

SVT

Enseignement obligatoire

Terminale S

Résumés de cours
Exercices et contrôles corrigés



collection **Contrôle continu**
dirigée par Pascal Clavier

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

Terminale S

Pierre-Marie BOURLON

Docteur en physiologie
Professeur agrégé au lycée Jean Racine



Seconde

- *Mathématiques*, par C. Cherruau et G. Le Provost, 256 pages
- *Physique-Chimie*, par J.- L. Beaumont, 240 pages
- *Sciences de la Vie et de la Terre*, par Ch. Camara et C. Gaston, 144 pages

Première ES

- *Mathématiques*, par S. Argouin et N. Lemue, 224 pages

Première S

- *Mathématiques*, par M. Barra, 352 pages
- *Physique-Chimie*, par G. Bidault et H. Tellier, 384 pages
- *Sciences de la Vie et de la Terre*, par P.-M. Bourlon, 304 pages

Première STI

- *Mathématiques*, par C. Cherruau et G. Le Provost, 192 pages

Terminale S

- *Mathématiques – enseignement obligatoire*, par E. Chartrain, 400 pages
- *Mathématiques – enseignement de spécialité*, par H. Carnec et R. Seroux, 160 pages
- *Physique-Chimie*, par M. Rouault, J.-M. Desriac et H. Tellier, 432 pages
- *Sciences de la Vie et de la Terre – enseignement obligatoire*, par P.-M. Bourlon, 256 pages
- *Sciences de la Vie et de la Terre – enseignement de spécialité*, à paraître en 2004

Licence Sciences – 1^{re} année

- *Physique – électrostatique, magnétostatique, électrocinétique, optique géométrique*, par P. Clavier et D. Thouroude, 400 pages

ISBN 2-7298-1756-5

© Ellipses Édition Marketing S.A., 2003
32, rue Bague 75740 Paris cedex 15



Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (