérique du Nord de -15 000 ans à nos jours. Certains résultats sont présentés ci-après :

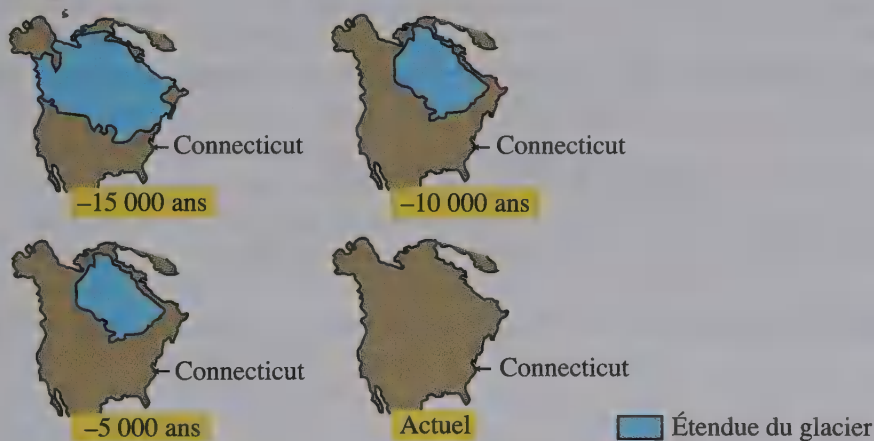


Figure 17.20 – Extension du glacier en Amérique du Nord entre -15 000 ans et l'actuel

Document 3

Les variations du $\delta^{18}\text{O}$ permettent d'avoir une indication sur les valeurs de la température. Une augmentation du $\delta^{18}\text{O}$ traduit un réchauffement.

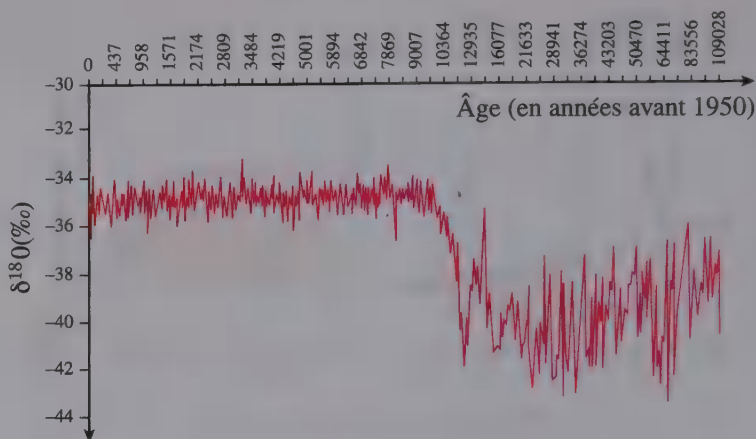
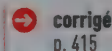


Figure 17.21 – Variations du delta ^{18}O des glaces du Groenland depuis 110 000 ans

9 Climats passés – CO_2



Lycée Blaise Pascal, Orsay

Pour connaître l'évolution de la concentration en CO_2 atmosphérique au cours des derniers millions d'années, on fait appel à une relation entre l'indice stomatique, qui est le rapport entre le nombre de stomates et le nombre de cellules épidermiques d'une feuille, et la pression partielle en CO_2 .

Évolution de l'indice stomatique en fonction de la concentration en CO_2

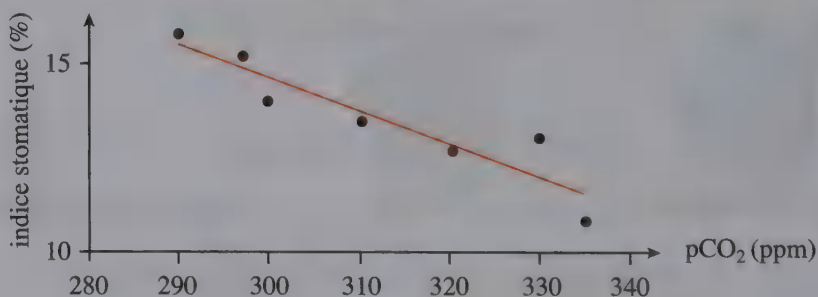


Figure 17.22 – Évolution de l'indice stomatique en fonction de la concentration en CO_2

Cette courbe a été obtenue par des mesures sur des feuilles de végétaux des 120 dernières années (date à laquelle on a pu mesurer la concentration en CO_2 atmosphérique).

1 La pente de la courbe vous paraît-elle logique ? Expliquez pourquoi le nombre de stomates diminue quand la concentration en CO_2 augmente.

1 La courbe précédente a pour équation :

$$\text{indice stomatique } I (\%) = -0,09 \text{ pCO}_2 (\text{ppm}) + 41,6.$$

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 $p\text{CO}_2$ vérifiée à cette époque, estimez la concentration en CO_2 . Quel devait être le climat à cette époque ?

- 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 ?

10 Climats passés - CO_2

★★

25 min

corrigé
p. 415

Lycée Thiers, Marseille

- À la fin du 18^{ème} siècle, des géologues qui explorent le Jura 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 ». Leur origine pose problème. Ces blocs granitiques sont de même nature que les terrains alpins situés à une centaine de kilomètres. Proposez une hypothèse pour expliquer le transport de ces blocs.
- 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-tirer de cette observation ?
- Par des méthodes de datation relative, les géologues arrivent à dater plusieurs groupes de moraines séparées par des couches contenant des plantes fossiles typiques de climats tempérés.
- Que vous apprend cette observation sur la stabilité du climat ? 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 ?
- La figure ci-après montre l'enregistrement dans la calotte Antarctique des variations de température et de la teneur en CO_2 atmosphérique.

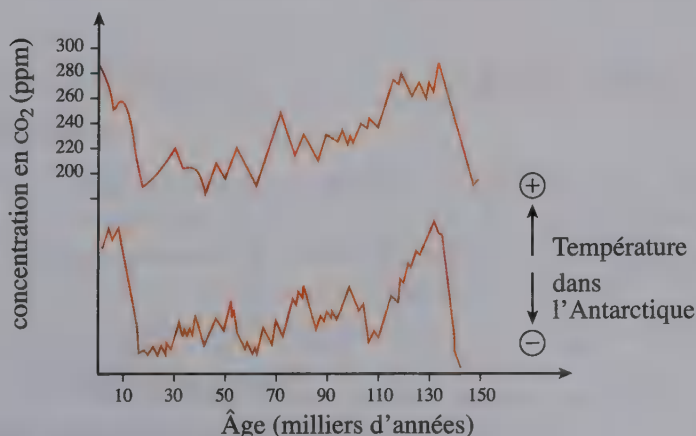


Figure 17.23 – Evolution de la température en Antarctique et de la concentration en CO_2 atmosphériques au cours des 150 000 dernières années

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- Expliquez comment est estimée l'évolution de la température à partir d'une carotte de glace.
- Expliquez comment on peut avoir accès aux concentrations passées en CO_2 atmosphérique.
- Explicitez la relation entre l'évolution des températures et la concentration en CO_2 atmosphérique.

3 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.

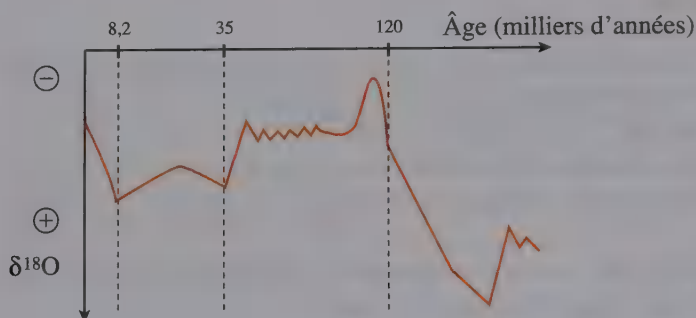


Figure 17.24
– Evolution
du $\delta^{18}\text{O}$ de
Foraminifères
provenant du
Pacifique

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 ?

1 La figure suivante montre l'évolution de la concentration atmosphérique en CO_2 au cours du dernier millénaire.

Quelle est la cause de l'augmentation de cette concentration ? Quelles peuvent être les conséquences de cette augmentation sur le climat du siècle prochain ?

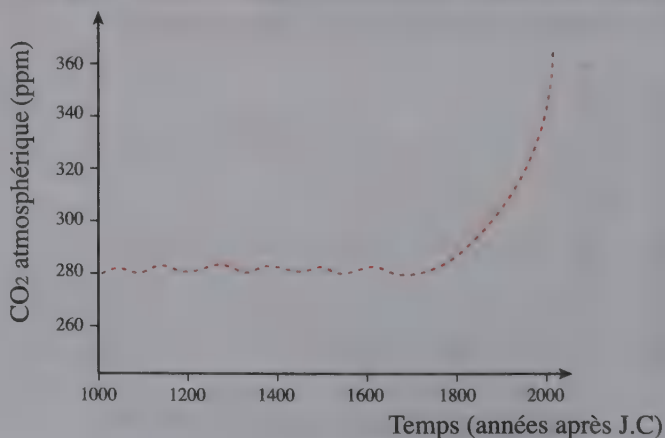


Figure 17.25 – Évolution de la concentration en CO_2 au cours du dernier millénaire

11 Climat – Crétacé



10 min

→ corrigé p. 417

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.

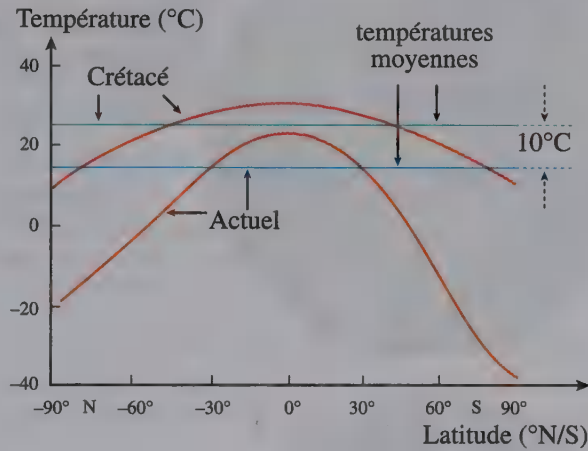


Figure 17.26 – Distribution des températures au Crétacé et à l'actuel

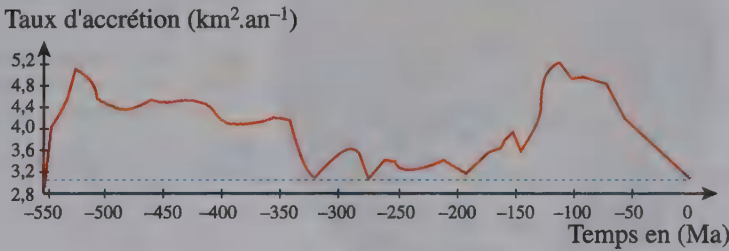


Figure 17.27 – Taux d'accrétion au niveau des dorsales océaniques depuis 600 Ma

12 Climat – Carbonifère



30 min

→ corrigé p. 417

Lycée Balzac, Caen

Le Carbonifère est une période de l'ère Primaire qui s'étale de -360 à -295 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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Vous proposerez une explication à cette évolution par la mise en relation de ces mêmes documents.

Document 1

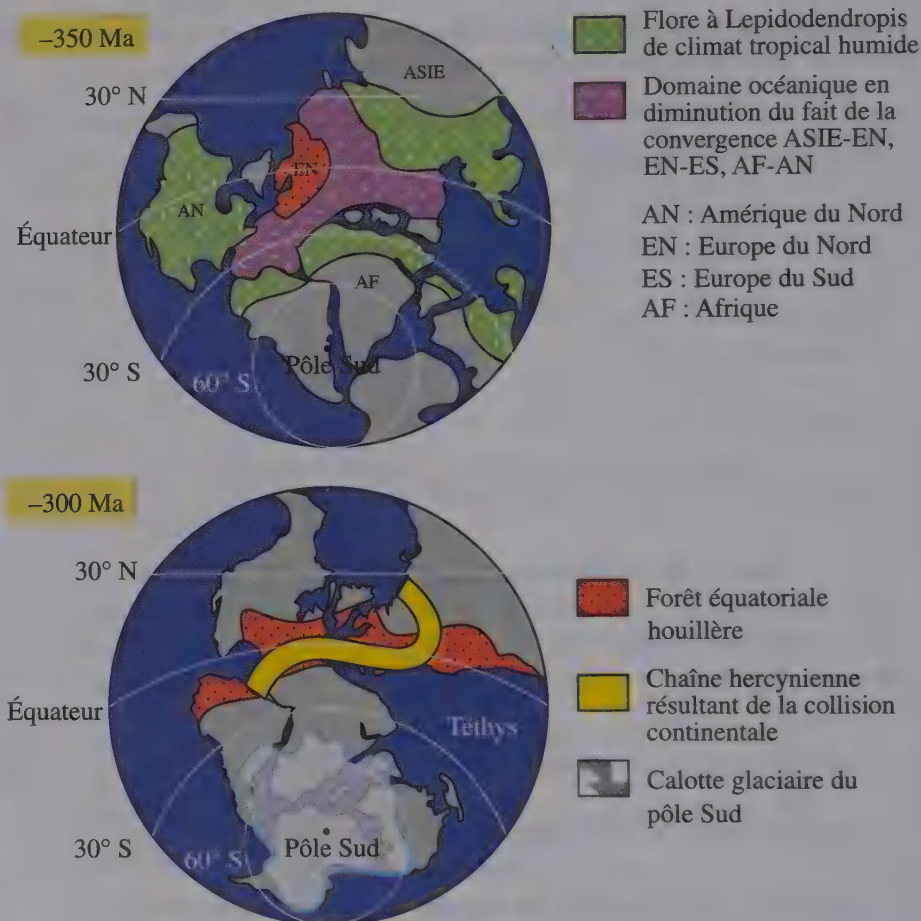


Figure 17.28 – Reconstitutions de la géographie mondiale au début et vers la fin du Carbonifère

Document 2



Figure 17.29 – Reconstitution d'une forêt au Carbonifère

Document 3

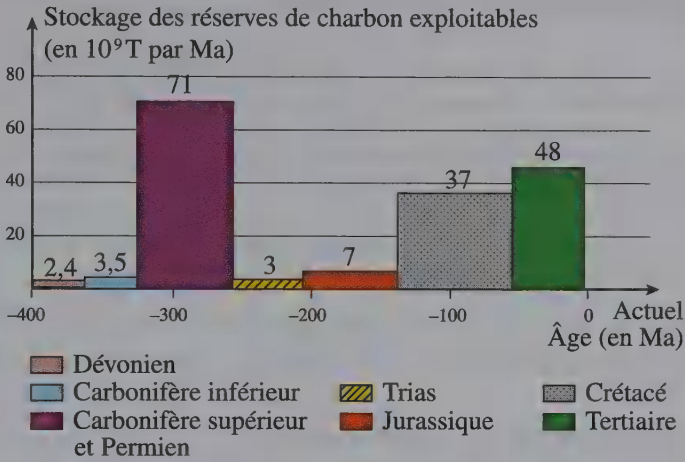


Figure 17.30 – Réserves de charbon exploitables en milliards de tonnes déposées par tranches d'un million d'années (plus la période est ancienne, plus on sous-estime cette accumulation car une partie de la matière organique a pu être recyclée depuis)

Document 4

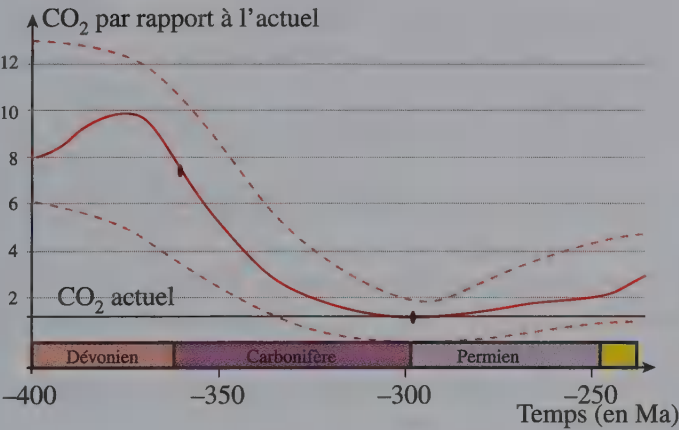


Figure 17.31 – Estimation de la quantité de CO₂ atmosphérique entre -400 et -250 millions d'années, exprimée par rapport à la quantité actuelle

1 V/F Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 394

- Vrai : l'atmosphère primitive de la Terre était formée, comme pour toutes les autres planètes du système solaire, d'hydrogène et d'hélium.
- Faux : l'atmosphère est restée réductrice, c'est-à-dire dépourvue de dioxygène jusqu'à -1,7 milliards d'années.
- Vrai : la production de dioxygène par les êtres vivants des océans a permis l'apparition du gaz dans l'atmosphère.
- Faux : O_2 est apparu dans l'atmosphère bien avant que des êtres vivants n'existent sur la terre ferme : il provenait de l' O_2 dissous dans les océans.

2 QCM Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 394

Réponse exacte pour chaque série de propositions : **1 c**, **2 b** et **3 b**

Explications complémentaires :

- La proposition « a » est fausse car la teneur en CO_2 de l'atmosphère a varié cycliquement et naturellement depuis au moins 800 000 ans, donc bien avant la révolution industrielle. La proposition « b » est fausse car la teneur en CO_2 atmosphérique n'a jamais été nulle : depuis 800 000 ans et jusqu'au démarrage de la révolution industrielle, elle a oscillé entre environ 200 et 300 ppm. La proposition « d » est fausse car, du fait des activités anthropiques qui émettent du CO_2 en grande quantité, la teneur atmosphérique actuelle en CO_2 est particulièrement élevée, voisine de 400 ppm.
- La proposition « a » est fausse car la proportion de ^{18}O dans les précipitations neigeuses diminue avec la température. Pour cette raison, le delta ^{18}O mesuré dans la glace, elle-même alimentée par les précipitations neigeuses, est d'autant plus faible qu'il faisait froid au lieu considéré. La proposition « c » est fausse car la durée d'un cycle climatique, caractérisé par les variations du delta ^{18}O , est de 100 000 ans. La proposition « d » est fausse car une période interglaciaire est une phase de réchauffement donc une période à delta ^{18}O plus élevé.
- La proposition « a » est fausse car l'isotope ^{18}O participant peu à la formation de la glace, le développement d'importantes calottes glaciaires va enrichir l'eau de mer en ^{18}O ce qui sera révélé par une élévation du delta ^{18}O dans les tests. La proposition « c » est fausse car les forages dans les sédiments océaniques ne permettent pas de remonter au delà de 800 000 ans pour la mise en évidence de changements climatiques caractérisés par l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires. La proposition « d » est fausse car lors des périodes où le delta ^{18}O des glaces est faible (périodes froides), celui des tests est élevé, et réciproquement.

3 V/F Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 394

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

1. Affirmation inexacte = **[b]**

Rectification :

- [b]** Le climat froid du Carbonifère s'explique par le prélèvement important de CO_2 par la forêt houillère associé à une fossilisation importante de matière organique végétale échappant ainsi au recyclage, ainsi que par la consommation de CO_2 par l'altération chimique des silicates calciques à la suite de l'orogénèse hercynienne.

2. Affirmations inexactes = **[a]** et **[c]**

Rectifications :

Le climat chaud du Crétacé

- [a]** a été causé par une importante activité volcanique
- [c]** est contemporain d'une époque où la teneur en CO_2 atmosphérique était importante

3. Affirmation inexacte = **[b]**

Rectification :

- [b]** Les variations climatiques aux grandes échelles de temps sont caractérisées par l'alternance de phases dites « Icehouse » (phase de climat froid caractérisée par une large glaciation continentale) et « Greenhouse » (phase de climat chaud pendant laquelle la Terre est totalement dépourvue de glace).

4 Evolution de l'atmosphère

→ énoncé
p. 395

Lycée Vieljeux, La Rochelle

Le document A est une colonne stratigraphique montrant les dépôts sédimentaires âgés de 3,5 Ga environ à North Pole en Australie. On observe une succession de stratifications horizontales et entrecroisées témoignant de dépôts côtiers, ainsi que la présence de sable. Le dépôt s'est donc effectué dans une étendue d'eau en milieu peu profond. On note l'existence d'une lagune fermée comportant des stromatolithes et des silex emprisonnant des filaments bactériens. Le gypse qui s'est formé dans la lagune par évaporation contient du soufre à l'état oxydé. Cela indique qu'il y avait du dioxygène dans la lagune. La présence de stromatolithes indique d'après nos connaissances la présence de cyanobactéries productrices de dioxygène dans la lagune.

Remarque : on sait que les stromatolithes sont des dépôts carbonatés dus à l'activité photosynthétique de cyanobactéries. Il ne faut cependant pas négliger les autres indices permettant de conclure à une activité photosynthétique.

On peut conclure du premier document qu'il y a 3,5 milliards d'années, en Australie, il existait des bactéries capables de produire du dioxygène par photosynthèse, ce qui a oxydé le soufre dans la lagune. Le document B est un graphique montrant la masse

des gisements mondiaux de Fe_2O_3 en fonction de leur âge. On observe une masse importante de ces gisements entre 3,8 et 2,8 Ga qui correspond à des dépôts en milieu marin littoral confiné et isolé de l'atmosphère. Cela montre qu'il y avait du dioxygène sur Terre à cette époque mais uniquement en milieu marin littoral. En effet, à partir de -2 Ga, on observe une forte masse de gisements de Fe_2O_3 qui correspond aux premiers sols oxydés. Le texte précise qu'auparavant les sols contenaient des minéraux indiquant un milieu réducteur comme la pyrite. Cela indique que du dioxygène se trouvait dans l'atmosphère pour pouvoir oxyder les sols à partir de -2 Ga.

Les informations tirées des deux documents permettent de conclure que du dioxygène était produit à partir de -3,8 Ga en milieu marin, sans doute par des organismes apparentés aux cyanobactéries. Cependant ce dioxygène restait dans l'eau et l'atmosphère était réductrice comme en témoigne la présence de minéraux à l'état réduit dans les paléosols. A partir de -2 Ga, l'existence de sols oxydés montre que le dioxygène est présent dans l'atmosphère et que celle-ci est donc devenue oxydante.

⚠ ATTENTION

Le graphique demandé doit se baser uniquement sur les conclusions tirées des documents. Il ne faut donc pas les compléter avec vos connaissances.

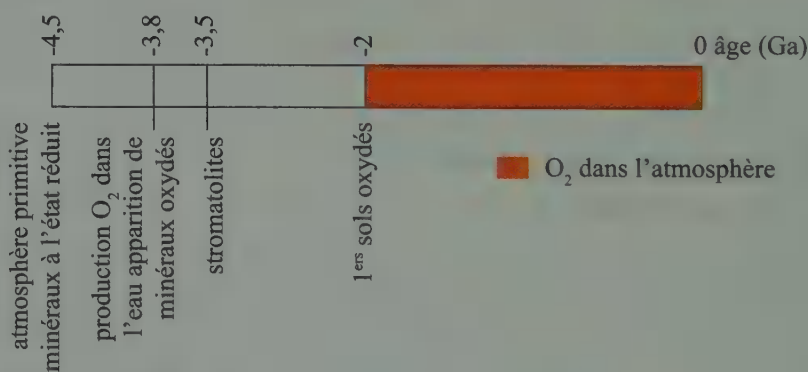


Figure 17.32 – Etapes de l'évolution de l'atmosphère déduites des données

5 Effet de serre – forçage

→ énoncé
p. 397

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

MÉTHODE

Pour préparer le schéma de causalité, explorez de manière indépendante la piste « albédo » et la piste « solubilité du CO_2 » ce qui permet d'identifier deux forçages positifs qui se connecteront dans le schéma de causalité.

Travail préparatoire :

- On observe que parmi toutes les surfaces, c'est la glace qui a l'albédo le plus élevé. On en déduit que si de la glace présente en surface de la Terre fond, l'albédo moyen de la Terre diminue. Il en résulte une plus grande absorption de l'énergie solaire incidente, donc un réchauffement.
- On observe que la solubilité du CO_2 dans l'eau diminue lorsque la température augmente. Par conséquent, un réchauffement aura pour conséquence d'augmenter la teneur en CO_2 atmosphérique.

On peut alors proposer le schéma de causalité suivant :

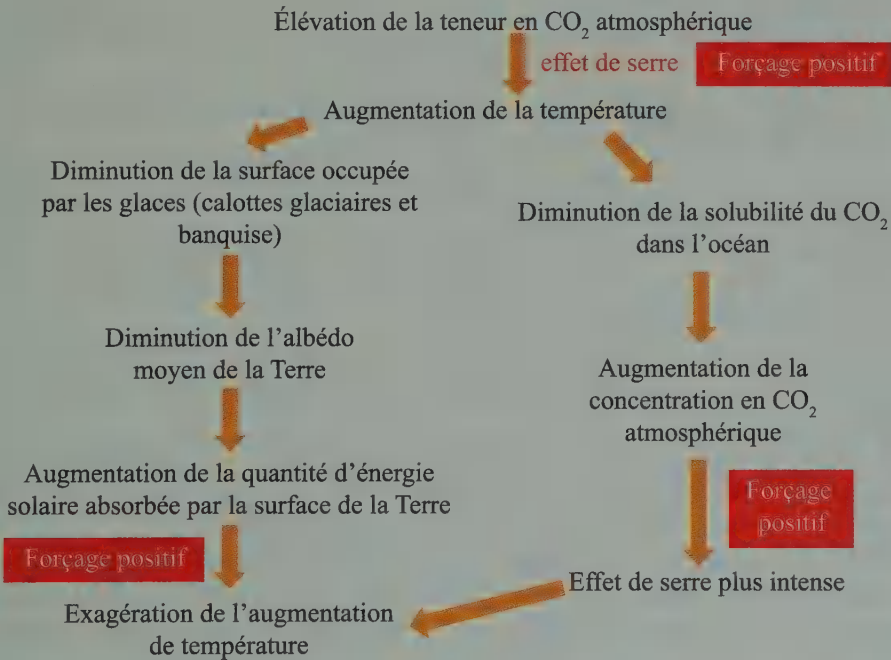


Figure 17.33 – Schéma de causalité montrant divers forçages positifs exagérant le réchauffement

5 Climats passés – delta ^{18}O

→ énoncé
p. 398

Lycée Turgot, Paris

MÉTHODE

Construire le raisonnement à partir des seules informations proposées en s'adaptant à une situation nouvelle : l'explication du $\delta^{18}\text{O}$ élevé dans l'océan en période froide passe par l'absence de renouvellement de l'océan en ^{16}O via l'eau des rivières puisque pris dans la glace.

ATTENTION

Ne confondez pas le $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments (présenté dans le premier document) avec celui de la glace (évoqué dans le troisième document).

Le premier document montre les variations du $\delta^{18}\text{O}$ le long d'une carotte sédimentaire. On y observe une alternance de valeurs plutôt élevées du $\delta^{18}\text{O}$ (voisines de 2 ‰) et de valeurs plutôt faibles $\delta^{18}\text{O}$ (inférieures à 1 ‰) selon l'épaisseur de la carotte. Sachant que le $\delta^{18}\text{O}$ est mesuré dans les tests carbonatés et que l'épaisseur de la carotte sédimentaire traduit l'écoulement du temps, on en déduit que des facteurs ont fait varier, au cours des temps géologiques, le $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates.

Le deuxième document montre le comportement des isotopes de l'oxygène lors des processus physiques d'évaporation et de condensation :

- lors d'un épisode d'évaporation, la vapeur d'eau produite est appauvrie en ^{18}O et enrichie en ^{16}O par rapport à l'océan ;
- lors d'un épisode de condensation (correspondant à la formation de pluie ou de neige), la vapeur d'eau des nuages s'appauvrit en ^{18}O car l'isotope ^{18}O a tendance à passer plus facilement dans la phase liquide.

Le troisième document montre les conséquences du comportement des isotopes de l'oxygène sur la valeur du rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ en période interglaciaire et glaciaire :

- en période interglaciaire, la part de ^{16}O extraite de l'océan lors de l'évaporation se retrouve dans les pluies par condensation et revient à l'océan par le biais des rivières. Au final, le ratio $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ n'a pas changé dans l'océan.
- en période glaciaire, la part de ^{16}O extraite de l'océan lors de l'évaporation se retrouve dans la neige par condensation et ne retourne pas à l'océan car une calotte glaciaire se forme. Par conséquent, l'océan s'enrichit en ^{18}O . Au final, le ratio $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ augmente dans l'océan.

Ces données permettent de comprendre que la composition isotopique des carbonates marins (exprimée par le $\delta^{18}\text{O}$) va refléter la température qui régnait lors de la formation des tests. En particulier, pendant un stade glaciaire le $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates est plus élevé du fait de l'enrichissement de l'océan en ^{18}O .

Résumé : les périodes de refroidissement (stades glaciaires) sont repérables par des valeurs élevées du $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments tandis que les stades interglaciaires sont repérables par des valeurs basses du $\delta^{18}\text{O}$. Les informations extraites des carottes de sédiments marins peuvent donc fournir des informations sur l'évolution de la température.

7 Pollens – variations climatiques

➔ énoncé
p. 399

Lycée Guy Nolllet, Arras

MÉTHODE

La lecture du diagramme pollinique étant complexe, il faut se limiter aux pourcentages des pollens des deux espèces dont on connaît l'extension géographique.

ATTENTION

N'essayez pas de cibler les préférences du Bouleau et du Noisetier : on peut se contenter de la notion générale d'exigences climatiques.

On observe sur les cartes proposées des différences dans les aires de répartition actuelles du Bouleau et du Noisetier : le Bouleau a une aire de répartition très vaste, qui s'étend vers l'est et vers le nord alors que l'aire de répartition du Noisetier est restreinte à quelques pays dont la France, l'Espagne et l'Angleterre. On peut supposer que ces deux espèces ont des exigences climatiques (température, pluviosité) bien précises et différentes, ce qui expliquerait leur répartition différente.

L'analyse des pollens rencontrés dans une carotte sédimentaire réalisée dans le Laco Grande (Italie) montre des spectres polliniques différents à différentes profondeurs. Par exemple, des pollens fossilisés dans les sédiments situés à 700 cm de profondeur sont constitués de 25 % de pollen de Bouleau et ne comportent pas de pollens de Noisetier, alors que des pollens 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 pollens de Bouleau. Sachant que la profondeur des sédiments dans la carotte correspond à l'écoulement du temps et que le Bouleau et le Noisetier ont des exigences différentes, on déduit du diagramme pollinique proposé que les conditions climatiques ont changé au cours des temps géologiques dans la région étudiée.

En résumé, l'exploitation d'un diagramme pollinique en relation avec la connaissance des exigences climatiques des espèces montre l'intérêt de l'étude des pollens en vue de reconstituer les climats du passé.

8 Pollens – delta ^{18}O
 énoncé
p. 400

Lycée Victor Hugo, Besançon

Le document 1 permet d'analyser les pollens des couches sédimentaires déposées à Rogers Lake. On observe des spectres polliniques différents pour des couches d'âge différent. Par exemple, des pollens fossilisés dans les sédiments d'âge compris entre -15 000 et -12 000 ans sont constitués de 10 % de pollen de Poacées et ne comportent pratiquement pas de pollens de Chêne, alors que des pollens fossilisés dans les sédiments plus récents que -10 000 ans comportent majoritairement des pollens de Chêne, au détriment des autres espèces qui sont peu représentées. Or le Chêne a des exigences différentes de celles des autres espèces représentées dans le diagramme pollinique : à la différence du Bouleau du Pin ou des Poacées qui peuvent s'installer sous des climats froids ou tempérés, le Chêne requiert un climat exclusivement tempéré.

On déduit du diagramme pollinique proposé et de la connaissance des exigences thermiques des espèces que les conditions climatiques ont changé au cours des 15 000 dernières années dans la région étudiée : la période comprise entre -15 000 et -12 000 ans correspond à un climat froid ne répondant pas aux exigences du chêne, puis le climat est devenu plus clément comme le montre la prépondérance des pollens de chêne dans le diagramme pollinique à partir de -10 000 ans.

Le document 2 montre l'extension de glaciers à différentes dates en Amérique du Nord. On observe une calotte glaciaire très étendue au nord du Connecticut il y a 15 000 ans ; cette calotte occupait une surface deux fois moins importante il y a 10 000 ans et il y a 5 000 ans, et elle n'est plus présente à l'heure actuelle. L'extension de cette calotte nous renseigne sur les variations de température : le climat était très froid il y a 15 000 ans, il était moins froid il y a 10 000 ans et 5 000 ans et il est plus clément actuellement. On met ainsi en évidence deux épisodes de réchauffement (déglaçiation) en Amérique du Nord : l'un entre -15 000 ans et -10 000 ans et l'autre entre -5 000 ans et l'actuel, sans qu'on puisse dater précisément ces épisodes.

Le document 3 montre les variations du $\delta^{18}\text{O}$ des glaces du Groenland depuis 110 000 ans. On nous dit qu'une augmentation du $\delta^{18}\text{O}$ traduit un réchauffement. Or on observe sur le graphique qu'entre 16 077 et 10 634 années avant 1950 le $\delta^{18}\text{O}$ est passé d'une valeur moyenne de -40 ‰ à une valeur moyenne de -35 ‰. On en déduit qu'un réchauffement a eu lieu pendant cette période, ce qui est en accord avec les données fournies par les deux premiers documents.

En résumé, on dispose d'une famille d'indices (indices biologiques fournis par le pollen, indices physico-chimiques fournis par les variations du $\delta^{18}\text{O}$ de la glace, indices géographiques fournis par l'extension de la calotte polaire) permettant d'affirmer que l'Amérique du Nord a connu une glaciation importante avant -15 000 ans suivie d'un réchauffement postérieur à cette date.

9 Climats passés – CO₂→ énoncé
p. 402

Lycée Blaise Pascal, Orsay

1 À l'aide du graphique proposé, on observe que plus la concentration en CO₂ atmosphérique est importante, plus l'indice stomatique est faible. On peut expliquer cette relation de manière logique : en effet, plus la concentration en CO₂ est élevée, moins la plante a besoin de mobiliser de stomates pour acheminer à l'intérieur de la feuille le CO₂ indispensable à la photosynthèse. De plus, la limitation du nombre de stomates en période chaude (correspondant à une teneur en CO₂ atmosphérique élevée) permet de limiter les pertes d'eau par évapotranspiration.

2 D'après la relation donnée, on peut écrire : $p\text{CO}_2 = (41,6 - I)/0,09$.

On obtient ainsi des concentrations en CO₂ de 284 et 329 ppm pour des indices stomatiques valant respectivement 16 % et 12 %. Ces valeurs correspondent à des climats tempérés, comparables aux climats actuels.

3 Un indice stomatique de 9 % traduit une teneur en CO₂ égale à 362 ppm. Cette valeur est caractéristique d'un climat plus chaud.

10 Climats passés – CO₂→ énoncé
p. 403

Lycée Thiers, Marseille

1 Les blocs étant disposés au fond des vallées, l'eau apparaît comme l'agent de transport le plus probable. Il reste à savoir si cette eau était sous forme liquide (crues venant des Alpes) ou solide (transport par les glaciers).

2 L'observation de moraines à proximité des blocs erratiques montre que ce sont les glaciers qui ont transporté les blocs. L'extension des glaciers était plus grande dans le passé.

3 La présence de sédiments typiques de climats tempérés intercalés dans les moraines nous apprend que le climat a varié dans le passé. Des périodes glaciaires (dont les marqueurs sont les moraines) ont alterné avec des périodes plus clémentes (dont les marqueurs sont les sédiments typiques de climats tempérés). La difficulté de l'étude du climat en domaine continental est liée à la conservation des archives climatiques : l'érosion peut effacer la trace de certains dépôts. Ainsi, les géologues avaient trouvé à la fin du 19^{ème} siècle l'existence de quatre glaciations au Quaternaire. Les techniques d'étude plus appropriées concernent des dépôts continus. Il s'agit de l'analyse des variations du $\delta^{18}\text{O}$ des glaces polaires et des sédiments marins. Ces analyses ont montré que plus de quatre glaciations ont eu lieu au cours du Quaternaire.

4 a Actuellement, on sait que plus il fait froid à un endroit, plus le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations est faible : en effet la masse d'air ayant donné naissance aux précipitations a subi de nombreux épisodes de condensation au cours desquels elle s'est appauvrie en ^{18}O . On suppose, d'après le principe de l'actualisme, que cette relation entre

le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations et la température était également vraie dans le passé. La mesure du $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations permet donc de connaître les températures passées : on parle de thermomètre isotopique.

4 **B** La composition de l'atmosphère dans le passé est connue par l'analyse des bulles de gaz piégées dans la glace.

4 **C** L'étude de la calotte Antarctique montre une très nette corrélation, au cours des 150 000 dernières années, entre les variations de la température et celles de la concentration en CO_2 atmosphérique. Cette corrélation repose sur des liens de cause à effet :

- le CO_2 est un gaz à effet de serre : une élévation de la concentration en CO_2 a donc un effet réchauffant sur le climat ;
- la solubilité du CO_2 dans l'océan diminue lorsque la température augmente : du CO_2 est donc libéré dans l'atmosphère lors des périodes interglaciaires.

■ Lorsqu'il y a beaucoup d'eau sous forme de calottes polaires (qui contiennent très peu de ^{18}O), le $\delta^{18}\text{O}$ de l'océan augmente et donc celui des tests carbonatés de Foraminifères marins aussi. Le $\delta^{18}\text{O}$ des tests carbonatés peut donc servir à estimer les températures passées (ou au moins la quantité d'eau présente sous forme de calottes) : le $\delta^{18}\text{O}$ des tests carbonatés est d'autant plus élevé que la température de l'eau de mer était basse lors de la fabrication des tests. Le document proposé montre des similitudes entre les variations de température (révélées par le $\delta^{18}\text{O}$ dans la calotte glaciaire) de l'Antarctique et celles du $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments marins du Pacifique : les épisodes froids (diminution de température) dans l'Antarctique sont associés à un indice $\delta^{18}\text{O}$ élevé dans les sédiments marins du Pacifique, tandis que les épisodes plus cléments (augmentation de température) dans l'Antarctique sont associés à une baisse du $\delta^{18}\text{O}$ dans les sédiments marins du Pacifique. On en déduit qu'est survenu, pendant la période étudiée, un cycle période glaciaire/période interglaciaire à l'échelle globale. En réutilisant le document donnant l'évolution de la température en Antarctique, on peut établir que la période glaciaire a commencé il y a 120 000 ans environ et s'est terminée il y a environ 18 000 ans. Nous sommes actuellement dans une période interglaciaire.

■ La figure proposée montre une élévation importante de la teneur en CO_2 atmosphérique : la teneur en CO_2 était stable et égale à 280 ppm jusqu'en 1800 puis a augmenté brutalement pour atteindre 360 ppm à notre époque. Cette augmentation amorcée au 19^{ème} siècle avec la révolution industrielle est due à l'utilisation de combustibles fossiles (charbon, pétrole).

Les conséquences de cette augmentation peuvent être une augmentation de l'effet de serre, et donc un réchauffement rapide du climat.

11 Climat – Crétacé→ énoncé
p. 405

Lycée Masséna, Nice

Avec le premier graphique proposé, on constate qu'au Crétacé la température moyenne était de 25°C alors que la température moyenne actuelle est de 15°C. On observe également qu'au Crétacé les variations de température en fonction de la latitude étaient peu marquées : les températures allaient de 10°C aux pôles à 30°C à l'équateur, alors qu'actuellement les températures s'échelonnent de -40°C (au pôle Sud) à 22°C (à l'équateur). Le climat du Crétacé est donc un climat chaud caractérisé par de faibles amplitudes thermiques entre l'équateur et les pôles.

Le deuxième graphique indique qu'au Crétacé le taux d'accrétion au niveau des dorsales océaniques a été plus important qu'à d'autres périodes : l'accrétion a été de 5,2 km²/an entre -135 Ma et -65 Ma c'est-à-dire pendant toute la durée du Crétacé. On en déduit que les épanchements volcaniques ont été très importants au Crétacé. Or on sait qu'un volcanisme intense s'accompagne d'une libération de CO₂ provenant du dégazage du manteau. On sait de plus que le CO₂ est un gaz à effet de serre contribuant au réchauffement planétaire. En résumé, le Crétacé a été marqué par un magmatisme intense et durable en relation avec l'accrétion au niveau des dorsales. Le dégazage du manteau lors de ce volcanisme intense a libéré de grandes quantités de CO₂ dans l'atmosphère ce qui a entraîné une augmentation de l'effet de serre. De ce fait, la température moyenne du globe s'est élevée de 10°C.

12 Climat – Carbonifère→ énoncé
p. 405

Lycée Balzac, Caen

Informations tirées des documents

Le document 1 permet de constater, par le biais des changements de la géographie mondiale, l'évolution du climat au Carbonifère. On observe qu'au début du Carbonifère, il y a 350 Ma, la forêt tropicale humide était étendue sur une surface assez importante de la planète et il n'y avait pas de calotte glaciaire. Ces deux caractéristiques (abondance de la végétation de type forêt et absence de glace) témoignent d'un climat plutôt chaud.

On observe qu'à la fin du Carbonifère, il y a 300 Ma, la forêt est restreinte à la zone équatoriale. Le domaine océanique est plus étendu dans la zone équatoriale. On note la présence de la chaîne hercynienne et le développement d'une calotte glaciaire au Pôle Sud. Ces caractéristiques (régression de la forêt et apparition d'une calotte de glace) témoignent d'un climat plutôt froid.

Le document 2 présente l'aspect de la forêt au Carbonifère. On y observe une végétation luxuriante constituée d'arbres et de fougères arborescentes.

Avec le document 3, on observe qu'au cours des temps géologiques c'est au Carbonifère que la formation de réserves de charbons a été la plus importante : au Carbonifère supérieur et au Permien le stockage du charbon atteint 71.109 tonnes par million

d'années. Sachant que la formation du charbon résulte de la fossilisation de matière organique morte, on en déduit qu'à la fin du Carbonifère une quantité importante de matière organique d'origine végétale a échappé au recyclage.

Le document 4 permet de constater une importante chute de la quantité de CO_2 atmosphérique au Carbonifère : au début du Carbonifère, il y a 350 Ma, la teneur en CO_2 était 6 fois supérieure à la teneur actuelle ; à la fin du Carbonifère, il y a 300 Ma, la teneur en CO_2 rejoint la teneur actuelle.

Mise en relation des documents

et explication du bouleversement climatique au Carbonifère

Le refroidissement climatique constaté au Carbonifère (document 1) est corrélé à la diminution de la teneur en CO_2 à la même époque (document 4). On sait en effet que le CO_2 est un gaz à effet de serre : une diminution de la teneur en CO_2 atmosphérique entraîne donc une modération de l'effet de serre ce qui cause le refroidissement climatique.

La diminution de la teneur en CO_2 (document 4) peut s'expliquer par :

- l'importante fossilisation de la matière organique produite par la végétation luxuriante de l'époque (document 2), qui s'est accumulée dans les réserves de charbon (document 3). Du fait de ce stockage, une quantité importante de matière organique n'a pas été dégradée par respiration, ce qui a eu pour conséquence de diminuer le rejet de CO_2 dans l'atmosphère ;
- l'orogénèse hercynienne (document 1), car lorsqu'une chaîne de montagnes est en cours d'érosion, ses matériaux subissent une altération intense. L'altération des chaînes de montagne a pour effet de soutirer du CO_2 de l'atmosphère car elle fait intervenir des réactions chimiques (altération des silicates calciques) qui sont consommatrices de CO_2 .

Glycémie et diabète (spécialité)

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Des aliments glucidiques au glucose sanguin : intervention des enzymes digestives
3. La régulation de la glycémie : intervention des hormones pancréatiques
4. Les phénotypes diabétiques

1 Introduction

La glycémie est la concentration sanguine en glucose. Il s'agit d'un paramètre du milieu intérieur, généralement exprimé en g.L^{-1} . Il existe des causes de variations quotidiennes importantes de la glycémie au cours d'une journée : la prise alimentaire est discontinue ce qui fait que la glycémie devrait s'élever considérablement après un repas et s'abaisser considérablement lorsque l'organisme est à jeun ; de plus, la consommation de glucose par les cellules varie au cours d'une journée ce qui devrait entraîner des fluctuations importantes de la glycémie.

Malgré toutes ces causes de variations, la glycémie d'un individu non diabétique oscille en permanence autour d'une valeur physiologique voisine de 1g.L^{-1} , indicatrice d'une bonne santé.

glycémie (g.L^{-1})

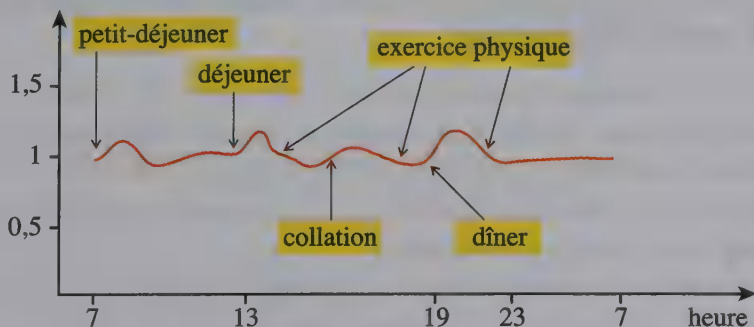


Figure 18.1 – Variations de la glycémie au cours d'une journée chez une personne non diabétique

Par contre, chez les sujets diabétiques, la glycémie à jeun est supérieure à $1,26 \text{ g.L}^{-1}$ et la glycémie après ingestion de glucose dépasse à 2 g.L^{-1} .

Toutes ces données suggèrent la mise en œuvre d'un système de régulation assurant la constance de la glycémie, opérationnel chez les personnes non diabétiques et dysfonctionnel chez les sujets atteints de diabète.

2 PROBLÉMATIQUE

Comment est obtenu le glucose sanguin à partir des aliments ? Comment est assurée la régulation de la glycémie dans l'organisme ? De quel(s) dysfonctionnement(s) souffrent les personnes diabétiques ?

2 Des aliments glucidiques au glucose sanguin : intervention des enzymes digestives

2.1 Une diversité de glucides alimentaires

L'alimentation apporte des glucides sous différentes formes :

- des glucides de petite taille, les oses, comme par exemple le glucose et le fructose de formule $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$;
- des diholosides, comme le saccharose et le lactose, constitués de l'assemblage de deux oses ;
- des polyholosides, comme l'amidon et la cellulose, qui sont des macromolécules glucidiques constituées de longues chaînes d'oses.

Les oses sont de petite taille donc non simplifiables. Par contre, tous les autres glucides doivent subir une hydrolyse par les enzymes digestives afin d'être convertis en petites molécules utilisables par les cellules.

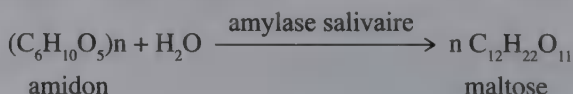
2.2 Un exemple classique de catalyse enzymatique : l'hydrolyse de l'amidon par l'amylase

L'amylase est une enzyme contenue dans le suc salivaire.

Cette enzyme permet l'hydrolyse de l'amidon en maltose, c'est-à-dire qu'elle réalise une réaction de coupure de l'amidon en maltose en présence de molécules d'eau.

La présence de l'enzyme permettant à la réaction chimique de s'accomplir, on appelle cette enzyme un catalyseur biologique.

L'équation de la réaction catalysée par l'amylase salivaire s'écrit :



L'amidon est le substrat de l'amylase, le maltose est le produit de la réaction.

Remarque : d'autres enzymes, dont la maltase, parachèvent la digestion de l'amidon en hydrolysant le maltose en oses, dont le glucose.

2.3 Les propriétés fondamentales des enzymes

Du point de vue de leur nature chimique, les enzymes sont des protéines.

Une enzyme possède une spécificité de substrat : cela signifie que l'enzyme exerce son action sur un substrat déterminé ou sur un nombre limité de substrats. Une enzyme possède une spécificité d'action : l'enzyme catalyse un seul type de réaction chimique.

Une enzyme est un catalyseur très performant : à température ambiante, une molécule d'enzyme peut transformer entre 10 et 10 000 molécules de substrat par seconde.

2.4 Les mécanismes moléculaires de la catalyse enzymatique

2.4.1 Informations apportées par l'étude de la structure tridimensionnelle des polypeptides enzymatiques

Il existe, dans la structure tridimensionnelle de l'enzyme, une région particulière appelée site actif, complémentaire d'une région correspondante de la molécule de substrat. Au niveau du site actif, le substrat s'associe (par des liaisons non covalentes) à l'enzyme pour former un complexe enzyme-substrat, étape indispensable à la catalyse enzymatique.

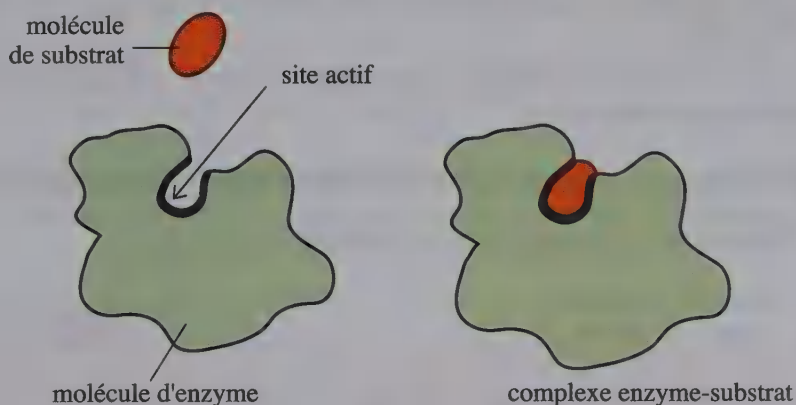


Figure 18.2 – Représentation simplifiée de l'enzyme, du substrat et du complexe enzyme-substrat

La fonction d'une enzyme est donc liée à sa structure chimique : c'est la configuration spatiale du site actif qui explique la spécificité enzymatique. Les propriétés des enzymes dépendent donc de leur structure spatiale. Cette dernière, comme celle de toute protéine, dépend de la séquence d'acides aminés.

2.4.2 Modalités de la catalyse enzymatique

Lors d'une réaction enzymatique, une enzyme catalyse une réaction sans subir elle-même de modifications : au terme de la catalyse, l'enzyme est libérée et à nouveau fonctionnelle.

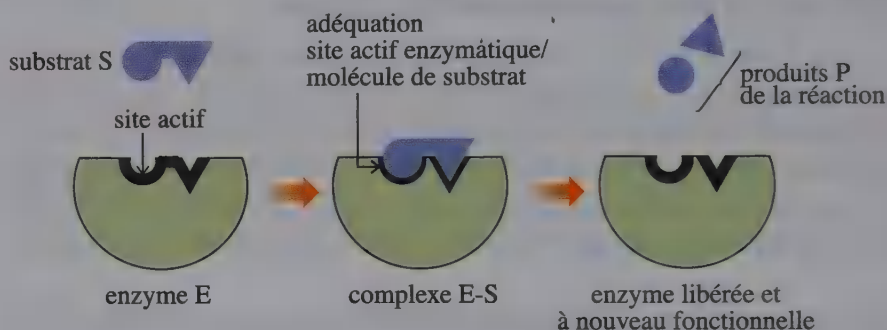


Figure 18.3 – Représentation schématique des modalités de la catalyse enzymatique

Le site actif enzymatique possède deux fonctions :

- il fixe le substrat spécifique grâce à des acides aminés qui reconnaissent le substrat. Ces acides aminés sont appelés acides aminés de liaison, ils appartiennent à un site de reconnaissance.
- il transforme le substrat grâce à des acides aminés qui interagissent avec le substrat. Ces acides aminés sont appelés acides aminés catalytiques, ils appartiennent à un site catalytique.

Le site de reconnaissance explique la spécificité de substrat ; le site catalytique explique la spécificité d'action.

2.5 Des facteurs susceptibles de modifier l'activité enzymatique

2.5.1 Variations de température et activité enzymatique

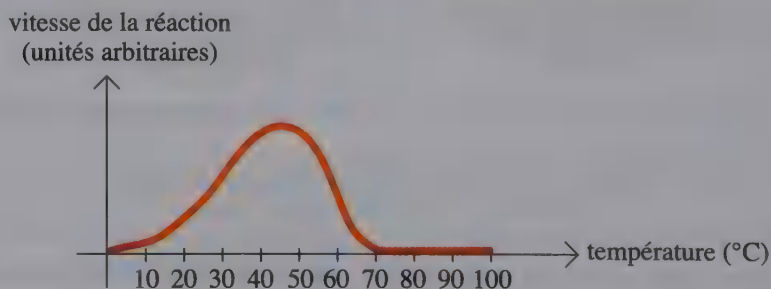


Figure 18.4 – Vitesse d'une réaction enzymatique en fonction de la température

Il existe une température optimale : température pour laquelle la vitesse de réaction est maximale. Cette température est généralement voisine de 40°C. Au-delà ou en

delà de cette valeur, l'activité enzymatique diminue.

En effet, à basse température, l'enzyme est inactivée car l'agitation moléculaire est limitée : les molécules d'enzyme et de substrat se rencontrent difficilement. Cet effet est réversible. Par contre, à haute température, l'enzyme est définitivement altérée car une forte température a pour effet de dénaturer une protéine, c'est-à-dire de lui faire perdre irréversiblement sa conformation spatiale, ce qui entraîne ici la perte du site actif.

2.5.2 Variations de pH et activité enzymatique

Il existe un pH optimal, variable selon l'enzyme considérée. L'enzyme est dénaturée si le pH est « extrême » par rapport au pH optimal : en effet, une variation de pH entraîne une modification des charges portées par les acides aminés constituant l'enzyme, ce qui modifie le repliement spatial de la chaîne d'acides aminés. Cela entraîne la disparition du site actif de l'enzyme et rend donc impossible la formation du complexe enzyme-substrat indispensable à la catalyse.

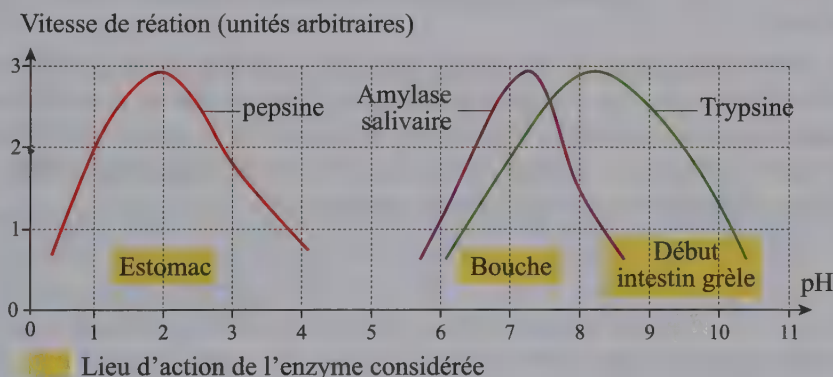


Figure 18.5 – Activité de quelques enzymes digestives en fonction du pH
(l'amylase, la pepsine et la trypsine sont des enzymes contenues respectivement dans la salive, le suc gastrique et le suc pancréatique)

➔ À RETENIR

Les macromolécules glucidiques des aliments sont transformées en glucose au cours de réactions catalysées par les enzymes digestives. Les enzymes sont des polypeptides comportant un site actif dont la configuration tridimensionnelle est indispensable à la catalyse enzymatique. Des modifications de la structure spatiale des enzymes modifient leur activité. Ces modifications sont provoquées soit par des changements dans leur séquence d'acides aminés (influence du génotype), soit par des conditions du milieu (pH, température).

Voir exercices 1, 5, 6 et 7.

3 La régulation de la glycémie : intervention des hormones pancréatiques

3.1 Les organes impliqués dans la gestion du glucose dans l'organisme : des organes effecteurs de la régulation de la glycémie

Le maintien de la glycémie autour d'une valeur stable nécessite l'intervention d'organes capables de libérer du glucose dans le sang lorsque la glycémie a tendance à s'abaisser et d'organes capables de stocker du glucose lorsque la glycémie a tendance à s'élever. Des tels organes sont les effecteurs de la régulation de la glycémie.

3.1.1 Les cellules effectrices de la régulation de la glycémie après un repas

Après un repas (c'est-à-dire à l'état post-prandial), trois populations de cellules effectrices interviennent pour assurer l'homéostat glucidique :

- les cellules adipeuses, qui stockent le glucose sous forme de lipides de type triglycérides.
- les cellules musculaires et les cellules hépatiques, qui stockent le glucose sous forme de glycogène (un polymère de glucoses). Cette réaction de polymérisation s'appelle la glycogénogenèse, elle implique de nombreuses enzymes dont l'enzyme glycogène synthétase. Les cellules hépatiques sont également capables, comme les cellules adipeuses, de convertir le glucose en triglycérides.

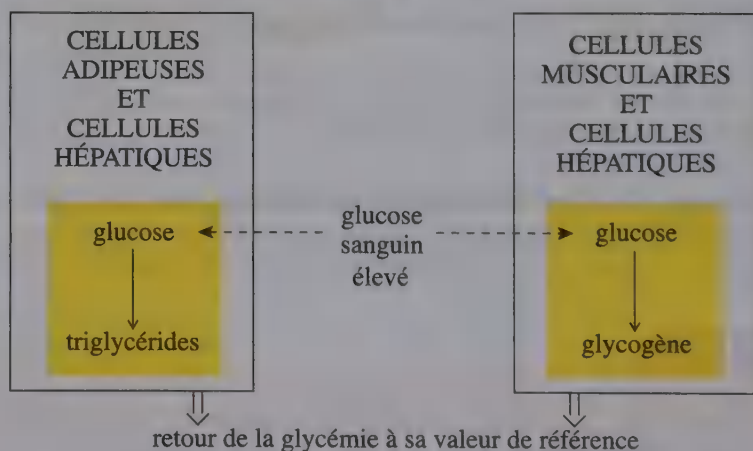


Figure 18.6 – Métabolisme des cellules effectrices en période post-prandiale

Toutes ces opérations soustraient du glucose au milieu intérieur, ce qui permet le retour de la glycémie à sa valeur de référence.

3.1.2 Les cellules effectrices de la régulation de la glycémie lors du jeûne

Lorsque l'organisme est à jeun, les cellules hépatiques sont les seules cellules effectrices intervenant pour assurer l'homéostat glucidique, car le foie est le seul organe

capable de libérer du glucose dans le milieu intérieur. Cette action est rendue possible par le profil métabolique original des cellules hépatiques. Le glucose libéré par le foie provient d'une part de la glycogénolyse (hydrolyse du glycogène en glucose), d'autre part de la néoglucogenèse (production de glucose à partir de composés non glucidiques).

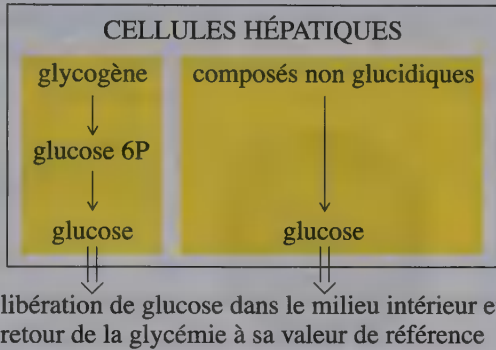


Figure 18.7 – Métabolisme des cellules effectrices hépatiques lorsque l'organisme est à jeun

Les cellules hépatiques possèdent les enzymes suivantes :

- une glycogène phosphorylase, que possèdent également les cellules musculaires, qui assure la conversion du glycogène en glucose-6-phosphate (glucose 6P) ;
- une glucose-phosphatase, enzyme qui leur est propre, qui assure la conversion du glucose 6P en glucose exportable dans le milieu intérieur. Les cellules musculaires ne possédant pas cette enzyme, elles ne peuvent libérer dans le sang le glucose 6P issu de l'hydrolyse du glycogène car la membrane des cellules est imperméable au glucose 6P ;
- des enzymes intervenant dans la néoglucogenèse.

Toutes ces opérations ajoutent du glucose au milieu intérieur, ce qui permet le retour de la glycémie à sa valeur de référence.

➔ À RETENIR

Le foie, les muscles squelettiques et le tissu adipeux sont les effecteurs de la régulation de la glycémie. Le foie joue un rôle majeur comme organe assurant la gestion des réserves glucidiques car il peut jouer le rôle d'organe stockeur de glucose et d'organe producteur de glucose.

3.2 Les hormones pancréatiques et la commande des organes effecteurs de la régulation de la glycémie

3.2.1 Intervention de capteurs de variations de la glycémie

L'ajustement permanent de la glycémie réalisé par les cellules effectrices implique la présence de capteurs sensibles aux variations de la glycémie. Ces capteurs sont situés au niveau du pancréas. Il s'agit des cellules alpha et bêta localisées dans les îlots de Langerhans du pancréas.

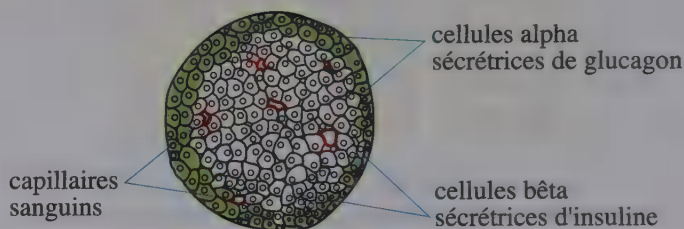


Figure 18.8 – Organisation d'un îlot de Langerhans pancréatique

En fonction des variations de la glycémie, ces capteurs émettent des messagers chimiques, le glucagon et l'insuline. Une diminution de la glycémie a pour effet d'augmenter la sécrétion de glucagon par les cellules alpha et de diminuer la sécrétion d'insuline par les cellules bêta. Inversement, une augmentation de la glycémie a pour effet d'augmenter la sécrétion d'insuline par les cellules bêta et de diminuer la sécrétion de glucagon par les cellules alpha.

3.2.2 La communication entre capteurs et effecteurs

L'insuline et le glucagon sont des hormones. Une hormone est une molécule sécrétée par une cellule (qualifiée de cellule endocrine), libérée dans le milieu intérieur et véhiculée par celui-ci jusqu'à des cellules-cibles dont elle modifie l'activité.

Ces hormones pancréatiques étant rapidement dégradées dans l'organisme, leur concentration plasmatique dépend de la quantité d'hormones sécrétée par les cellules endocrines. Le message hormonal est ainsi codé par la concentration plasmatique de l'hormone : plus le stimulus (variation de la glycémie) est intense, plus la concentration plasmatique de l'hormone est importante.

Bien que distribuées à l'ensemble des cellules de l'organisme par l'intermédiaire de la circulation sanguine, les hormones n'agissent que sur des cellules-cibles, c'est-à-dire des cellules qui expriment les récepteurs de l'hormone. C'est la fixation de l'hormone à son récepteur protéique qui déclenche le changement d'activité de la cellule-cible.

Les cellules-cibles des hormones pancréatiques sont essentiellement les cellules effectrices de la régulation de la glycémie.

3.2.3 La communication entre capteurs et effecteurs*a) Action de l'insuline*

Sous l'action de l'insuline, le glucose est stocké sous forme de glycogène (glycogénogenèse) dans les cellules hépatiques et les cellules musculaires squelettiques. Cette action s'exerce par le biais d'une activation de l'enzyme glycogène synthétase et d'une inhibition de l'enzyme glycogène phosphorylase ainsi que des enzymes impliquées dans la néoglucogenèse. L'insuline favorise également la conversion du glucose en triglycérides dans les cellules hépatiques et dans les cellules adipeuses. Les triglycérides synthétisés dans le foie sont aussitôt exportés vers le tissu adipeux. Enfin, l'insuline favorise la pénétration et l'utilisation du glucose dans toutes les cellules (à l'exception des cellules nerveuses).

b) Action du glucagon

Le glucagon agit essentiellement sur les cellules hépatiques : il favorise la glycogénolyse ce qui permet la libération de glucose dans la circulation sanguine.

➔ À RETENIR

Les deux hormones pancréatiques ont des effets antagonistes : l'insuline est une hormone hypoglycémiante, le glucagon est une hormone hyperglycémiante.

3.3 Régulation de la glycémie et caractéristiques d'un système de régulation

Les deux schémas fonctionnels proposés ci-après situent les événements qui ont été décrits dans les paragraphes précédents. On peut les utiliser pour dégager les caractéristiques générales d'un système de régulation.

Voir figure page suivante.

valeur réglée : glycémie

valeur de consigne : glycémie voisine de 1g/L

perturbation : élévation de la glycémie

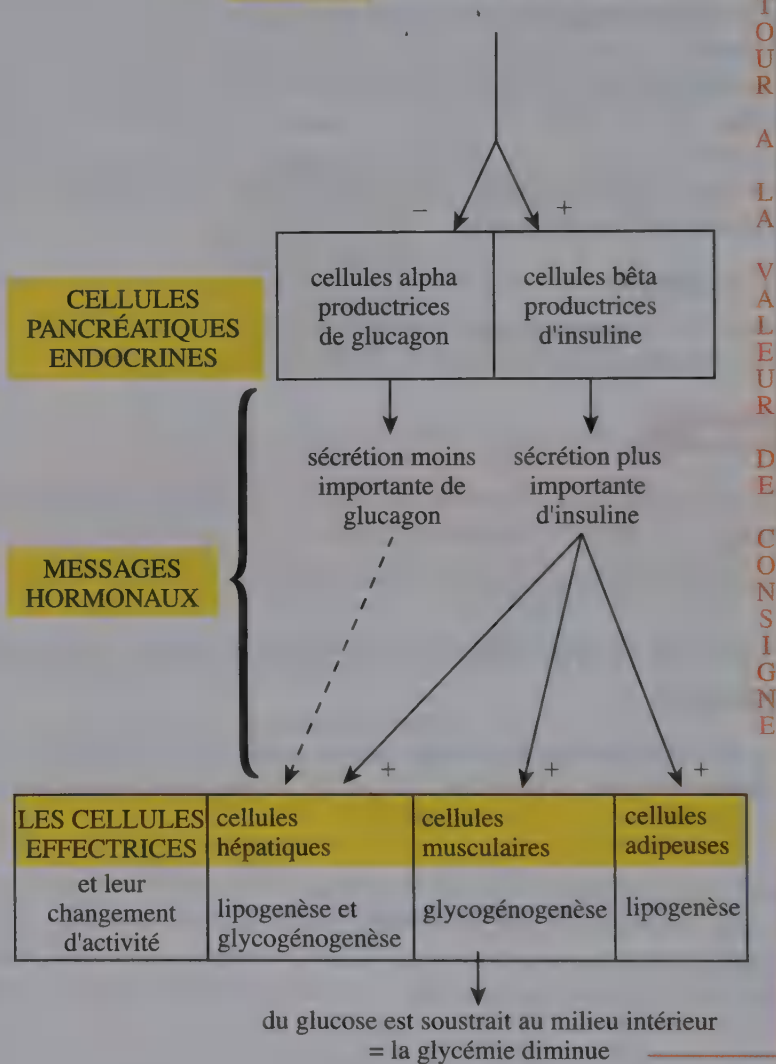


Figure 18.9 – Régulation post-prandiale de la glycémie

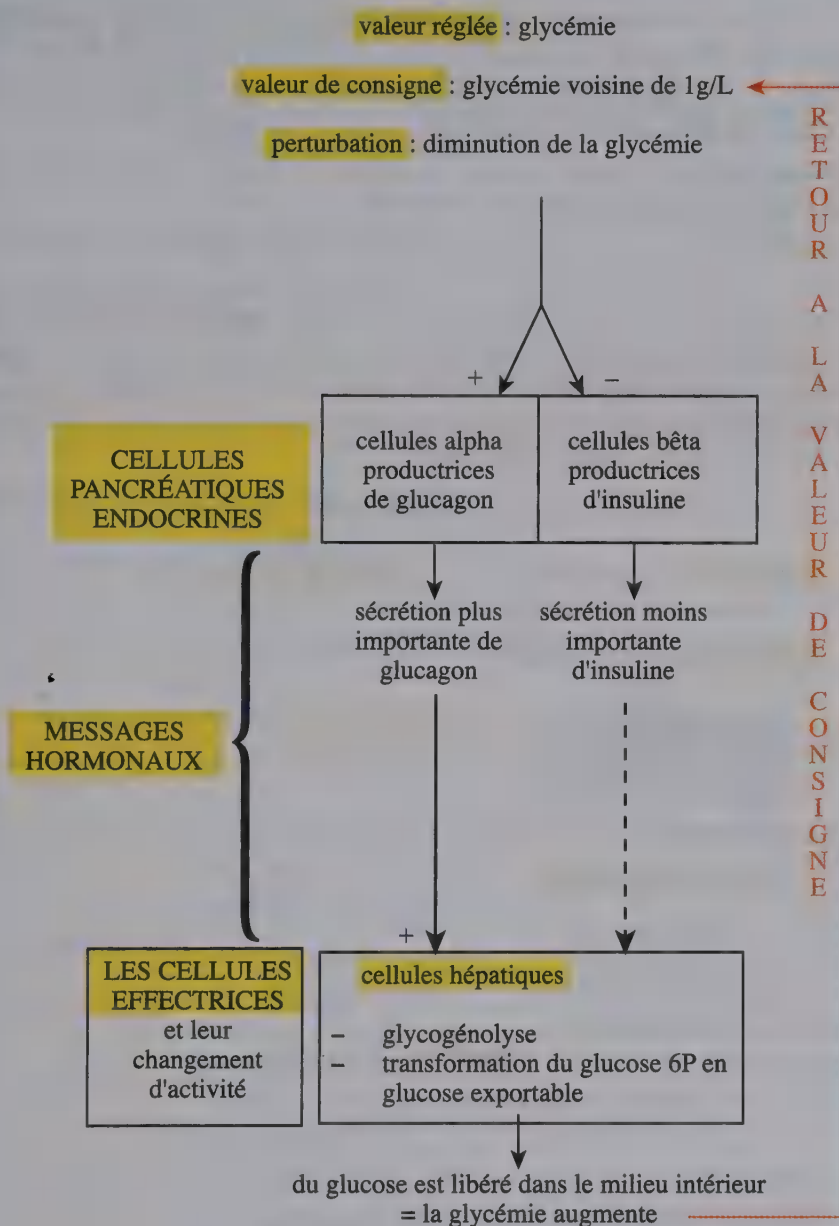


Figure 18.10 – Régulation de la glycémie lors du jeûne

La régulation d'un paramètre physiologique repose sur la détection d'une perturbation, la mise en jeu d'une réponse et la correction de la perturbation. La séquence de ces événements constitue une boucle de régulation.

Le paramètre physiologique correspond à une valeur à régler, il fait partie d'un système appelé système réglé.

Le système réglant a pour action de réagir à la variation détectée. Il comporte des capteurs, des effecteurs et un système de transmission entre capteurs et effecteurs.

Dans le cas de la régulation de la glycémie, la valeur à régler (paramètre réglé) est la glycémie. Une glycémie égale à 1g.L^{-1} est la grandeur de consigne.

Le système réglé est le milieu intérieur (ensemble des liquides circulants de l'organisme : plasma sanguin, lymphe).

Le système réglant est constitué par les cellules pancréatiques, les hormones pancréatiques et leurs cellules-cibles. Sur le plan fonctionnel, le système réglant de l'homéostat glycémique comporte des capteurs (cellules alpha et bêta pancréatiques) enregistrant les écarts de la glycémie, des effecteurs (cellules musculaires, hépatiques et adipeuses) assurant la gestion des réserves glucidiques de l'organisme, et des messages hormonaux assurant la communication entre capteurs et effecteurs. Le système de transmission est l'appareil circulatoire.

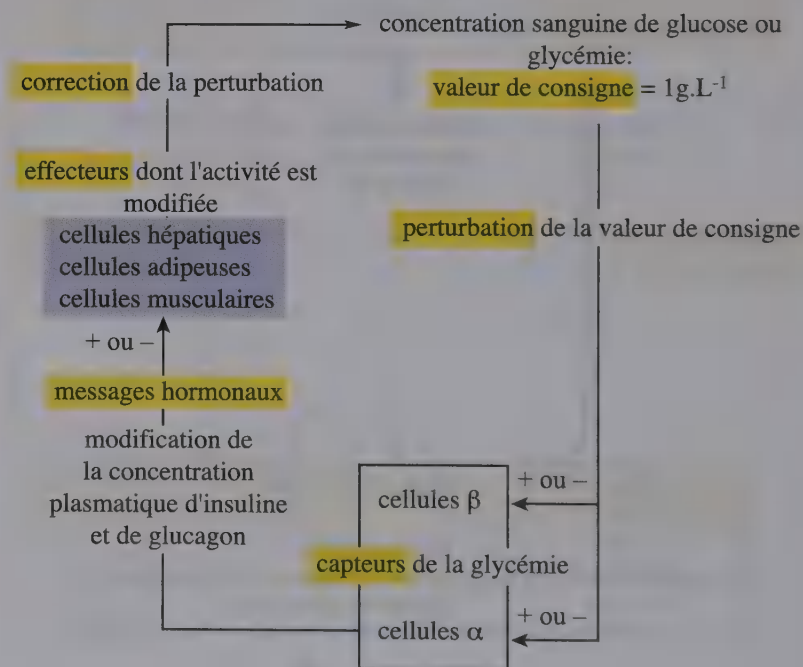


Figure 18.11 – Boucle de régulation de la glycémie

➔ À RETENIR

La régulation de la glycémie représente un modèle de boucle de régulation. Au moyen de capteurs et d'effecteurs, la perturbation est détectée et une réponse est enclenchée, ce qui corrige la perturbation.

Voir les exercices 2, 3 et 8 à 12.

Les phénotypes diabétiques

Les individus présentant un phénotype diabétique sont caractérisés par une hyperglycémie chronique. Cette hyperglycémie permanente traduit un fonctionnement incorrect du système de régulation de la glycémie.

En réalité, il n'y a pas un unique phénotype diabétique mais des phénotypes diabétiques, dont les causes sont différentes.

? PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les caractéristiques des phénotypes diabétiques ? Comment sont déclenchés les diabètes ?

4.1 Des types différents de diabète

4.1.1 Présentation des deux grands types de diabète

Sur le plan clinique, on distingue deux grands types de diabète : le diabète de type 1 et le diabète de type 2. Le tableau ci-après présente les caractéristiques de ces deux phénotypes diabétiques.

	Diabète de type 1	Diabète de type 2
Phénotype biochimique	Glycémie à jeun supérieure à 1.26 g.L^{-1} Glycémie supérieure à 2 g.L^{-1} après ingestion de glucose	
Phénotype clinique	• Soif, polyurie, polyphagie • Amaigrissement et fatigue • Lésions artérielles, veineuses, rénales	• Souvent associé à une obésité • Plus tardivement, apparition de troubles voisins de ceux du diabète de type 1
Traitement	Traitement possible par des injections d'insuline : le diabète de type 1 est un diabète insulino-dépendant (DID)	Pas de traitement par injection d'insuline : le diabète de type 2 est un diabète non insulino-dépendant (DNID)
Fréquence	5 à 10 % des cas de diabète	90 à 95 % des cas de diabète
Déclaration du phénotype	Brutale et précoce (avant 35 ans)	Progressive et tardive (après 40 ans)

Tableau 18.1 – Caractéristiques comparées des diabètes de type 1 et 2

4.1.2 Les phénotypes cellulaires à l'origine des deux types de diabète

a) Cas du diabète de type 1

Au niveau cellulaire, le diabète de type 1 est caractérisé par une absence totale de cellules bêta, causée par leur destruction post-natale par les lymphocytes T. On parle

de maladie auto-immune, dans la mesure où le système immunitaire réagit contre ses propres constituants. La destruction des cellules bêta entraîne l'absence ou l'insuffisance d'insuline. On note également une augmentation du nombre de cellules alpha, associée à une recomposition du pancréas.

b) Cas du diabète de type 2

Le diabète de type 2 est dû à une insulino-résistance des cellules-cibles de l'insuline. Cela signifie que les cellules-cibles ne répondent pas à l'action de l'insuline, bien que l'insuline soit de structure normale et convenablement sécrétée. Au stade sévère, le diabète de type 2 est également caractérisé par un déficit de la sécrétion d'insuline par les cellules bêta.

À RETENIR

Les diabètes de type 1 et 2 ont des caractéristiques différentes. Alors que le diabète de type 1 est associé à un déficit de la production pancréatique d'insuline, le diabète de type 2 est caractérisé par une perturbation de l'action de l'insuline.

4.2 Les facteurs responsables des phénotypes diabétiques

4.2.1 Données épidémiologiques

Le traitement de données statistiques relatives à la fréquence des diabètes permet d'identifier les facteurs responsables des diabètes et d'évaluer leur importance. Ainsi, le risque de diabète chez les vrais jumeaux a été établi : lorsque l'un des deux est atteint de diabète de type 1, l'autre a 40 à 50 % de risque d'être atteint. Ce risque est nettement supérieur à la fréquence du diabète de type 1 dans la population générale (0,2 %), ce qui démontre que le génotype est en cause dans le déterminisme du diabète de type 1. Toutefois, le risque n'est pas égal à 100% : on démontre ainsi que le génotype n'est pas seul en cause, ce qui suggère que des facteurs environnementaux interviennent. Lorsque l'un des deux vrais jumeaux est atteint de diabète de type 2, l'autre a 90 % de risque d'être atteint. Ce risque est nettement supérieur à la fréquence du diabète de type 2 dans la population générale (entre 1 et 65 % selon les populations). Là encore, le diabète est déterminé non seulement par le génotype mais aussi par des facteurs environnementaux.

4.2.2 Implication des facteurs génétiques dans les diabètes

a) De rares cas de diabètes monogéniques

Les diabètes dont le déterminisme génétique dépend d'un seul gène sont très rares, ils se rencontrent uniquement dans certains cas du diabète de type 2. Quelques gènes en cause ont été identifiés : il s'agit par exemple des gènes codant pour les enzymes impliquées dans le métabolisme du glucose. La mutation de l'un ou l'autre de ces gènes peut être à l'origine du diabète de type 2.

b) Un déterminisme polygénique pour la plupart des diabètes

Dans tous les cas de diabète de type 1 et dans 95% des cas de diabète de type 2, les diabètes sont polygéniques. Plusieurs gènes mutés interagissent et déterminent la maladie, alors que la mutation d'un seul d'entre eux ne suffit pas à déclencher le diabète.

1. Le déterminisme polygénique du diabète de type 1

Le gène DR fait partie des gènes du complexe majeur d'histocompatibilité codant pour des protéines membranaires qui interviennent dans le déroulement des réactions immunitaires. On connaît 47 allèles de ce gène, que l'on note DR1, DR2... jusqu'à DR47. Les études statistiques présentées dans le tableau ci-après montrent que la présence des allèles DR3, ou DR4, ou bien l'association de ces deux allèles, est plus fréquente chez les individus atteints de diabète de type 1 que chez des individus sains.

	Population d'individus atteints de diabète de type 1	Population saine
Pourcentage d'individus possédant DR3 ou DR4	90%	40 à 50 %
Pourcentage d'individus possédant DR3 et DR4	30 à 50 %	6 %

Tableau 18.2 – Pourcentage d'individus sains ou atteints de diabète de type 1 possédant les allèles DR3 et/ou DR4

De tels gènes dont certaines formes alléliques accroissent le risque d'apparition et de développement d'un diabète sont appelés des gènes de susceptibilité. Le gène DR est un gène de susceptibilité parmi d'autres.

2. Le déterminisme polygénique du diabète de type 2

Pour expliquer le diabète de type 2, on suspecte des gènes dont le produit d'expression est impliqué dans la régulation de sécrétion de l'insuline, ou bien dans les effets cellulaires de l'insuline, ou bien dans la croissance et la différenciation des cellules bêta du pancréas. Des mutations de ces gènes ont été identifiées, sans qu'elles expliquent à elles seules la maladie.

4.2.3 Implication de facteurs environnementaux dans les diabètes

a) Intervention des facteurs environnementaux dans le déterminisme du diabète de type 1

Des études épidémiologiques suggèrent l'intervention de l'inflammation, d'infections virales ainsi que certains constituants de l'alimentation infantile. Ces facteurs environnementaux, qui déclencheraient le processus de destruction auto-immune des cellules bêta, restent mal définis.

b) Intervention des facteurs environnementaux dans le déterminisme du diabète de type 2

L'influence de l'obésité a été mise en évidence chez certaines populations comme celle des indiens Pimas aux Etats-Unis. Dans cette population, 50% des individus sont diabétiques alors que la fréquence du diabète y était peu élevée au début du siècle. On a pu mettre en parallèle cette augmentation de la fréquence du diabète avec un changement de mode de vie des indiens Pimas (adoption d'un mode de vie sédentaire et changement des habitudes alimentaires) auquel on attribue leur obésité.

D'une façon générale, dans la majorité des cas, le diabète de type 2 se développe à la suite d'une obésité.

➔ À RETENIR

Les diabètes qu'ils soient de type 1 ou 2 ont une origine multifactorielle :

- on peut avoir une prédisposition génétique à un phénotype diabétique : des facteurs génétiques sont en cause mais ne peuvent à eux seuls expliquer l'apparition du diabète.
- des facteurs de l'environnement interagissent avec les gènes en cause.

Qu'ils soient génétiques ou environnementaux, les facteurs des deux types de diabète sont différents.

La connaissance de certains de ces facteurs, en particulier ceux liés au mode de vie, peut servir à la prévention des diabètes.

Voir les exercices 4 et 12 à 16.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

→ corrigé
p. 452

Choisissez la seule réponse exacte pour chaque série de propositions :

- 1** Une enzyme :
 - a** est un catalyseur chimique
 - b** est une molécule qui disparaît au terme de la réaction chimique qu'elle catalyse
 - c** a une structure spatiale indispensable à sa fonction
- 2** Le site actif enzymatique :
 - a** est la région du substrat complémentaire de l'enzyme
 - b** est la région de l'enzyme complémentaire d'une région correspondante du substrat
 - c** est le même pour toutes les enzymes
- 3** Le substrat de l'enzyme :
 - a** n'est pas modifié au cours de la réaction enzymatique
 - b** est le composé chimique que l'enzyme transforme
 - c** est obligatoirement une protéine

2 QCM Vérification des connaissances

10 min

→ corrigé
p. 452

Choisissez la seule réponse exacte :

- 1** La glycémie :
 - a** est un paramètre sanguin qui a tendance à diminuer après une repas et à augmenter lorsque l'organisme est à jeun
 - b** est un paramètre sanguin dont l'homéostat est assuré par des organes effecteurs
 - c** est régulée grâce à des organes endocrines comme le foie et les muscles
- 2** L'insuline:
 - a** est une hormone sécrétée par les cellules alpha des ilots de Langerhans du pancréas endocrine
 - b** est sécrétée en quantité d'autant plus importante que la glycémie est basse
 - c** a pour cible les cellules hépatiques, musculaires et adipeuses
- 3** Le glucagon :
 - a** est une hormone fabriquée par les cellules alpha des ilots de Langerhans du pancréas endocrine
 - b** est sécrété en quantité d'autant moins importante que la glycémie est basse
 - c** a pour cible les cellules hépatiques, musculaires et adipeuses

3**V/F****Vérification des connaissances** **5 min** **corrigé**
p. 452

Repérez les affirmations inexactes et corrigez-les.

1 Lorsque l'organisme est à jeun :

- ☐ **a** les effecteurs que sont les cellules musculaires, hépatiques et adipeuses se chargent de libérer du glucose dans le sang
- ☐ **b** des réactions catalysées par des enzymes hépatiques assurent l'ajout de glucose au milieu intérieur
- ☐ **c** du glucagon est fabriqué en plus grande quantité par les cellules pancréatiques

2 Dans le système de régulation de la glycémie :

- ☐ **a** le paramètre réglé est l'insulinémie
- ☐ **b** les capteurs sont les cellules hépatiques, adipeuses et musculaires
- ☐ **c** le système de communication entre les capteurs et les effecteurs est l'appareil circulatoire

4**V/F****Vérification des connaissances** **5 min** **corrigé**
p. 453

Répondez par vrai ou faux et justifiez votre choix :

1 Chez un sujet atteint du diabète de type 2, on observe une destruction des îlots de Langerhans :

- ☐ **a** vrai
- ☐ **b** faux

2 Le diabète de type 1 peut être corrigé par des injections d'insuline :

- ☐ **a** vrai
- ☐ **b** faux

3 Des gènes de susceptibilité sont impliqués dans le déterminisme du diabète insulino-dépendant :

- ☐ **a** vrai
- ☐ **b** faux

5**Amylase – vitesse**

★★★

25 min **corrigé**
p. 453**Lycée des Pontonniers, Strasbourg**

On travaille avec neuf mélanges d'empois d'amidon et d'amylase salivaire placés à des températures différentes.

L'expérience dure 24 minutes, et on teste toutes les trois minutes avec un réactif approprié.

On obtient les résultats consignés dans le tableau ci-après.

Temps (min)	Température								
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
0	B	B	B	B	B	B	B	B	B
3	B	B	B	B	V	V	B	B	B
6	B	B	B	V	R	R	V	B	B
9	B	B	B	V	J	J	R	B	B
12	B	B	V	R	J	J	J	B	B
15	B	B	V	J	J	J	J	B	B
18	B	V	R	J	J	J	J	B	B
21	B	R	J	J	J	J	J	B	B
24	B	R	J	J	J	J	J	B	B

Légende : B=Bleu V=Violet R=Rouge-Brun J=Jaune

1. Quel est le réactif utilisé lors de cette expérience ?
2. Quelle est la signification des couleurs obtenues ?
3. Ecrivez l'équation générale d'une réaction enzymatique.
4. Ecrivez l'équation spécifique relative à cette réaction.
5. Quels critères permettent d'apprécier la vitesse d'une réaction enzymatique ?
6. Proposez une représentation graphique de la rapidité de la réaction.
7. Commentez votre tracé et expliquez-le à l'aide de vos connaissances.

6 Enzymes – Propriétés



30 min

→ corrigé
p. 455

Lycée Pablo Picasso, Fontenay-sous-Bois

L'équipement enzymatique d'une espèce lui confère la capacité d'utiliser ou non les substances présentes dans son environnement. Malgré leur diversité, les enzymes partagent des propriétés communes.

Démontrez que l'évolution de l'équipement enzymatique du porc après la naissance lui permet de devenir omnivore, puis retrouvez les propriétés fondamentales des enzymes du monde vivant.

La réponse s'appuiera sur l'exploitation du dossier documentaire et sur l'utilisation des connaissances.

Document 1 : Un protocole utilisant l'amylase

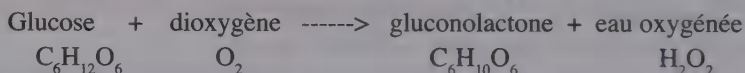
On travaille avec neuf mélanges d'empois d'amidon et d'amylase pancréatique humaine, placés à des températures différentes. L'expérience dure 24 minutes, et on teste toutes les trois minutes avec un réactif, l'eau iodée. On obtient les résultats consignés dans le tableau ci-après :

Temps (min)	Température								
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
0	B	B	B	B	B	B	B	B	B
3	B	B	B	B	B	B	B	B	B
6	B	B	B	B	J	J	B	B	B
9	B	B	B	B	J	J	B	B	B
12	B	B	B	B	J	J	B	B	B
15	B	B	J	J	J	J	J	B	B
18	B	B	J	J	J	J	J	B	B
21	B	B	J	J	J	J	J	B	B
24	B	J	J	J	J	J	J	B	B

Légende : B=bleu J=jaune

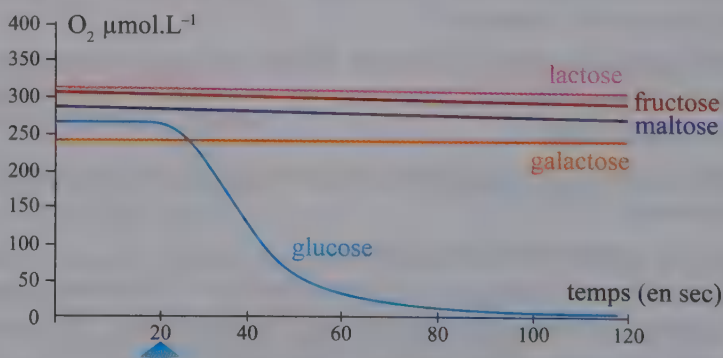
Document 2 : L'enzyme glucose-oxydase

La glucose-oxydase est une enzyme connue pour catalyser la réaction suivante :



Cette enzyme est le plus souvent extraite d'un champignon : *Aspergillus niger*.

L'action de la glucose-oxydase sur son substrat se traduit par une très rapide consommation de dioxygène, facilement mesurable. Afin de tester l'efficacité de la glucose oxydase sur différents substrats, on place dans un bioréacteur, à tour de rôle, les solutions des 5 glucides suivants : glucose, lactose, fructose, maltose, galactose. Une sonde à dioxygène est plongée dans la solution et mesure la concentration en dioxygène au cours du temps. Pour chacune des 5 mesures, la glucose-oxydase est injectée au bout de 20 secondes dans la solution de glucide. Les résultats sont donnés dans le graphique ci-après.



à t = 20 secondes : injection de glucose-oxydase

Figure 18.12 – Evolution de la concentration en dioxygène dans différentes solutions de glucides avant et après injection de l'enzyme glucose-oxydase

Document 3 : Les enzymes digestives du porc

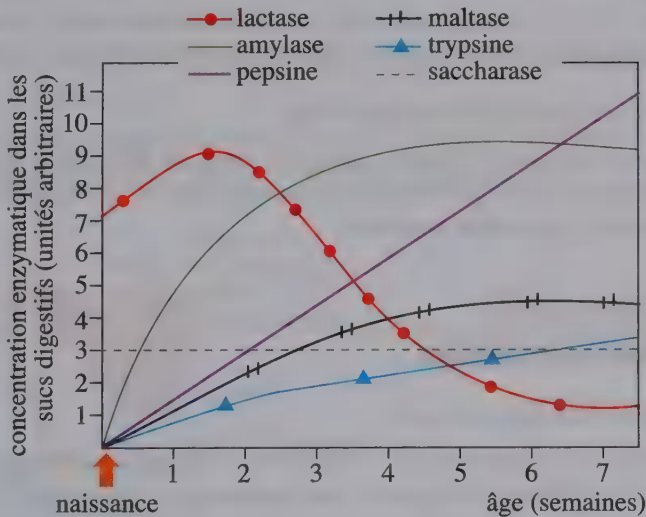
Documents 3a: équipement enzymatique du porc adulte

Les résultats de l'analyse de l'équipement enzymatique contenu dans les différents sucs digestifs du porc adulte sont donnés dans le tableau suivant :

Enzyme	Substrat	Produits de la catalyse
lactase	lactose	glucose et galactose
amylase	amidon	maltose
maltase	maltose	glucose
saccharase	saccharose	glucose et fructose
pepsine	protéines	peptides (courtes séquences d'acides aminés)
trypsine	protéines et peptides	peptides et acides aminés

Documents 3b: équipement enzymatique du porcelet

On étudie l'évolution de ces enzymes dans les sucs digestifs d'un porcelet durant les sept premières semaines de sa vie. Les résultats de cette étude sont fournis dans le graphique ci-après :



NB : en élevage, les porcelets sont nourris avec une alimentation de type adulte à partir de la 7^{ème} semaine.

7 Hormone – cellule-cible



10 min



corrigé
p. 457

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 ci-après montre les résultats de cette recherche.

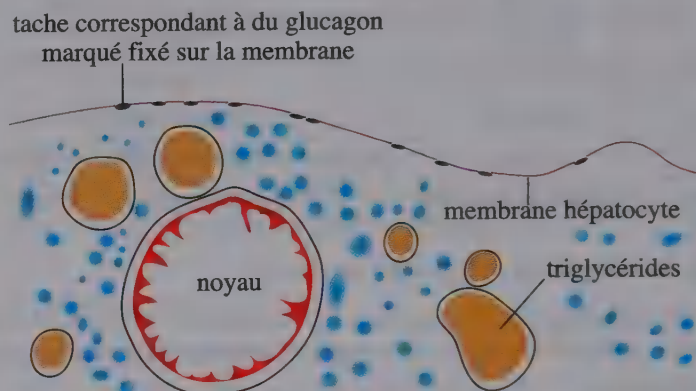


Figure 18.13 – Schéma d'une partie d'une cellule hépatique après perfusion de cette dernière par une solution contenant du glucagon marqué (X 7000)

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.

8 Pancréas – greffe



15 min



corrigé
p. 458

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 expérimental : 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.
- 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 et 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).

9 Foie – insuline – effecteur



10 min

→ corrigé
p. 458

Lycée Saint Louis, Lorient

On étudie la production hépatique de glucose chez huit chiens soumis à une perfusion d'insuline ($0,14 \text{ U} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$). Ces animaux ont préalablement subi une intervention chirurgicale au cours de laquelle la veine porte hépatique est directement reliée à la veine cave inférieure (dessin ci-après) : le sang n'arrive plus que par l'artère hépatique et repart par les veines sus-hépatiques.

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.

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.

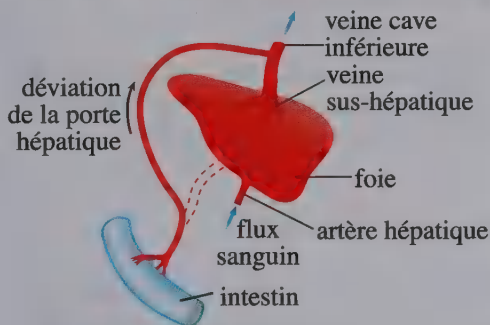


Figure 18.14 – Modification chirurgicale de la circulation hépatique

Voir figure à la page suivante.

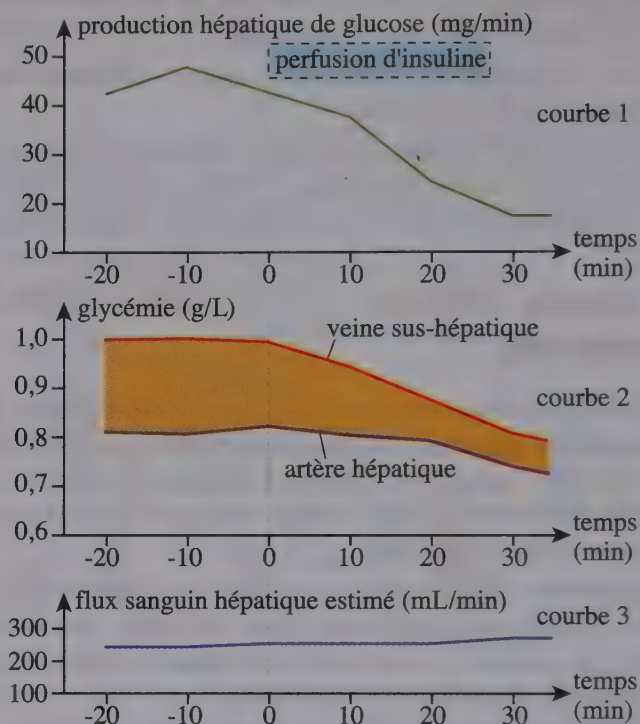


Figure 18.15 – Production hépatique de glucose, glycémie et flux sanguin hépatique

10 Insuline – organes-cibles



25 min

corrigé
p. 459

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.

glycémie (mg·dL⁻¹)

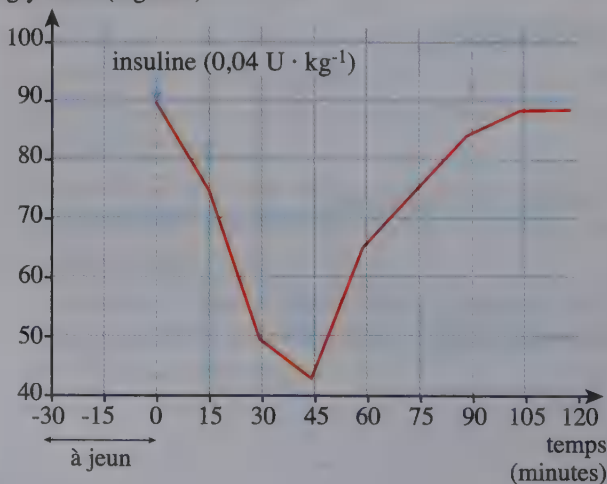


Figure 18.16 – Variation de la glycémie à la suite d'une injection intraveineuse d'insuline

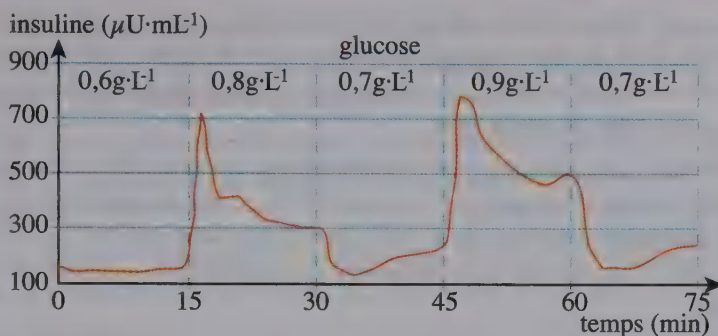


Figure 18.24 – Libération d'insuline par un pancréas isolé en fonction de la concentration en glucose

- 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.

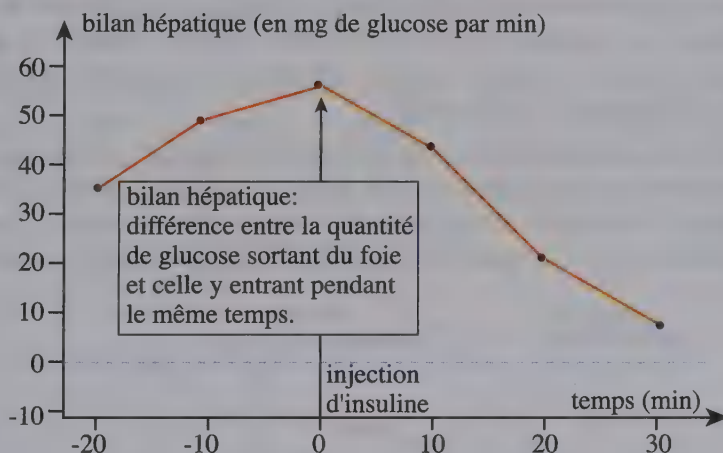


Figure 18.18 – Bilan hépatique chez le chien

- 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.

Glucose prélevé dans le milieu (mg de glucose/g de muscle/10min)		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 18.3 – 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.

11 Homéostat – glycémie



25 min

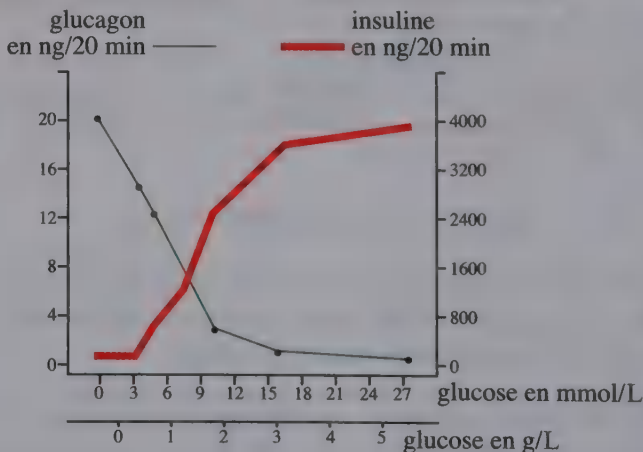
corrigé
p. 460

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

Le maintien de la constance du milieu intérieur (ensemble des liquides de l'organisme : sang, lymphe) assure aux cellules des conditions de vie optimales.

Après une analyse rigoureuse des documents proposés, expliquez comment un sujet en bonne santé possède une glycémie constante, quelles que soient les circonstances, et regroupez sur un grand schéma fonctionnel les principales informations et conclusions tirées de ces différents documents. Soulignez enfin les caractéristiques de la communication entre les cellules par voie humorale (qui se rapporte aux différents liquides extracellulaires de l'organisme).

- Document 1 : Le pancréas d'un rat est isolé et perfusé avec une solution de glucose de plus en plus concentrée ; pour chacune des concentrations de glucose l'essai dure 20 minutes. Les quantités d'insuline et de glucagon, dans les liquides sortant du pancréas, sont dosées. Les résultats sont reportés dans le graphique ci-après.



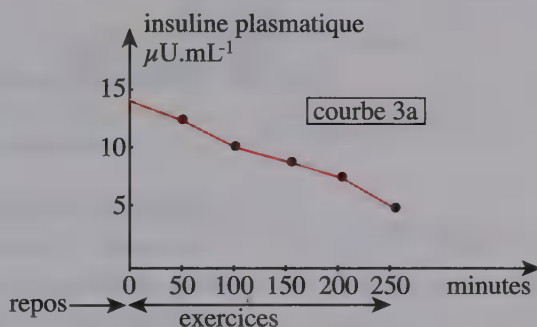
- Document 2 :

- Une injection d'insuline entraîne chez un chien normal, à jeun, une chute rapide de la quantité de glucose qui sort du foie. Après une injection de 1800 mg d'insu-

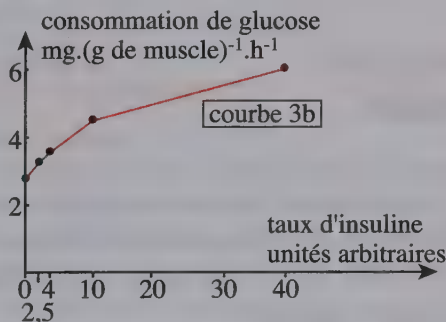
- line, cette quantité de glucose passe de $42 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$ à une valeur proche de 0 en moins d'une heure. Chez un chien témoin, la quantité de glucose se maintient à $42 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$, pendant la même période.
- b. Une injection de glucagon détermine, chez un animal normal, une hyperglycémie. Celle-ci n'a pas lieu chez un animal auquel on a enlevé le foie.

• Document 3 :

- a. Chez un homme, à intervalle de temps régulier, la quantité d'insuline libérée dans le sang est dosée pendant un exercice modéré, exécuté après une période de repos et sans absorption de glucose. Les résultats sont présentés par la courbe 3a ci-après.



- b. Des fibres musculaires (cellules musculaires) sont mises en culture dans des milieux de même concentration en glucose. On ajoute des quantités différentes d'insuline. La consommation de glucose par ces cellules est mesurée pendant le même temps. Les résultats sont présentés par la courbe 3b ci-après.



• Document 4 :

Des cellules nerveuses, en absence ou en présence d'insuline, ne modifient pas leur consommation de glucose.

12 Diabète – type 1 – type 2



10 min

 corrigé
p. 462

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 ci-après.

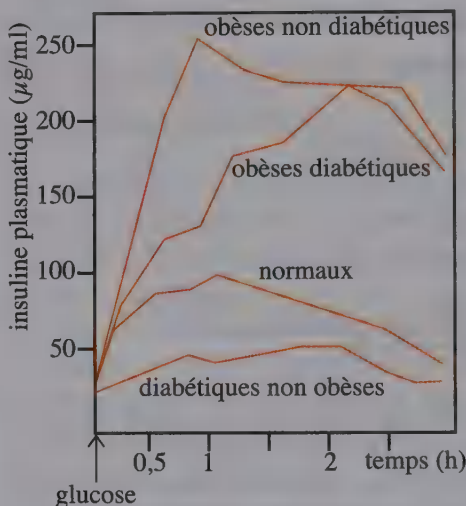


Figure 18.19 – Concentrations plasmatiques d'insuline chez différents sujets

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.

13 Pimas – diabète type 2



15 min

 corrigé
p. 463

Lycée Jacques Monod, Clamart

Une des nombreuses études épidémiologiques menées chez les indiens Pimas a consisté à mesurer l'incidence du diabète de type 2 dans cette communauté (c'est-à-dire le nombre de cas nouveaux constatés chaque année pour une population de 1000 personnes). Dans la figure ci-après, les cas ont été classés suivant deux critères :

- L'indice de masse corporelle des sujets.

Le paramètre le plus utilisé pour apprécier le degré d'obésité d'un individu est l'indice de masse corporelle ou IMC ($IMC = m/t^2$ avec m = masse de l'individu et t = taille de l'individu). Une personne est dite obèse lorsque son IMC est supérieur à 27 en moyenne (25 pour une femme et 29 pour un homme).

- Le « statut diabétique » des parents (nombre de parents eux-mêmes diabétiques).

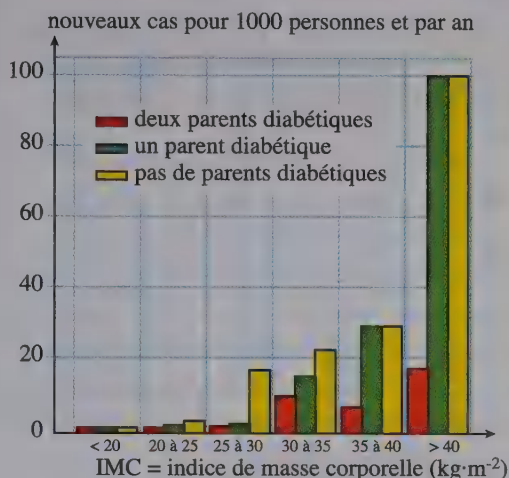


Figure 18.20 – Résultats d'une étude épidémiologique concernant le diabète de type 2 chez les indiens Pimas

À l'aide des résultats de cette étude :

1. Indiquez quelle est l'influence de l'hérédité chez les sujets maigres.
2. Indiquez quelle est l'influence de l'hérédité chez les autres sujets.
3. Précisez quelle est l'influence de la masse corporelle chez les sujets sans prédisposition génétique.
4. Précisez quelle est l'influence de la masse corporelle chez les sujets avec prédisposition génétique.
5. Proposez une conclusion d'ensemble sur les facteurs favorisant le diabète de type 2 chez les indiens Pimas.

14 Susceptibilité – diabète type 1

★★

15 min

corrigé
p. 464

Lycée Toulouse-Lautrec, Toulouse

On se propose d'étudier quelques aspects génétiques du diabète de type 1. Des observations ont conduit à étudier des gènes portés par le chromosome 6 et qui codent des protéines exprimées à la surface des cellules de l'immunité. Parmi ces gènes, on considère celui qui code une chaîne polypeptidique d'une protéine appelée HLA-DQ. Le tableau ci-après présente les résultats de quatre études effectuées sur quatre populations différentes de patients diabétiques, en relation avec la nature de l'acide aminé en position 57 (aspartate ou autre acide aminé). Cette différence résulte de l'existence d'allèles différents du gène, respectivement notés asp^+ et asp^- et pouvant chacun être présent à l'état homozygote (asp^-/asp^- ; asp^+/asp^+) ou hétérozygote (asp^+/asp^-).

		Type de population			
		Caucasiens	Caucasiens	Caucasiens	Japonais
Patients diabétiques	Nombre d'individus	50	74	107	72
	Total (en %) des chromosomes portant asp ⁻	94	93,5	88	27,1
	asp ⁻ /asp ⁻ %	88	88	77	2,8
	asp ⁺ /asp ⁻ %	12	11	22	48,6
	asp ⁺ /asp ⁺ %	0	1	1	1
Patients non diabétiques	Nombre d'individus	73	78	148	125,1
	Total (en %) des chromosomes portant asp ⁻	50,5	54,5	49	25,2
	asp ⁻ /asp ⁻ %	23	36	29	8,2
	asp ⁺ /asp ⁻ %	55	37	40	34
	asp ⁺ /asp ⁺ %	22	27	31	57,8

1. Tirez du tableau des informations montrant que le gène codant pour la protéine HLA-DQ est un gène de susceptibilité impliqué dans le diabète de type 1.
2. Démontrez que la seule intervention du gène étudié ne peut expliquer l'ensemble des résultats observés.

15 Diabète – type 2



20 min

corrigé
p. 464

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.

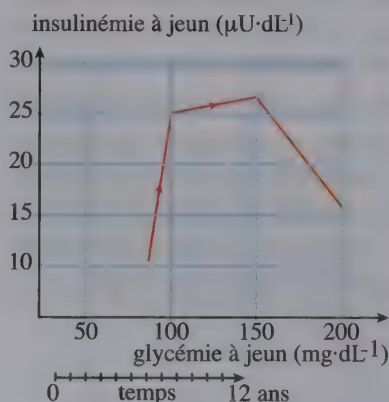


Figure 18.21 – Insulïnémie
et glycémie à jeun

insulinémie à jeun ($\mu\text{U}\cdot\text{dL}^{-1}$) 2 heures après le début d'un test d'hyperglycémie provoquée

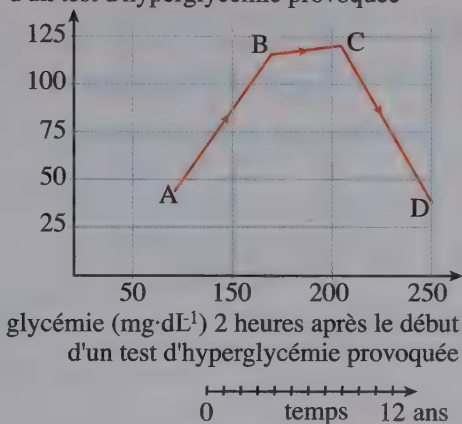


Figure 18.22 – Insulinémie et glycémie après un test d'hyperglycémie provoquée

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.

16 Diabète – causes – conséquences

★★★

20 min

→ corrigé p. 465

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 caractères du diabète de type 1

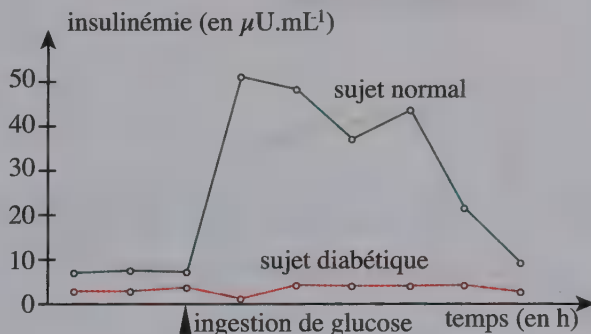


Figure 18.23 – Insulinémie après injection de glucose

• Document 2 – Caractéristiques du diabète de type 2

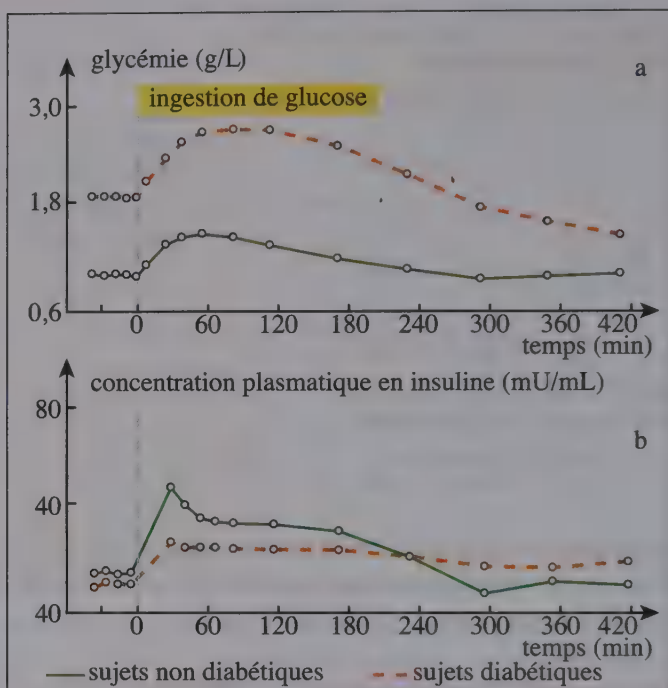


Figure 18.24 – Glycémie et concentration plasmatique en insuline, après ingestion de glucose

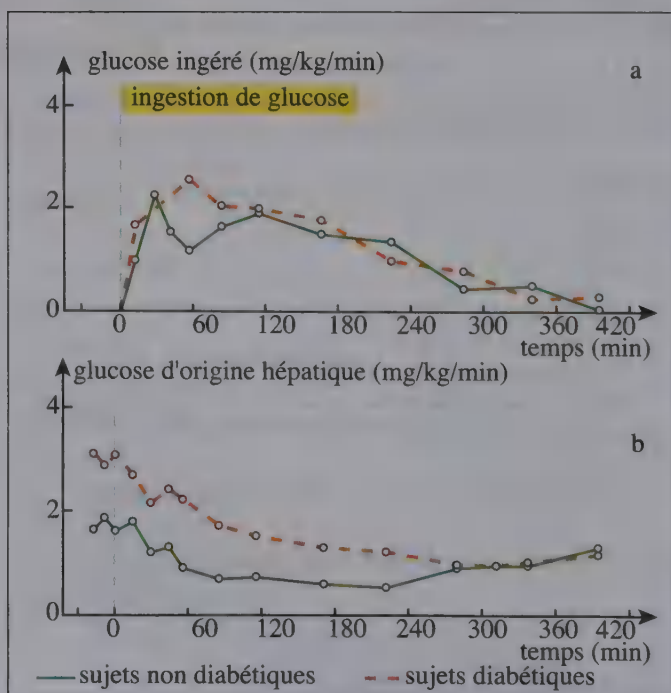


Figure 18.25 – Origine du glucose sanguin après ingestion

• Document 3 – Conséquences des diabètes

Complications communes aux deux types de diabètes	Témoignage (Equilibre, n°198, juin 1996)
• Hypertension artérielle • 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 une insuffisance rénale nécessitant des dialyses régulières) • Complications nerveuses.	« 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 durant 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 4 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. »

Tableau 18.4 – Complications dégénératives des deux diabètes et témoignage

1 QCM Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 435

- 1 Réponse exacte : **c** L'enzyme est un catalyseur biologique (fabriqué par des cellules vivantes) et non chimique. À l'instar de tout catalyseur, l'enzyme est intacte et à nouveau fonctionnelle une fois qu'elle a accompli la réaction chimique. Sa structure spatiale, parce qu'elle comporte un site actif indispensable à la catalyse enzymatique, est bien indispensable à la fonction de l'enzyme
- 2 Réponse exacte : **b** Le site actif appartient bien à l'enzyme, et non au substrat. Il ne saurait être le même pour toutes les enzymes : c'est justement la configuration spatiale du site actif qui est à l'origine de la spécificité des enzymes.
- 3 Réponse exacte : **b** Le substrat étant transformé en produit lors de la catalyse enzymatique, il est obligatoirement modifié. Par contre, ce substrat peut appartenir à n'importe quelle famille de molécules, à la différence des enzymes qui sont toujours des protéines.

2 QCM Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 435

- 1 Réponse exacte : **b**
- La proposition **a** est fausse car la glycémie a tendance à s'élever après un repas et à s'abaisser lorsque l'organisme est à jeun. Elle oscille autour d'une valeur physiologique voisine de 1 g.L^{-1} , sans être toujours strictement égale à cette valeur.
- La proposition **c** est fausse car le foie et le muscle sont des organes effecteurs de la régulation de la glycémie, et non des organes endocrines.
- 2 Réponse exacte : **c**
- La proposition **a** est fausse car ce sont les cellules bêta (et non les cellules alpha) qui sécrètent l'insuline. La proposition **b** est fausse car l'insuline, qui est une hormone hypoglycémisante, doit au contraire être davantage sécrétée lorsque la glycémie s'élève.
- 3 Réponse exacte : **a**
- La proposition **b** est fausse car le glucagon, qui est une hormone hyperglycémisante, doit au contraire être davantage sécrété lorsque la glycémie s'abaisse.
- La proposition **c** est fausse car le glucagon est sans effet sur les cellules musculaires et adipeuses.

3 V/F Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 436

- 1 Affirmations inexactes : **a** et **c**

Rectifications :

- 1 **a** Lorsque l'organisme est à jeun, les effecteurs que sont les cellules hépatiques, et uniquement elles, se chargent de libérer du glucose dans le sang.

1 **c** Lorsque l'organisme est à jeun, du glucagon est non pas fabriqué mais sécrété en plus grande quantité par les cellules pancréatiques.

2 Affirmations inexactes : **a** et **b**

Rectifications :

2 **a** Dans le système de régulation de la glycémie, le paramètre réglé est non pas l'insulinémie mais la glycémie.

2 **b** Dans le système de régulation de la glycémie, les capteurs sont les cellules alpha et bêta des îlots de Langerhans du pancréas, et non les cellules effectrices.

4 V/F Vérification des connaissances

→ énoncé
p. 436

1 Faux : c'est dans le cas du diabète de type 1 qu'on observe une destruction des îlots de Langerhans, liée à la disparition des cellules bêta productrices d'insuline.

2 Vrai : le diabète de type 1 est bien le diabète insulino-dépendant, dans lequel la déficience en insuline doit être corrigée par des injections d'insuline.

3 Vrai : par exemple le gène HLA-DR fait partie des gènes de susceptibilité impliqués dans le déterminisme du diabète insulino-dépendant.

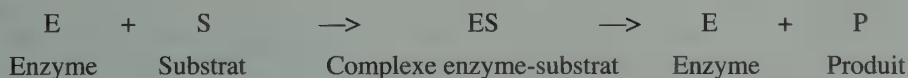
5 Amylase - vitesse

→ énoncé
p. 436

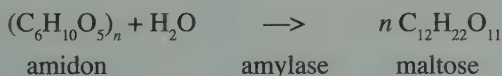
Lycée des Pontonniers, Strasbourg

1. Le réactif utilisé lors de ces expériences est l'eau iodée.
2. Initialement l'eau iodée est de couleur jaune (ocre). Une coloration bleue révèle la présence d'amidon. Une coloration violette ou rouge-brun révèle la présence de dextrines c'est-à-dire de molécules de formule $(C_6H_{10}O_5)_n$ dans laquelle le nombre « n » est plus petit que dans le cas de l'amidon. Une couleur jaune révèle l'absence d'amidon et l'absence de dextrines.

3. L'équation générale d'une réaction enzymatique s'écrit :



4. L'équation spécifique de la réaction étudiée (hydrolyse de l'amidon) s'écrit :



5. La vitesse de la réaction enzymatique s'apprécie soit en estimant la quantité de produit formé par unité de temps, soit en estimant la quantité de substrat transformé par unité de temps.
6. Dans le cas de l'hydrolyse de l'amidon par l'amylase, l'hydrolyse achevée est signalée par une coloration jaune qui indique la disparition complète de l'amidon. La rapidité de la réaction peut donc ici s'apprécier par l'inverse du temps au bout duquel l'amidon a disparu. Dans le tableau ci-après on a reporté les durées d'hydrolyse et les inverses de ces durées :

Température	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
Durée (t) de l'hydrolyse (minutes)	-	-	21	12	9	9	12	-	-
Inverse (1/t) de la durée de l'hydrolyse	-	-	0.048	0.083	0.111	0.111	0.083	-	-

On peut ensuite reporter sur un graphique les valeurs numériques obtenues pour diverses températures.

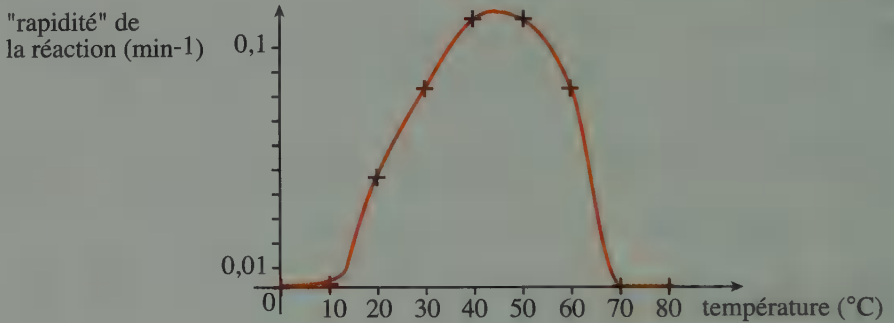


Figure 18.29 – Représentation graphique de la rapidité de l'hydrolyse de l'amidon en fonction de la température

7. On peut remarquer qu'il existe une gamme de températures, comprises entre 40°C et 50°C, pour lesquelles la réaction d'hydrolyse est rapide. Au-delà ou en deçà de cette valeur, la vitesse de l'hydrolyse diminue. Pour des températures extrêmes (inférieures à 10°C ou supérieures à 70°C) l'hydrolyse de l'amidon n'a pas lieu.

En effet, à basse température, l'enzyme est inactivée car l'agitation moléculaire est limitée : les molécules d'enzyme (amylase) et de substrat (amidon) se rencontrent difficilement. À haute température, l'amylase est définitivement altérée car une forte température a pour effet de dénaturer une protéine c'est-à-dire de lui faire perdre irréversiblement sa conformation spatiale, ce qui entraîne la perte du site actif.

6 Enzymes – Propriétés

→ énoncé
p. 437

Lycée Pablo Picasso, Fontenay-sous-Bois

MÉTHODE

Ce sujet représente un exemple d'exercice 2 de la partie 2 de l'épreuve écrite du baccalauréat. Adopter en routine les conseils suivants :

- Structurer la réponse en paragraphes. Si le plan est soufflé par l'énoncé, l'utiliser, même s'il ne paraît pas « équilibré ».
- Être transparent dans la démarche
- Bien choisir les éléments scientifiques issus des documents et des connaissances, et les mettre bien en relation.
- Faire référence aux documents chaque fois qu'ils sont utilisés
- En guise de bilan, reprendre de manière synthétique les différentes données afin de résumer la solution à la problématique.

Un être vivant peut montrer des variations de son équipement enzymatique au cours du temps, en relation par exemple avec son mode d'alimentation. Indépendamment de ces variations, les enzymes montrent des propriétés communes. À partir de l'exploitation d'un corpus de documents, il s'agit de montrer que la modification de l'équipement enzymatique du porc après la naissance lui permet de devenir omnivore, puis de répertorier les propriétés essentielles des enzymes.

Evolution de l'équipement enzymatique du porc après la naissance et acquisition du régime omnivore

Le document 3 fournit divers renseignements à propos des enzymes digestives du porc.

Le document 3a est un tableau qui présente les enzymes des différents sucs digestifs du porc adulte, les substrats de ces enzymes et le produit de leur activité. On peut voir que le porc adulte possède les enzymes pepsine et trypsine qui lui permettent d'assurer la digestion des protéines et des peptides ; il possède également une panoplie d'enzymes (lactase, amylase, maltase, saccharase) lui permettant d'assurer la digestion des polyholosides (amidon) ou de divers diholosides (lactose, maltose, saccharose).

Cet équipement enzymatique varié permet à l'animal de digérer aussi bien les protides que les glucides, faisant de lui un animal omnivore.

Le document 3b est un graphique qui renseigne sur la concentration en enzymes dans les sucs digestifs du porc entre la naissance et la 7ème semaine. On observe sur ce graphique qu'à la naissance, le porcelet ne possède que de la lactase, et ne possède aucune des enzymes digestives présentes chez l'adulte. Le porcelet ne peut donc digérer que le lactose, c'est-à-dire le sucre du lait. Son alimentation s'effectuera à partir du

lait maternel. Son régime à cet âge ne peut donc pas être un régime omnivore.

On remarque sur le même graphique qu'après la naissance l'équipement enzymatique des sucs digestifs du porcelet change : la quantité de lactase diminue à partir de la deuxième semaine, tandis que les enzymes de type amylase, pepsine, maltase, trypsine et saccharase apparaissent et deviennent de plus en plus abondantes au fil des semaines. Au bout de 7 semaines, chaque type d'enzyme digestive est suffisamment bien représenté pour qu'on puisse nourrir, en élevage, les porcelets avec une alimentation de type adulte correspondant au régime omnivore.

Les propriétés fondamentales des enzymes du monde vivant

Le document 1 contient les résultats d'un protocole utilisant un mélange d'amidon et d'amylase pancréatique humaine placé à différentes températures, comprises entre 0°C et 80°C. Des prélèvements sont effectués toutes les 3 minutes, et on teste la présence d'amidon dans le mélange en réalisant un test à l'eau iodée. On sait que l'eau iodée est le réactif de l'amidon : une couleur bleue révèle la présence d'amidon alors que la couleur jaune est celle de l'eau iodée en l'absence d'amidon.

Dans le mélange placé à 40°C (température voisine de la température corporelle), une disparition de la couleur bleue est observée au bout de 6 minutes, ce qui révèle la disparition de l'amidon. Cela met en évidence le rôle de catalyseur joué par l'amylase. Cette enzyme a hydrolysé l'amidon en maltose.

Dans les mélanges placés par exemple à 20°C ou 60°C, la disparition de la couleur bleue n'est observée qu'au bout de 15 minutes. L'hydrolyse de l'amidon par l'amylase est plus tardive dans ces mélanges ce qui montre la sensibilité des enzymes à la température.

Dans les mélanges placés à des températures plus extrêmes, à 0°C ou à plus de 70°C, il n'y a pas disparition de la couleur bleue. On en déduit qu'à ces températures, l'amylase est incapable d'hydrolyser l'amidon.

L'effet des températures extrêmes s'explique de la manière suivante :

- à basse température, l'enzyme est inactivée car l'agitation moléculaire est limitée : les molécules d'enzymes et de substrat se rencontrent difficilement. Il ne peut y avoir la formation du complexe enzyme-substrat indispensable à la catalyse enzymatique.
- à haute température, l'enzyme est définitivement altérée car une forte température a pour effet de dénaturer une protéine c'est-à-dire de lui faire perdre irréversiblement sa conformation spatiale. Il y a disparition du site actif enzymatique, indispensable à la catalyse enzymatique.

Le document 2 présente la réaction chimique catalysée par la glucose-oxydase, enzyme qui catalyse l'oxydation du glucose en gluconolactone et eau oxygénée, ainsi qu'une expérimentation menée autour de la glucose-oxydase du champignon *Aspergillus niger*. Différentes solutions de glucides sont utilisées et on mesure la concentration en dioxygène pour chaque solution de glucides, avant et après injection de glu-

cose-oxydase. Les résultats sont présentés dans un graphique où figurent les courbes correspondant aux 5 glucides utilisés.

On observe que l'injection au bout de 20 secondes de glucose-oxydase dans la solution de glucose provoque une diminution de la concentration en dioxygène (de $260 \mu\text{mol.L}^{-1}$ à $10 \mu\text{mol.L}^{-1}$ en moins d'une minute) dans la solution. Cela prouve qu'il y a eu consommation de dioxygène en présence de l'enzyme, ce qui témoigne de la réaction d'oxydation du glucose par la glucose-oxydase.

On observe que lorsque la glucose-oxydase est injectée dans la solution d'un autre glucide (lactose, fructose, maltose ou galactose), cela ne provoque pas de diminution de la concentration en dioxygène dans la solution. Cela prouve que la glucose oxydase d'*Aspergillus* ne catalyse pas l'oxydation du maltose, ni du lactose, ni du fructose, ni du galactose.

Cette expérimentation met en évidence la spécificité de substrat de la glucose-oxydase.

Bilan

Après sa naissance, le porc acquiert une diversité d'enzymes digestives (glycosidases et protéases), ce qui lui permet de s'affranchir de l'allaitement maternel et de devenir omnivore.

Qu'il s'agisse des enzymes du porc, de l'homme ou d'un champignon, les enzymes montrent des propriétés fondamentales :

- elles catalysent la transformation d'un substrat en produit(s)
- leur activité diminue au-delà ou en-deçà d'une température optimale voisine de 40°C
- elles exercent leur action sur un substrat précis.

7 Hormone – cellule-cible

➔ énoncé
p. 440

Lycée Riquet, Saint-Orens

1. On observe sur la figure la présence de taches au niveau de la membrane plasmique de l'hépatocyte. Chaque tache correspond à du glucagon fixé sur la membrane après perfusion de la cellule hépatique avec une solution contenant du glucagon marqué. En effet, le glucagon est une hormone qui agit spécifiquement sur ses cellules-cibles hépatiques en se fixant, par complémentarité de forme, à des récepteurs protéiques situés au niveau de la membrane plasmique. C'est la fixation hormone-récepteur qui déclenche le changement d'activité de la cellule-cible.
2. La dégradation rapide du glucagon qui circule librement dans le plasma fait que la concentration plasmatique en glucagon dépend essentiellement de la quantité de glucagon sécrétée par les cellules endocrines du pancréas. De cette façon, le message hormonal peut être codé par la concentration plasmatique de l'hormone : plus le stimulus (diminution de la glycémie) est intense, plus la concentration plasmatique en glucagon est importante.

8 Pancréas – greffe

→ énoncé
p. 440

Lycée Honoré de Balzac, Mitry Mory

1. Lors de l'expérience 1, l'ablation du pancréas chez le chien provoque une hyperglycémie et une baisse importante de la quantité de glycogène hépatique. On en déduit que le pancréas, lorsqu'il est présent, a globalement un rôle hypoglycémiant et commande le stockage de glycogène dans le foie.

Lors de l'expérience 2, la greffe d'un fragment de pancréas au chien pancréatectomisé supprime les troubles constatés dans l'expérience 1. Cela montre que le pancréas exerce son action par voie sanguine.

En résumé, ces deux expériences montrent que le pancréas est un organe hypoglycémiant qui agit au moyen d'hormones sur un organe-cible : le foie.

2. Lors de l'expérience 3, on observe une hypoglycémie lorsque le pancréas greffé du chien est perfusé avec une solution glucosée de concentration égale à 4 g.L^{-1} . Cela signifie que le pancréas a déclenché un mécanisme de régulation de la glycémie à la suite d'une hyperglycémie qu'il a détecté. On met ici en évidence l'existence, au niveau du pancréas, de capteurs enregistrant les écarts de la glycémie.
3. Le schéma qu'on demande de réaliser dans cette question correspond à celui de la figure 18.9 du cours de ce chapitre (paragraphe 3.3), qui représente le mécanisme de régulation de la glycémie à la suite d'une élévation de la glycémie. Le principal organe effecteur de cette régulation est le foie. L'hormone mise en jeu est l'insuline.

9 Foie – insuline – effecteur

→ énoncé
p. 441

Lycée Saint Louis, Lorient

1. Dans cette expérience, la déviation de la veine porte hépatique vers la veine cave inférieure permet aux nutriments absorbés au niveau intestinal de ne pas transiter par le foie. De cette façon, on assure la stabilité du taux de glucose présent dans le sang entrant dans le foie avant l'injection d'insuline. En observant la courbe 2, on remarque que l'injection d'insuline provoque une diminution importante de la glycémie dans le sang de la veine sus-hépatique : elle s'abaisse de 1 g.L^{-1} à 0.8 g.L^{-1} en 30 minutes. L'injection d'insuline provoque une diminution plus tardive et moins importante de la glycémie dans le sang de l'artère hépatique : elle s'abaisse de 0.8 g.L^{-1} à 0.75 g.L^{-1} en 30 minutes. Cela indique que la différence artério-veineuse en glucose a tendance à diminuer au cours du temps après injection d'insuline. Ces modifications s'opèrent alors que le flux sanguin hépatique, donné par la courbe 3, reste constant et voisin de 230 ml.min^{-1} . Cela ne peut s'expliquer que par une diminution de la quantité de glucose libéré dans le sang par le foie. On explique ainsi l'évolution de la production hépatique de glucose que montre la courbe 1 : on y observe qu'après injection d'insuline, la production hépatique de glucose a diminué de 43 mg.min^{-1} à 20 mg.min^{-1} en 30 minutes.
2. On sait que sous l'action de l'insuline, les mécanismes de la synthèse de glycogène

et de triglycérides à partir de glucose sont stimulés dans les cellules du foie, tandis que les mécanismes de libération de glucose à partir des réserves hépatiques sont inhibés. Cela explique la diminution de la production de glucose hépatique à la suite de l'injection d'insuline.

10 Insuline – organes-cibles

énoncé
p. 442

Lycée des Pontonniers, Strasbourg

MÉTHODE

Avant de rédiger, examiner chaque document pour déterminer sa contribution à la résolution du problème posé. Lors de la rédaction, structurer la réponse selon les points exigés dans l'énoncé : rôles de l'insuline, conditions de sa sécrétion (« quand et comment »). Pour chaque point, enrichir si nécessaire avec des connaissances les informations tirées des documents.

- Les documents qui renseignent sur les rôles de l'insuline sont d'une part le graphique donnant les variations de la glycémie à la suite d'une injection intraveineuse d'insuline, d'autre part les informations a, b, c et d.
- On observe qu'une injection d'insuline chez un individu à jeun a pour effet de diminuer la glycémie : celle-ci diminue de 90 mg.dL^{-1} à moins de 50 mg.dL^{-1} en une trentaine de minutes. On en déduit que l'insuline a un effet hypoglycémiant.
D'après le graphique de l'information a, on observe après injection d'insuline une diminution du bilan hépatique, qui s'abaisse en trente minutes de 55 mg de glucose par minute à une valeur à peu près nulle. On comprend alors que l'insuline stimule la mise en réserve du glucose au niveau du foie, ce qui fait diminuer le bilan hépatique.
- D'après l'information b, le tissu musculaire mis en présence d'insuline augmente son prélèvement de glucose dans le milieu et contient davantage de glycogène que dans un milieu dépourvu d'insuline. La quantité de glucose « supplémentaire » prélevé dans le milieu est égale à 0.4 mg de glucose/g de muscle/10min, elle est égale à la quantité de glycogène « supplémentaire » stocké dans le muscle. On en déduit que l'insuline stimule le prélèvement de glucose par les cellules musculaires et que ce glucose est converti en glycogène dans les cellules musculaires.
- D'après l'information c, une alimentation trop riche en glucides fait augmenter la mise en réserve lipidique. Par ailleurs, chez un animal qui ne possède plus de cellules sécrétrices d'insuline, on note une diminution de la formation de lipides dans le tissu adipeux. Ces deux séries d'observations font comprendre que l'insuline stimule la mise en réserve du glucose sous forme de lipides dans le tissu adipeux.
- D'après l'information d, la présence d'insuline stimule l'oxydation du glucose dans les cellules. En effet, on sait que l'insuline favorise la pénétration et l'utilisation du glucose dans toutes les cellules (à l'exception des cellules nerveuses).

- En résumé, l'insuline agit sur les cellules hépatiques, les cellules musculaires, les cellules adipeuses ainsi que la plupart des autres types cellulaires. L'insuline stimule l'oxydation respiratoire du glucose dans toutes les cellules, stimule la glycogénogenèse dans les cellules musculaires et hépatiques, et stimule la lipogenèse dans les cellules du tissu adipeux. Tous ces rôles de l'insuline ont pour effet de soustraire du glucose au milieu intérieur : cela explique l'effet hypoglycémiant de l'insuline.
- Le document qui renseigne sur les conditions de sécrétion de l'insuline est le graphique donnant la quantité d'insuline libérée par le pancréas en fonction de la concentration en glucose. On peut observer qu'une élévation de la glycémie de 0.6 à 0.8 g.L^{-1} est immédiatement suivie d'une élévation de l'insulinémie de 150 à 700 mU.mL^{-1} . De la même façon, l'élévation de la glycémie de 0.7 à 0.9 g.L^{-1} est immédiatement suivie d'une élévation de l'insulinémie de 250 à 800 mU.mL^{-1} . Inversement, on note que toute baisse de la glycémie est immédiatement suivie d'une diminution de la quantité d'insuline sécrétée. Ces observations font comprendre que le stimulus déclenchant la sécrétion d'insuline est une élévation de la glycémie. L'insuline est donc davantage sécrétée après un repas.
- Finalement, l'élévation de la glycémie – consécutive à un apport alimentaire – est un stimulus déclenchant l'augmentation de la sécrétion d'insuline. L'action de l'insuline sur ses cellules-cibles (notamment les cellules hépatiques, musculaires et adipeuses) permet d'accroître le prélèvement de glucose par les cellules, ce qui assure le retour de la glycémie à sa valeur de référence.

11 Homéostat – glycémie

→ énoncé
p. 444

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

MÉTHODE

Tirer d'abord des informations des documents puis relier ces diverses informations entre elles pour expliquer la constance de la glycémie. Ne pas utiliser de connaissances personnelles (l'énoncé ne l'exige pas) autres que celles nécessaires à la compréhension des documents. Terminer par le schéma fonctionnel, qui sera forcément moins détaillé que celui construit dans le cours : ne le construire qu'à partir de ce qui est déductible des documents.

On observe à l'aide du graphique du document 1 que plus la solution de glucose avec laquelle on perfuse le pancréas est concentrée en glucose, plus la sécrétion d'insuline par le pancréas est importante : la sécrétion d'insuline s'élève de 0 à 4000 ng/20 min lorsque la concentration en glucose de la solution de perfusion s'élève de 3 à 27 mol.L^{-1} . On note également que plus la solution de glucose avec laquelle on perfuse le pancréas est concentrée en glucose, plus la sécrétion de glucagon par le pancréas est basse : la sécrétion de glucagon s'abaisse de 16 à 0 ng/20 min lorsque la concentration en glucose de la solution de perfusion s'élève de 3 à 27 mol.L^{-1} . De ces constats on

déduit qu'une élévation de la glycémie est le stimulus déclenchant la sécrétion d'insuline tandis qu'une baisse de la glycémie est le stimulus déclenchant la sécrétion de glucagon.

Le document 2 relate des expériences réalisées chez le chien. On peut noter d'après le renseignement « a » que l'injection d'insuline chez un chien à jeun provoque une chute de la quantité de glucose sortant du foie : elle s'abaisse de 42 mg/minute à 0 mg/minute pour une injection de 1800 mg d'insuline. Cela montre que l'insuline est une substance favorisant la mise en réserve de glucose dans le foie et s'opposant à sa libération dans le sang. D'après le renseignement « b », on note que l'injection de glucagon provoque une hyperglycémie à condition que le foie soit présent, ce qui montre que le glucagon est une substance favorisant la libération de glucose par le foie et agissant uniquement sur cet organe. En résumé, l'insuline et le glucagon agissent sur un organe-cible : le foie, ce qui a pour conséquence d'orienter le métabolisme de cet organe vers une libération de glucose ou bien vers une mise en réserve du glucose, modifiant ainsi la glycémie.

Le document 3 relate des dosages effectués chez l'homme. On observe, d'après la courbe 3a, que lors d'un exercice modéré exécuté après une période de repos et sans absorption de glucose, la quantité d'insuline libérée dans le sang diminue au fur et à mesure de l'exercice : elle s'abaisse de $14 \text{ mU} \cdot \text{mL}^{-1}$ à $5 \text{ mU} \cdot \text{mL}^{-1}$ en 250 minutes d'exercice. En effet, lors de l'exercice physique du glucose est prélevé dans le sang, ce qui diminue progressivement la glycémie. Or, d'après le document 1, l'insuline est d'autant moins sécrétée que la glycémie diminue. Cela explique la diminution de la sécrétion d'insuline lors de l'exercice physique. Par ailleurs, on observe d'après la courbe 3b que des cellules musculaires cultivées en présence d'insuline augmentent leur consommation de glucose, en quantité d'autant plus importante que le taux d'insuline est important. Par exemple, les cellules musculaires consomment 4.5 mg de glucose par gramme de muscle et par heure lorsque le taux d'insuline est égal à 10 unités arbitraires, alors qu'elles consomment 6 mg de glucose par gramme de muscle et par heure lorsque le taux d'insuline est égal à 40 unités arbitraires. De ces constats on déduit que les cellules musculaires sont des cellules-cibles de l'insuline et qu'elles répondent à l'insuline en accroissant leur consommation de glucose. La relation que l'on vient de constater entre la quantité d'hormone sécrétée et l'importance de la réponse de ses cellules-cibles démontre que le message hormonal est codé en modulation d'amplitude de la sécrétion hormonale.

Le document 4 permet de préciser l'action de l'insuline sur diverses cellules. Des cellules nerveuses ne modifiant pas leur consommation de glucose en présence d'insuline, on en déduit que les cellules nerveuses ne sont pas des cellules-cibles de l'insuline.

En résumé, un sujet en bonne santé conserve une glycémie constante quelles que soient les circonstances :

- Lorsque la glycémie est trop basse, la sécrétion de glucagon est augmentée tandis que celle d'insuline est diminuée. L'insuline n'est alors plus à même de stimuler

le prélèvement de glucose par les cellules musculaires et hépatiques, tandis que le glucagon stimule la libération de glucose par le foie. Les changements d'activité des cellules-cibles des hormones pancréatiques ont pour conséquence d'ajouter du glucose au milieu intérieur, ce qui élève la glycémie et donc la rétablit.

- Lorsque la glycémie est trop élevée, la sécrétion d'insuline est augmentée tandis que celle de glucagon est diminuée. Le glucagon n'est alors plus à même de stimuler la libération de glucose par le foie, tandis que l'insuline stimule le prélèvement de glucose par les cellules musculaires et hépatiques. Les changements d'activité des cellules-cibles des hormones pancréatiques ont pour conséquence de soustraire du glucose au milieu intérieur, ce qui diminue la glycémie et donc la rétablit.
- La régulation de la glycémie repose ainsi sur une communication entre des capteurs (cellules pancréatiques) qui enregistrent les écarts de la glycémie et des cellules effectrices (cellules hépatiques, cellules musculaires) qui gèrent le glucose dans l'organisme. La communication entre capteurs et effecteurs se fait par voie humorale : l'insuline et le glucagon sécrétés par les cellules pancréatiques sont des hormones c'est-à-dire des messagers chimiques véhiculés par le sang jusqu'à des cellules-cibles dont ils modifient l'activité. Le message hormonal est défini par la quantité d'hormones présente dans le sang à un moment donné, et détermine l'ampleur de la réponse des cellules-cibles.

stimulus = variation de la glycémie

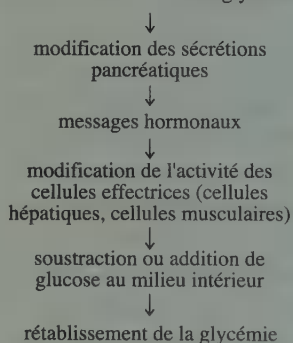


Figure 18.30 – Schéma fonctionnel de la régulation de la glycémie (réalisé à partir des seules informations tirées des documents)

12 Diabète – type 1 – type 2

Lycée Voltaire, Paris

énoncé
p. 446

1. On sait que le diabète de type 2 est souvent associé à une obésité. On en déduit que la courbe « obèses diabétiques » correspond aux sujets diabétiques de type 2 tandis que la courbe « diabétiques non obèses » correspond aux sujets diabétiques de type 1.
2. On observe que chez les obèses non diabétiques, l'insulinémie s'élève davantage et plus rapidement que chez les obèses diabétiques. Par exemple, l'insulinémie s'élève de $25 \mu\text{g.mL}^{-1}$ jusqu'à un taux maximal de $250 \mu\text{g.mL}^{-1}$ moins d'une heure après l'injection chez les sujets obèses non diabétiques, alors qu'elle s'élève de

25 $\mu\text{g.mL}^{-1}$ jusqu'à un taux maximal de 220 $\mu\text{g.mL}^{-1}$ au bout de 2 heures chez les sujets obèses diabétiques. On sait en effet que le diabète de type 2 est d'abord caractérisé par une sécrétion importante d'insuline, puis, au cours des années, évolue vers un déficit dans la sécrétion d'insuline. Les obèses diabétiques impliqués dans cette étude sont peut-être en train d'évoluer vers le stade de l'insulinodéficience, ce qui expliquerait qu'ils sécrètent plus difficilement l'insuline que les obèses non diabétiques.

13 Pimas – diabète type 2

➔ énoncé
p. 446

Lycée Jacques Monod, Clamart

1. On peut admettre qu'un sujet est maigre si son IMC est inférieur à 20. On observe sur l'histogramme que pour les sujets dont l'IMC est inférieur à 20, la prévalence du diabète de type 2 est identique quelle que soit l'hérédité des sujets : la prévalence est de 1 nouveau cas pour 1000 personnes et par an, que les sujets aient ou non des parents diabétiques. On en déduit que chez les sujets maigres l'hérédité n'a pas d'influence sur la survenue du diabète de type 2.
2. On observe sur l'histogramme que pour les sujets dont l'IMC est supérieur à 20, la prévalence du diabète de type 2 est plus grande dans le cas des sujets qui ont un ou deux parents diabétiques : par exemple, pour une IMC comprise entre 25 et 30, la prévalence est de 2 nouveaux cas pour 1000 personnes et par an pour des sujets sans parents diabétiques alors qu'elle est de 18 nouveaux cas pour 1000 personnes et par an pour des sujets ayant deux parents diabétiques. On en déduit que chez les sujets non maigres, l'hérédité influence la survenue du diabète de type 2.
3. On note que chez les sujets n'ayant pas de parents diabétiques, la prévalence du diabète de type 2 est d'autant plus importante que l'IMC est important : par exemple, la prévalence est de 2 nouveaux cas pour 1000 personnes et par an lorsque l'IMC est compris entre 25 et 30 tandis qu'elle est de 20 nouveaux cas pour 1000 personnes et par an lorsque l'IMC est supérieur à 40.
4. Chez les sujets ayant un ou deux parents diabétiques, la relation entre l'augmentation de l'IMC et l'augmentation de la prévalence est encore plus marquée que chez les sujets sans prédisposition génétique : par exemple, dans le cas où les deux parents sont diabétiques, la prévalence est de 18 nouveaux cas pour 1000 personnes et par an lorsque l'IMC est compris entre 25 et 30 tandis qu'elle est de 100 nouveaux cas pour 1000 personnes et par an lorsque l'IMC est supérieur à 40.
5. En conclusion, chez les indiens Pimas le développement du diabète de type 2 est favorisé :
 - par le développement de l'obésité, caractérisée par un IMC élevé ;
 - par des antécédents génétiques, qui ont un impact d'autant plus important que l'IMC est élevé.

14 Susceptibilité – diabète type 1

→ énoncé
p. 447

Lycée Toulouse-Lautrec, Toulouse

1. On observe que chez les trois populations de Caucasiens le génotype asp^-/asp^- se rencontre beaucoup plus souvent chez les sujets diabétiques que chez les sujets témoins non diabétiques. Au contraire, le génotype asp^+/asp^+ se rencontre plus souvent chez les sujets témoins non diabétiques que chez les sujets diabétiques. On en déduit qu'il y a implication du gène codant pour la protéine HLA-DQ dans le déterminisme du diabète de type 1 : plus exactement, la possession de l'allèle asp^- entraîne un risque plus élevé d'avoir un diabète. Cela correspond à la définition d'un gène de susceptibilité : gène dont la présence de certaines formes alléliques accroît le risque d'apparition et de développement d'un diabète.
2. Dans les populations caucasiennes de sujets diabétiques, les sujets homozygotes asp^-/asp^- ne représentent pas 100% des sujets diabétiques. De plus, le pourcentage d'homozygotes asp^-/asp^- n'est pas tout à fait identique dans les trois populations caucasiennes de sujets diabétiques. Ces deux observations montrent que l'allèle asp^- n'est pas seul impliqué dans le diabète de type 1.

15 Diabète – type 2

→ énoncé
p. 448

Lycée Charlemagne, Paris

⚠ ATTENTION

Les représentations graphiques proposées sont originales puisqu'en tout point du tracé on a trois renseignements : l'insulinémie, la glycémie et le temps. L'allure générale du tracé ne renseigne que sur les variations de l'insulinémie au cours du temps. Les valeurs donnant l'évolution de la glycémie doivent être lues sur l'axe des abscisses.

On dispose de données concernant le suivi médical sur 12 ans d'un individu non traité atteint de diabète de type 2. On observe que pendant les neuf premières années, le sujet a manifesté une insulinémie à jeun de plus en plus importante : elle a augmenté de 10 à $27 \mu\text{U.dL}^{-1}$. Par la suite, l'insulinémie à jeun a diminué : elle s'est abaissée de 27 à $16 \mu\text{U.dL}^{-1}$. Concernant l'évolution de la glycémie à jeun, on note qu'elle s'est élevée de 80 mg.dL^{-1} à 200 mg.dL^{-1} sur la période de 12 ans.

Ces données nous montrent qu'au cours du temps, le diabète de type 2 évolue vers une déficience dans la sécrétion d'insuline à jeun et vers une accentuation de l'hyperglycémie à jeun. Cela traduit des changements dans le phénotype biochimique caractérisant le sujet atteint de diabète de type 2.

On dispose également de résultats de test d'hyperglycémie provoquée chez cet individu. La glycémie et l'insulinémie sont mesurées 2 heures après le début du test. On

observe que pendant les neuf premières années, le sujet a manifesté, à la suite du test, une insulinémie de plus en plus importante : elle a augmenté de 45 à $125 \mu\text{U.dL}^{-1}$. Par la suite, l'insulinémie a diminué : elle s'est abaissée de 125 à $40 \mu\text{U.dL}^{-1}$. Concernant l'évolution de la glycémie, on note qu'elle s'est élevée de 70 mg.dL^{-1} à 250 mg.dL^{-1} sur la période de 12 ans. Ces données révèlent des changements dans le système de régulation de la glycémie chez l'individu : au delà de plusieurs années, l'insuline est moins bien sécrétée à la suite de l'hyperglycémie, ce qui a pour effet d'aggraver l'hyperglycémie. Il en résulte une évolution du diabète non insulino-dépendant vers un stade sévère caractérisé par un déficit dans l'insulinosécrétion, occasionnant des troubles voisins de ceux du diabète insulino-dépendant, bien que le diabète de type 2 soit, au départ, un diabète non insulino-dépendant.

Le moment du changement dans le phénotype diabétique de ce sujet peut être apprécié par la portion (BC) du tracé, qui marque la période où la sécrétion d'insuline cesse d'augmenter. On détermine ainsi que le déficit dans la sécrétion d'insuline a commencé à se manifester entre 6 et 9 ans après le début du suivi du patient.

16 Diabète – causes – conséquences

→ énoncé
p. 449

Lycée Lacordaire, Marseille

On observe que chez le sujet atteint de diabète de type 1, l'insulinémie est constamment basse même après une ingestion de glucose, alors que chez le sujet normal l'insulinémie s'élève fortement et rapidement – de 7 à plus de $50 \mu\text{U.mL}^{-1}$ en moins d'une heure – après l'ingestion de glucose. On en déduit que le diabète de type 1 a pour origine une déficience dans la sécrétion d'insuline. On sait que cette déficience est due à une destruction des cellules bêta productrices d'insuline.

Chez les sujets atteints de diabète de type 2, on observe que suite à une ingestion de glucose :

- la glycémie s'élève davantage que chez les sujets non diabétiques ;
- l'insulinémie s'élève un peu moins que chez les sujets non diabétiques mais s'élève de façon plus durable ;
- le glucose ingéré reste davantage dans la circulation sanguine par rapport aux sujets non diabétiques ;
- la quantité de glucose sanguin d'origine hépatique est beaucoup moins importante que chez les sujets non diabétiques.

Ces constats complétés par nos connaissances permettent de comprendre l'origine du diabète de type 2 :

- malgré une sécrétion à peu près correcte d'insuline le glucose d'origine alimentaire est moins bien soutiré au milieu intérieur et le bilan hépatique en glucose est largement positif (le foie libère beaucoup plus de glucose qu'il n'en stocke) : ceci est la conséquence d'une insulino-résistance des cellules-cibles de l'insuline, dont font partie les cellules hépatiques. Les organes effecteurs n'assurent plus le stockage du glucose.

- On sait qu'au fil des années le diabète de type 2 évolue vers un déficit dans la sécrétion d'insuline, ce qui explique ici que l'insulinémie s'élève un peu moins que chez les individus non diabétiques.

On doit ensuite expliquer les conséquences de ces deux types de diabète. Le tableau proposé donne des conséquences identiques pour les deux types de diabète car au stade sévère – caractérisé par un déficit de l'insulinosécrétion – le diabète de type 2 est caractérisé par des troubles voisins de ceux du diabète du type 1. On note des lésions au niveau des vaisseaux sanguins, particulièrement ceux situés au niveau de la rétine et des reins. En effet, le glucose sanguin en excès réagit avec les protéines du sang et de la paroi des vaisseaux. Cela modifie les propriétés (épaisseur, perméabilité, élasticité) de la paroi des artérioles et des capillaires. Les atteintes rénales sévères résultant de cette altération des vaisseaux peuvent conduire à la décision d'une double transplantation rein-pancréas, comme l'indique le témoignage proposé.

Baccalauréat Blanc

Voir nos conseils de méthode « Spécial Bac » dans les « Méthodes de travail ».

Partie I

Les végétaux terrestres sont pour la plupart des êtres vivants fixés. La vie fixée impose des contraintes.

? QUESTION

Présentez les différentes contraintes liées à la vie fixée et les caractéristiques des végétaux terrestres qui peuvent leur être reliées.

Votre travail sera structuré et comportera une introduction et une conclusion rédigées. Le développement sera réalisé sous la forme d'un tableau présenté sur une double page.

Partie II

exercice 1

La morphine est une substance extraite du pavot, utilisée depuis l'Antiquité comme médicament contre la douleur (analgésique). La substance P est une molécule naturellement présente dans le tissu nerveux.

? QUESTION

À partir d'informations extraites du document, déterminez le rôle de la substance P puis expliquez l'effet analgésique de la morphine.

DOCUMENT

a Informations

La sensation douloureuse met en jeu plusieurs neurones. La stimulation électrique du neurone 1, issu de la peau, provoque des messages sur le neurone 2 et une sensation douloureuse. Une analyse chimique fine, réalisée avant et après la stimulation, met en évidence une augmentation de la substance P entre les neurones 1 et 2. Cette substance est aussi décelée dans les vésicules des boutons synaptiques des neurones 1.

La stimulation de certaines zones du cerveau diminue la sensation douloureuse. Les neurones issus de l'encéphale sont en contact avec le neurone 1 par l'intermédiaire de synapses localisées sur la synapse du neurone 1 sur le neurone 2. Les neurones 3 libèrent de l'enképhaline qui inhibe la libération de la substance P.

En présence de morphine, la fréquence des potentiels d'action émis par le neurone 2 diminue

b Schéma des neurones impliqués

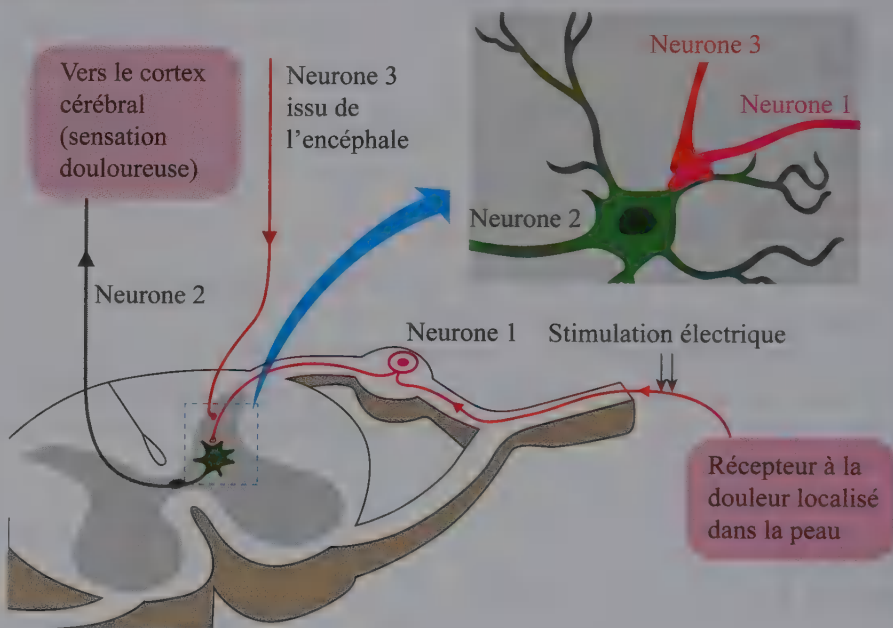


Figure 19.1 – Circuit neuronique

c Représentation moléculaire de la morphine et de l'enképhaline

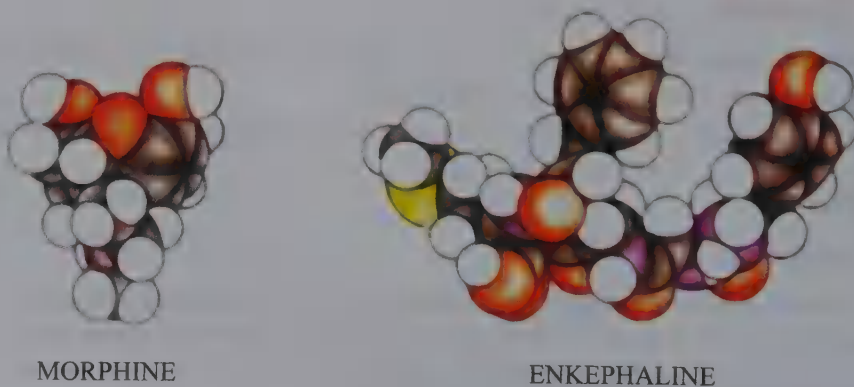


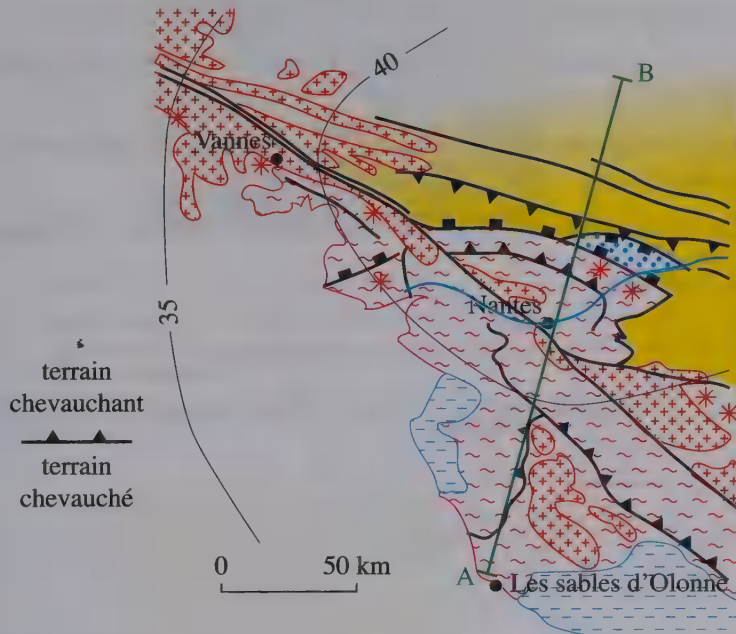
Figure 19.2 – Modèles moléculaires de la morphine et de l'enképhaline

Partie II

exercice 2 (enseignement spécifique)

Le Massif armoricain est une unité géologique qui s'étend sur l'ouest de la France (Bretagne, Pays de la Loire, Basse-Normandie occidentale et Poitou). Il tire son nom de l'ancienne Armorique, région gauloise située entre la Loire et la Seine. Sa formation a eu lieu durant la période d'orogénèse hercynienne, de -400 à -250 Ma environ.

Document 1 : Caractéristiques du Massif Armoricain



ROCHES SÉDIMENTAIRES

- Roches sédimentaires marines
âge < 200 Ma (post hercynien)
- Roches sédimentaires détritiques
345 Ma < âge < 395 Ma (hercynien)
- Roches sédimentaires diverses
âge > 395 Ma (antéhercynien)
- Profondeur du Moho

ROCHES PLUTONIQUES

- Granite

ROCHES MÉTAMORPHIQUES

- Gneiss
- Migmatite

FIGURES TECTONIQUE

- Faille
- Faille
- Faille

Les roches sédimentaires détritiques sont formées par accumulation de sédiments issus de l'altération de matériaux continentaux

Figure 19.3 – Document 1a : carte géologique simplifiée du massif



Figure 19.4 – Document 1b : coupe topographique selon la ligne A-B

Document 2 : Le contexte de formation de roches présentes dans le Massif Armoricain

Les migmatites sont des gneiss comportant des zones granitiques formées par fusion partielle du gneiss.

La ligne pointillée du diagramme sépare le domaine du métamorphisme du domaine de l'anatexie (fusion partielle)

Dans le sud du massif, en Vendée, on trouve des micaschistes comportant différents minéraux.

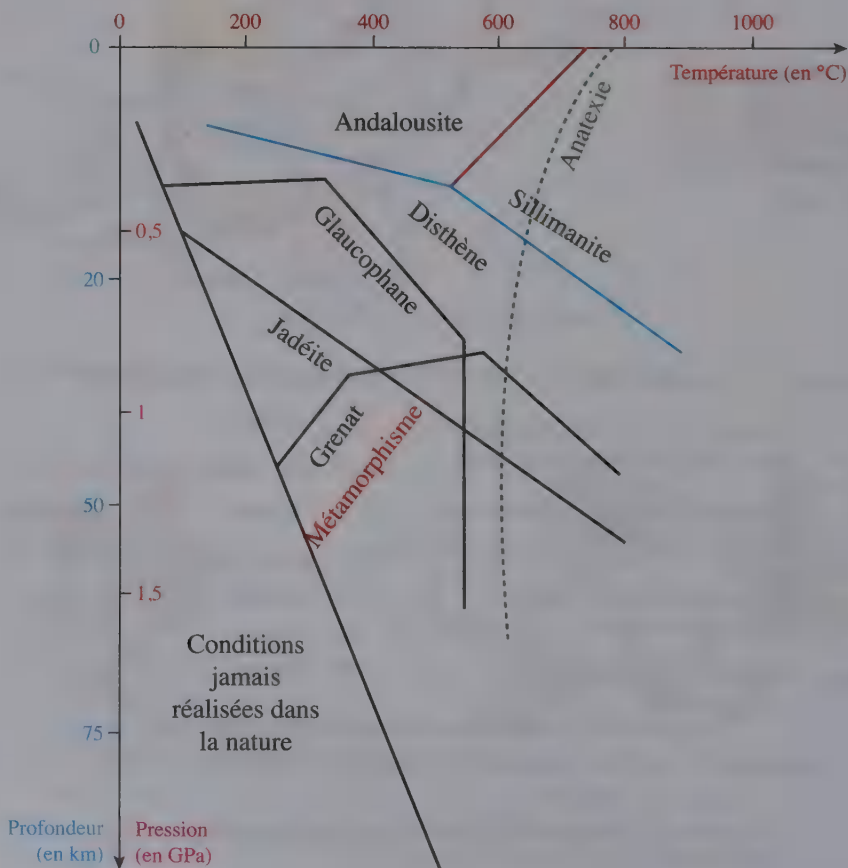


Figure 19.5 – Document 2a : domaine de stabilité de différents minéraux



Figure 19.6 – Document 2b : micaschistes présents sur la côte à Jard sur Mer (Vendée, proche des Sables d'Olonne)

Document 3 : Quelques caractéristiques d'une chaîne de montagnes récente : l'Himalaya

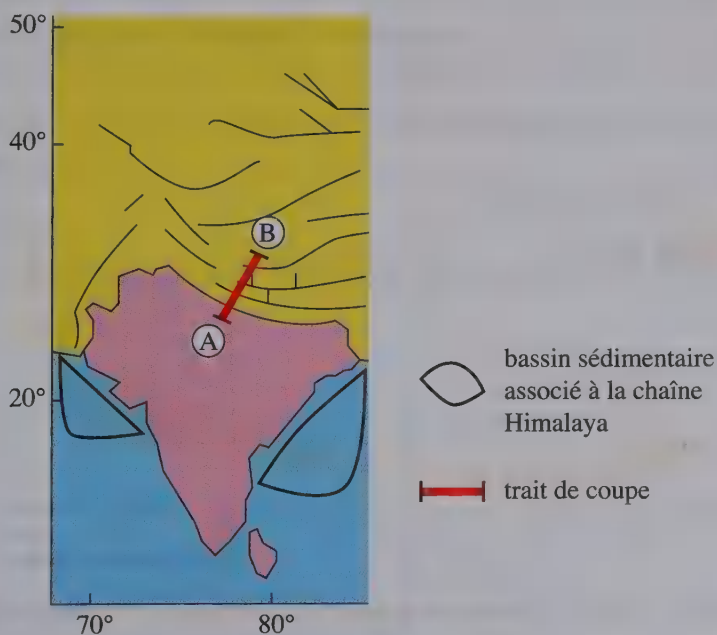


Figure 19.7 – Document 3a : localisation de la chaîne et du trait de coupe

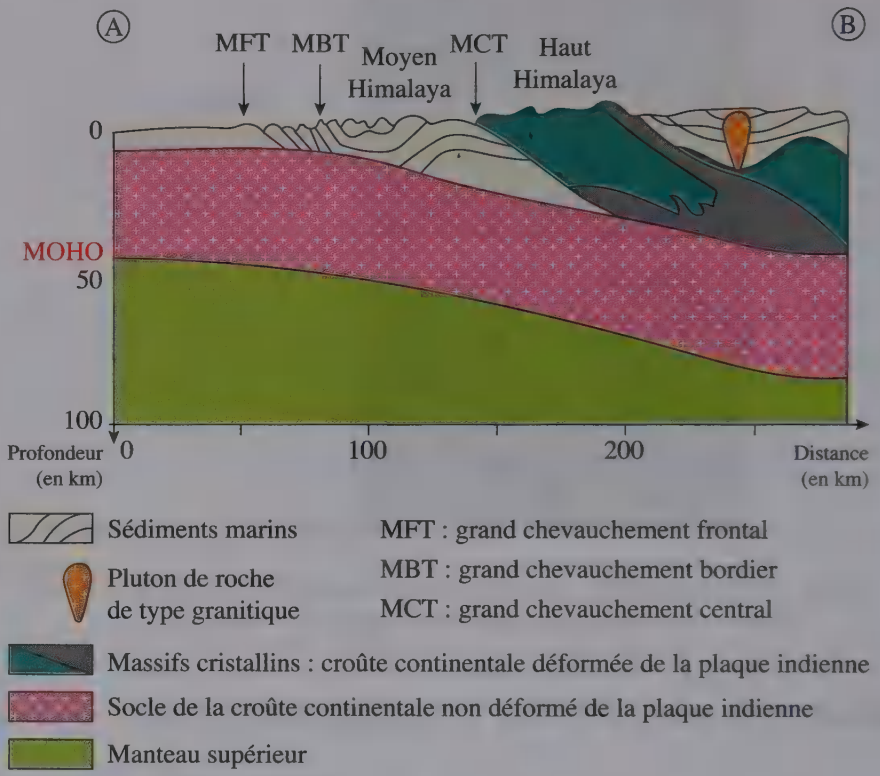


Figure 19.8 – Document 3b : coupe de la chaîne montrant les grandes structures

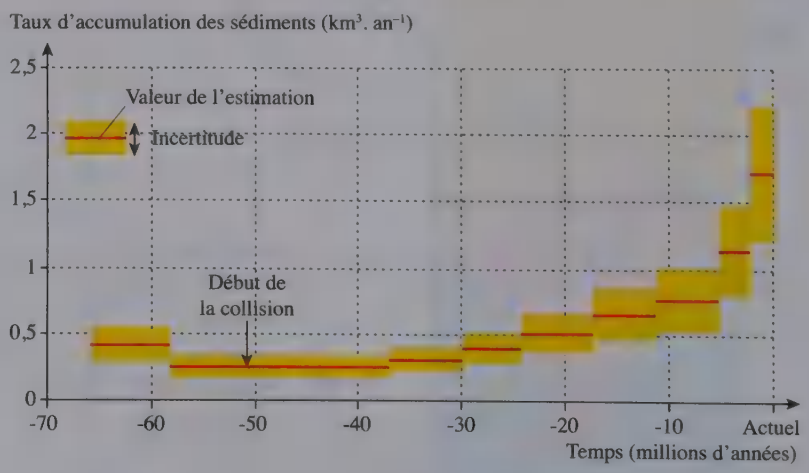


Figure 19.9 – document 3c : évolution du taux d'accumulation des sédiments dans les bassins associés à la chaîne Himalaya – Tibet depuis 65 Ma

? QUESTION

Montrez que le Massif Armoricaïn présente des caractéristiques d'une ancienne chaîne de montagnes ayant subi des transformations, que vous préciserez.

Votre réponse s'appuiera sur l'exploitation du dossier. Aucune étude exhaustive des documents n'est attendue.

Partie II**exercice 2 (enseignement de spécialité)**

Les géologues définissent le Würm comme la période se situant entre 120 000 et 10 000 années BP¹ et correspondant à la dernière glaciation survenue dans l'hémisphère Nord à l'ère Quaternaire. La température moyenne dans l'hémisphère Nord au Würm est estimée à quatre degrés de moins que la température actuelle. On situe à 20 000 années BP¹ l'apogée² de cette période glaciaire.

¹ BP : Before Present

² apogée : point le plus haut qu'on puisse atteindre

? QUESTION

Montrez que la période du Würm présente bien toutes les caractéristiques établies par la communauté scientifique.

La réponse s'appuiera sur l'exploitation du dossier documentaire et sur l'utilisation des connaissances.

Document 1

- a** Courbe isotopique du delta ^{18}O obtenue à partir du sondage au site «Grip» dans les glaces du Groenland

Voir la figure page suivante.

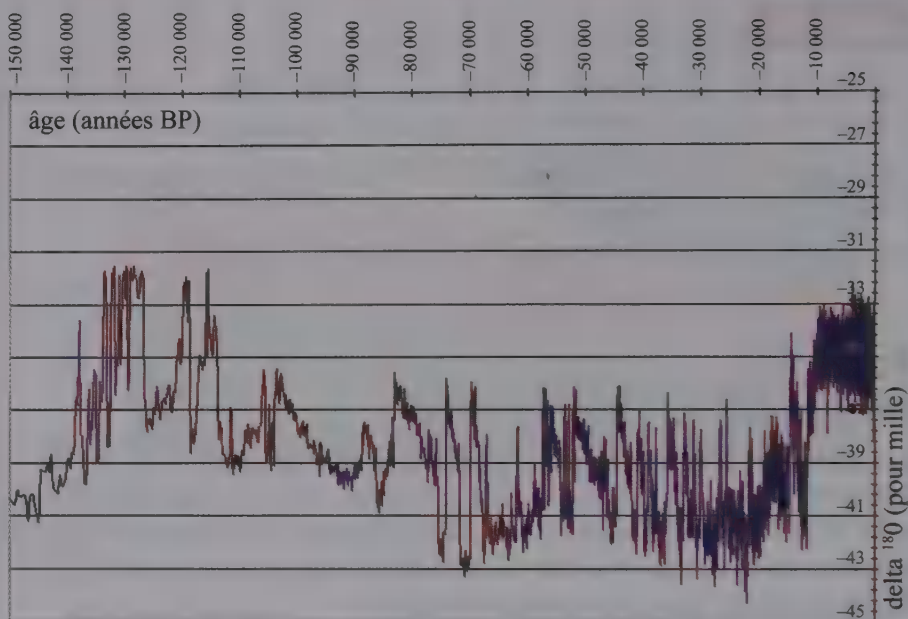


Figure 19.10 – Graphique du $\delta^{18}\text{O}$ de la glace en fonction du temps

- b** Document de référence : Graphe (Jouzel, 1994) présentant une corrélation entre le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations et la moyenne annuelle des températures au Groenland et en Antarctique

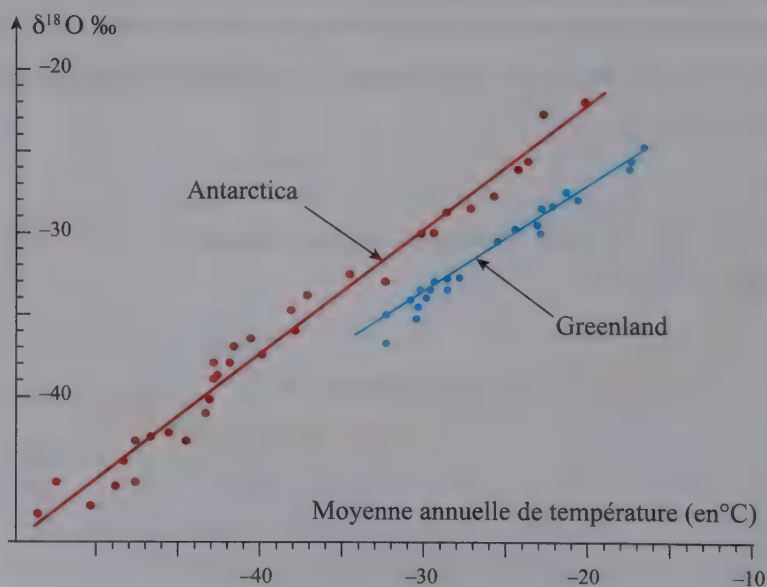


Figure 19.11 – Graphique montrant la corrélation entre le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations et la température

Document 2

- a** Evolution du delta ^{18}O dans les tests calcaires des foraminifères (forage ODP-677 réalisé dans les sédiments déposés au fond de l'océan Atlantique – Hémisphère Nord)

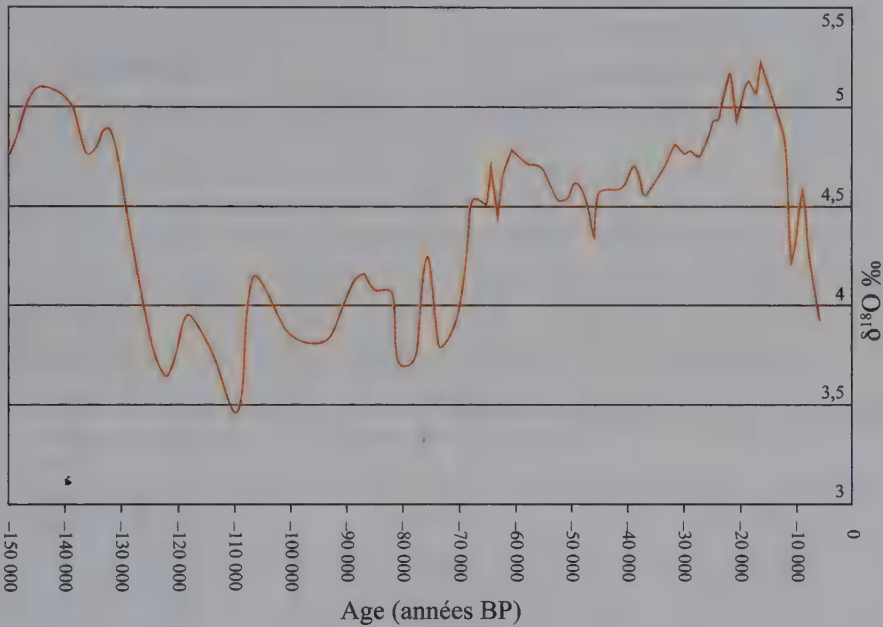


Figure 19.12 – Graphique du delta ^{18}O des tests calcaires en fonction du temps

- b** Information scientifique

Le delta ^{18}O des tests calcaires est un bon indicateur du volume des glaces continentales. La glace des calottes polaires est très appauvrie en ^{18}O par rapport à l'eau de mer dont elle est issue. En période glaciaire, des millions de km^3 de glace sont immobilisées aux pôles, les eaux océaniques se retrouvent donc enrichies en ^{18}O ainsi que les tests calcaires de foraminifères.

Document 3

- a** Diagramme pollinique obtenu au site « Davis Lake » (USA) le long d'une carotte représentative des 25 000 dernières années

Voir la figure page suivante.

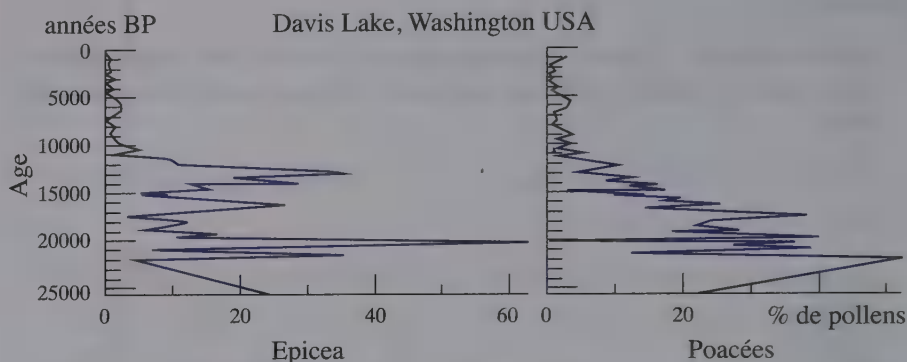


Figure 19.13 – Diagramme pollinique au site « Davis Lake »

b Document référent : Exigences climatiques de quelques taxons

Noms latins	Noms familiers	Exigences climatiques
Quercus	Chêne	Tempéré à chaud
Alnus	Aulne (famille des peupliers)	Humide et tempéré
Betula	Bouleau	Tempéré à froid
Cyperaceae	« Herbes des marécages »	Froid
Poaceae	Poacées (=Graminées)	Froid et sec
Picea ; Tsuga	Famille de l'épicéa, du mélèze.	Froid et sec

Tableau 19.1 – Exigences climatiques de quelques espèces

Corrigés

Partie I

Introduction

Les végétaux sont soumis à une contrainte majeure qui est leur absence de mobilité. Ils sont donc dépendants de leur environnement immédiat : leur environnement physico-chimique (conditions climatiques, disponibilité du sol en eau et en ions minéraux, quantité de lumière et de CO_2 de l'air leur parvenant) et leur environnement biologique (prédateurs, parasites, concurrents pour les ressources, individus de la même espèce pour la reproduction). On cherche à identifier les différentes contraintes pesant sur ces organismes et à les relier à des caractéristiques présentées par les végétaux. On présentera sous forme d'un tableau les contraintes et caractéristiques associées du point de vue de la nutrition, de la protection et de la reproduction des végétaux.

Voir le tableau page suivante.

Fonctions	Contraintes à surmonter à cause de la vie fixée	Adaptations des végétaux en relation avec les contraintes	
Nutrition	Se procurer des éléments nutritifs dans un espace limité et en concurrence avec d'autres végétaux.	Développement de grandes surfaces d'échanges.	
	Capter suffisamment de lumière malgré l'éventuelle présence d'ombre (autres végétaux...).	Grande surface des feuilles.	
	Faire arriver les éléments nutritifs sur le lieu de leur utilisation.	Présence de tissus conducteurs.	
Protection	Variations physico-chimiques du milieu : conditions météorologiques (mauvaise saison trop froide ou trop sèche).	Développement de structures spécialisées permettant de limiter les pertes en eau. Formation d'organes de réserve et de graines, en vie ralentie.	
	Impossibilité d'échapper à des prédateurs et des parasites.	Existence de moyens de défense mécaniques, chimiques et biologiques.	
Reproduction	Gamètes mâles et femelles potentiellement éloignés alors qu'ils doivent se rencontrer pour qu'il y ait fécondation.	Transport des grains de pollen jusqu'au stigmate de la fleur grâce à des agents extérieurs.	
	Dispersion des graines limitée sans intervention extérieure. ---> concurrence des plantules avec la plante mère. Extension de la répartition de l'espèce à de nouveaux milieux impossible sans intervention extérieure.	Transport des graines vers de nouveaux milieux grâce à des agents extérieurs.	

Précisions concernant les adaptations

Feuilles et racines ont une grande surface par rapport à leur volume. Poils absorbants pour les racines qui font entrer l'eau et les ions minéraux.

Stomates¹ de l'épiderme des feuilles qui font entrer le CO_2 .

- Eau et ions minéraux sont transportés dans les vaisseaux du xylème des racines aux feuilles en formant la sève brute.
- CO_2 diffuse de cellule en cellule jusqu'aux cellules chlorophylliennes des feuilles.

- Cuticule imperméable des feuilles.
- Répartition des stomates limitant les pertes de vapeur d'eau : sur la face inférieure de la feuille seulement ou dans des cryptes (oyat).

- Défenses mécaniques : épines par exemple.
- Défenses chimiques : production de tanins qui diminuent la digestibilité des feuilles par exemple (acacia).
- Défenses biologiques : association symbiotique avec des fourmis défendant l'arbre contre les herbivores grâce à la production de nectar (acacia).

Grains de pollen contenus dans l'appareil reproducteur mâle, les étamines : ils contiennent eux-mêmes le gamète mâle.

Ovules contenus dans l'appareil reproducteur femelle, le pistil. L'ovaire du pistil est divisé en plusieurs carpelles contenant les ovules. Chaque carpelle contient plusieurs ovules.

Réunion des gamètes grâce à la pollinisation : transport des grains de pollen jusqu'au stigmate de la fleur :

- transport par le vent (anémogamie) de grains ayant des adaptations comme des ballonnets.
- transport par les animaux de grains (zoogamie) : il existe une coévolution des insectes pollinisateurs et des fleurs (couleur repérable, nectaires contenant du glucose par exemple du côté de la fleur ; poils accrochant les grains, pièces buccales permettant l'aspiration du nectar du côté de l'insecte).

La graine est l'ovule transformé après fécondation.

Dispersion des graines par le vent (anémochorie) grâce à des adaptations comme les aigrettes.

Dispersion des graines par les animaux (zoochorie) : il existe une coévolution des animaux disséminateurs et des végétaux (germination de graine de cactus seulement après passage dans le tube digestif d'un lézard, formation des fruits charnus du cactus aux heures correspondant aux périodes actives du lézard par exemple).

¹ stomates : structures épidermiques formées de deux cellules entourant un orifice appelé ostiole

² coévolution : adaptations conjointes de deux espèces résultant de l'évolution

Conclusion

L'accès aux ressources pour les végétaux est rendu possible par l'existence d'importantes surfaces d'échanges reliées par des vaisseaux conducteurs. L'immobilité de ces organismes les rend vulnérables aux variations de leur milieu et aux attaques biologiques ; ils disposent d'un arsenal de défense leur permettant de survivre. La fécondation et la dissémination des graines sont rendues possibles grâce à des adaptations permettant le transport des grains de pollen et des graines. Les animaux sont très importants dans ces phénomènes et il existe des coévolutions animaux/végétaux.

On peut se demander comment est réalisée l'incorporation des substances nutritives dans la matière organique du végétal dans ses cellules chlorophylliennes.

Partie II

exercice 1

A la différence de la substance P, la morphine est une substance exogène. Son utilisation, très ancienne, permet de lutter contre la douleur. Il s'agit de déterminer le rôle de la substance P dans l'organisme puis d'expliquer l'effet analgésique de la prise de morphine.

Le rôle de la substance P

La partie b du document montre le schéma des relations entre différents neurones. On observe une synapse entre l'extrémité de l'axone du neurone 1 et le corps cellulaire du neurone 2, situé dans la substance grise de la moelle épinière. Le neurone 1 est un neurone en T dont le corps cellulaire se trouve dans un ganglion rachidien et dont l'axone est connecté à un récepteur à la douleur localisé dans la peau.

Le texte d'informations permet de comprendre que le message nerveux qui est transmis du neurone 1 vers le neurone 2, puis acheminé vers le cerveau, est responsable de la sensation de douleur.

Il est indiqué que la substance P est détectée en plus grande quantité au niveau des synapses situées entre les neurones 1 et 2 lors de la stimulation du neurone 1, ainsi que dans les vésicules des boutons synaptiques des neurones 1. On peut en déduire que la substance P est le neuromédiateur impliqué dans la transmission synaptique du message nerveux du neurone 1 vers le neurone 2.

La substance P est donc, dans l'organisme, responsable de la sensation de douleur. Il reste à envisager l'implication de la prise de morphine dans l'atténuation de la douleur.

L'explication de l'effet analgésique de la morphine

La partie b du document montre que l'axone d'un neurone 3, issu de l'encéphale, vient en communication avec l'extrémité du neurone 1 qui s'appuie sur le corps cellulaire du neurone 2. Les neurones 3 libèrent de l'enképhaline qui inhibe la libération de substance P. Autrement dit, les enképhalines libérées par le neurone 3 empêchent la transmission du message nerveux responsable de la sensation de douleur. L'organisme dispose avec ces enképhalines d'un moyen naturel d'estomper la douleur.

Le texte d'informations indique qu'en présence de morphine, la fréquence des potentiels d'action émis par le neurone 2 diminue. C'est donc que la morphine a eu pour effet de freiner la transmission synaptique du message nerveux entre le neurone 1 et le neurone 2.

La partie c du document montre des modèles moléculaires de morphine et d'enképhaline. La forme de la morphine est très semblable à la forme d'une région de l'enképhaline. On peut donc imaginer que la morphine peut exercer la même action que l'enképhaline (probablement en se fixant aux mêmes récepteurs).

Par conséquent, en présence de morphine, la libération de substance P est inhibée à la fois par les enképhalines endogènes et par la morphine exogène. La transmission du message nerveux responsable de la sensation de douleur est donc bloquée, ce qui rend bien compte de l'effet analgésique de la morphine.

La morphine imite un neurotransmetteur naturel, l'enképhaline. À l'instar de l'enképhaline, la morphine inhibe la libération de la substance P, un neurotransmetteur permettant habituellement la transmission du message nerveux responsable de la sensation douloureuse. Cela explique l'effet analgésique de la morphine.

Partie II

exercice 2 (enseignement spécifique)

Introduction : La massif Armoricain est une unité géologique qui a été mise en place durant la période hercynienne, de - 400 à -250 Ma.

On cherche à montrer que le Massif Armoricain présente des caractéristiques d'une ancienne chaîne de montagnes ayant subi des transformations que l'on précisera.

Pour cela, nous étudierons et exploiterons les documents afin de dégager dans un premier temps les éléments qui montrent qu'il s'agit bien d'une chaîne de montagnes. Nous justifierons ensuite le fait que ce soit une ancienne chaîne de montagnes en identifiant les transformations subies.

Montrons que le Massif Armoricain présente des caractéristiques d'une (ancienne) chaîne de montagnes ...

- Sur la carte du document 1, on observe des figures tectoniques particulières : des

chevauchements, qui traversent le massif et s'étendent d'est en ouest. Ces chevauchement de grande ampleur s'observent également dans une chaîne récente comme la chaîne himalayenne : ils sont visibles sur le document 3b.

On sait que cette figure tectonique est un marqueur structural témoignant d'un raccourcissement à l'origine d'un épaissement crustal. Leur mise en place dans un contexte compressif génère des empilements de terrains, à l'origine d'une chaîne de montagnes.

On observe également des gneiss et des migmatites, qui sont des roches métamorphiques. Ces roches qui ont subi un métamorphisme ont été soumises à des conditions de pression et température plus élevées générant des transformations minérales à l'état solide (les minéraux les constituant n'étant plus stables dans les nouvelles conditions). Cela témoigne donc de l'enfouissement d'une roche d'origine continentale et constitue un marqueur pétrographique d'épaississement crustal caractéristique d'une chaîne de montagnes, ici la chaîne hercynienne.

La profondeur de Moho à 40 km constitue une anomalie. En moyenne, la croûte continentale a une épaisseur de 30 km. On observe aussi ce phénomène dans une chaîne récente (document 3b) avec un surépaississement crustal traduit par la présence d'une racine jusqu'à 75 km d'épaisseur. Il existe donc une racine crustale sous le massif armoricain,

Sur le document 1b, on remarque enfin que l'altitude du massif peut atteindre plus de 100 m aux extrémités A et B du profil, mais pas au centre. Il existe donc des reliefs positifs.

- D'après le document 2, dans le Massif Armoricain, on trouve des roches particulières :

- Des micaschistes, qui sont des roches métamorphiques avec des minéraux caractéristiques comme le disthène et le grenat. À l'aide du document 2a, présentant les domaines de stabilité de quelques minéraux, on voit que le disthène et le grenat se sont formés dans des conditions de pression/température assez élevées (30 km de profondeur minimum et entre 300 et 800°C pour le grenat, et 15 km de profondeur et 100 à 600°C pour le disthène). La présence de ces minéraux témoigne du passage de la roche en profondeur en raison de l'épaississement crustal (dont les marqueurs ont été vus dans le doc 1).
- Des migmatites, qui sont des gneiss comportant des zones granitiques formées par fusion partielle du gneiss (roche métamorphique également). On sait que le phénomène d'anatexie, se caractérisant par une fusion partielle, se produit (selon le document 2a) lorsque la roche subit une forte augmentation de température (plus de 700°C). La présence de ces migmatites marque le passage de roches en très grande profondeur là où règnent des températures élevées, ce qui témoigne encore une fois de l'épaississement crustal de la zone armoricaine durant l'orogénèse hercynienne (évoquée dans le doc 1).

... ayant subi des transformations

Les documents 1 et 3 montrent que dans une chaîne de montagnes récente comme la chaîne himalayenne, l'accumulation de sédiments est importante : jusqu'à $1,6 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ à l'actuel. Ces sédiments s'accumulent à la suite d'un transport dans des bassins sédimentaires proches (comme sur le document 3a) depuis les zones élevées de l'Himalaya. Dans le massif Armoricaïn, il existe des roches sédimentaires détritiques. En comparaison avec la chaîne himalayenne, on comprend qu'il y a eu une altération des matériaux de la chaîne de montagnes hercynienne. Ces matériaux se sont accumulés dans des bassins sédimentaires dans un premier temps avant de générer par la suite les roches sédimentaires observables actuellement dans cette même chaîne.

Sur le document 1b, on remarque que l'altitude peut à certains endroits être proche de 0. Ceci est en lien avec l'altitude faible du massif armoricaïn qui a subi depuis la fin de l'orogénèse un important épisode d'érosion contribuant à l'élimination des reliefs.

Sous le Massif Armoricaïn le Moho est à 40 km de profondeur alors qu'il est à 75 km de profondeur sous l'Himalaya. Le massif Armoricaïn a connu lors de son vieillissement une remontée de sa racine crustale. Ceci est en lien avec le réajustement isostatique : la masse de matériel crustal disparu en surface par le jeu de l'érosion est compensée en profondeur par de la masse mantellique plus dense.

Enfin, des failles normales sont observables sur le doc 1a. Ces failles témoignent d'un contexte distensif, caractéristique d'une montagne en cours de démantèlement. Cela conforte le fait que cet ancien massif a subi des transformations à la suite de sa formation.

Conclusion

Nous avons pu démontrer que le Massif Armoricaïn comporte de multiples témoignages d'un épaississement crustal et des signes associés de transformations minéralogiques. Il constitue bien une chaîne de montagnes mise en place durant la période d'orogénèse hercynienne. Aujourd'hui, le contexte n'est plus compressif, ce qui, avec les phénomènes d'érosion, fait diminuer l'altitude de ce massif. Aujourd'hui il est appelé « massif ancien » et se trouve dans cet état grâce à des modifications comme l'érosion et le réajustement isostatique.

Partie II

exercice 2 (enseignement de spécialité)

Introduction

Les géologues subdivisent les temps géologiques en différentes périodes et définissent le Würm comme la période du Quaternaire inscrite entre -120 000 ans et -10 000 ans.

On dispose de trois documents relatifs aux variations du delta ^{18}O dans les glaces

polaires, aux variations du delta ^{18}O dans les tests calcaires de foraminifères constituant les sédiments océaniques, et à des données palynologiques.

À partir des informations tirées de ces documents, on doit retrouver le portrait que la communauté scientifique a établi pour le Würm : une période glaciaire identifiable dans l'hémisphère Nord, caractérisée par une température inférieure de quatre degrés à la température actuelle, et comportant un maximum glaciaire situé il y a 20 000 ans.

Une période glaciaire ...

Le document a montre les variations de l'indice delta ^{18}O mesurées dans des glaces fossiles au cours des 150 000 dernières années au site « grip » situé au Groenland.

On observe une diminution du delta ^{18}O il y a 120 000 ans : la valeur moyenne de -35‰ établie avant $-120\,000$ ans s'abaisse à une valeur moyenne environ -39‰ entre $-120\,000$ ans et $-10\,000$ ans, avec une valeur particulièrement basse (environ -41‰) aux alentours de $-20\,000$ ans. Il y a $10\,000$ ans, la valeur du delta ^{18}O s'est élevée à sa valeur actuelle : environ -35‰ .

Le document b présente des résultats de mesures du delta ^{18}O des précipitations selon la moyenne des températures annuelles.

On observe que l'indice delta ^{18}O est d'autant plus fortement négatif que la température est basse ; la relation unissant ces deux paramètres est linéaire.

Le document 1a mis en relation avec le document de référence 1b montre donc une période plus froide effective entre $-120\,000$ ans et $-10\,000$ ans, encadrée par deux périodes plus chaudes. Il s'agit du Würm, qui représente donc bien la dernière glaciation identifiable au Quaternaire dans l'hémisphère Nord.

... caractérisée par une température inférieure de 4°C à la température actuelle

On peut lire à l'aide de la correspondance donnée par le document 1b qu'au Groenland une diminution du delta ^{18}O de -35‰ à -39‰ (celle observé au Würm) correspond à une diminution de la température de -33°C à -37°C .

L'amplitude de la variation thermique qui caractérise le Würm, par rapport au présent, est donc bien voisine de 4°C .

... avec une apogée (maximum glaciaire) il y a 20000 ans

Le document 2a montre les variations de l'indice delta ^{18}O mesurées dans les tests calcaires des foraminifères au cours des 150 000 dernières années le long d'une carotte sédimentaire forée dans un site situé en Atlantique dans l'hémisphère Nord.

On observe entre $-120\,000$ ans et $-15\,000$ ans une augmentation progressive du delta ^{18}O de $3,7\text{‰}$ à plus de 5‰ , avec une valeur particulièrement élevée aux alentours de $-20\,000$ ans. Depuis $15\,000$ ans, la valeur du delta ^{18}O s'est abaissée à une valeur inférieure à 4‰ .

Il est indiqué dans le document 2b référent qu'en période glaciaire les eaux océa-

niques s'enrichissent en ^{18}O (car ce dernier participe peu à la formation de la glace) ainsi que les tests calcaires de foraminifères.

Une augmentation du delta ^{18}O des tests carbonatés lisible dans les archives sédimentaires est donc la signature de la formation d'un volume important de glace corrélé à une période froide.

Le document 1a mis en relation avec le document de référence 1b permet donc de reconnaître entre -120 000 ans et environ -10 000 ans une période glaciaire, avec un maximum glaciaire situé il y a 20 000 ans. On retrouve bien la représentation que les scientifiques se font du Würm.

Le document 3a présente un diagramme pollinique obtenu au site « Davis Lake » (USA) à partir de sédiments déposés depuis 25 000 ans.

On observe une augmentation du pourcentage de pollens d'Epicea et de Poacées entre 25 000 et environ 20 000 années BP, avec des points culminants à plus de 60% pour les pollens d'épiceas il y a 20 000 années BP et plus de 50% pour les pollens de Poacées il y a 22 000 années BP. Après -20 000 ans la proportion des ces pollens diminue et devient nulle à - 10 000 ans.

Le document référent 3b fournit des renseignements sur les exigences climatiques de végétaux actuels : il est indiqué que les Poacées et l'Epicea sont des espèces qui exigent un climat froid et sec.

En mettant en relation le document 3a et le document de référence 3b, on déduit qu'au cours des 25 000 dernières années l'épisode le plus froid est survenu il y a environ 20 000 ans et a été suivi d'un réchauffement progressif entre - 20 000 et - 10 000 ans. On conforte ainsi un détail de la représentation que les scientifiques se font du Würm : apogée de la période glaciaire il y a 20 000 ans.

Conclusion

Différents indicateurs analysés dans l'hémisphère nord témoignent d'une variation climatique justifiant la définition du Würm. Il s'agit de la diminution de l'indice delta ^{18}O dans les glaces polaires et son augmentation synchrone dans les tests carbonatés ainsi que les modifications brutales des proportions des pollens de différentes espèces.

Ces indicateurs démontrent que le Würm correspond bien à une subdivision du Quaternaire fondée sur la survenue de la toute dernière glaciation, entre 120 000 et 10 000 années BP, et comportant une apogée à 20 000 années BP.





N° d'éditeur – 10199959 – PREPAMATH – MAI 2014.

Imprimé en France par LOIRE OFFSET TITOULET

INTERROS des LYCÉES



✓ Les vrais exos donnés par les profs

- Des centaines d'exercices recueillis dans les lycées de France.
- Des énoncés variés, de difficulté progressive, réellement posés par de vrais professeurs dans de vraies classes.
- Tous les corrigés détaillés.

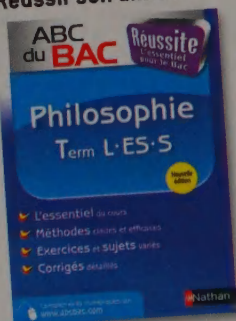


✓ Pour un entraînement efficace en SVT

- Une organisation par thèmes conforme au programme.
- Des rappels de cours synthétiques.
- Des QCM de vérification des connaissances.
- Un minutage pour chaque exercice.
- Des conseils méthodologiques.

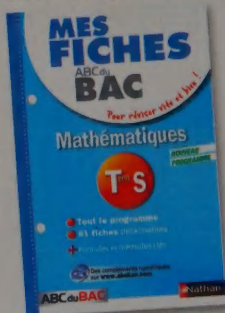
Toute une gamme Nathan pour réviser utile

Réussir son année



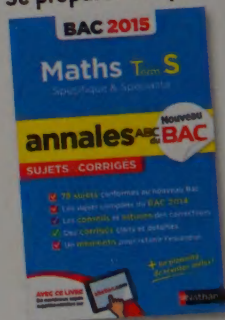
→ **Réussite**
L'essentiel pour le Bac

Réviser rapidement



→ **Mes fiches**
Pour réviser vite et bien

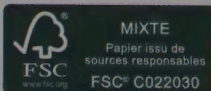
Se préparer à l'épreuve



→ **Annales**
Pour s'entraîner
comme à l'examen

www.abcbac.com

Nathan



ISBN 978-209-188096-9



9 782091 880969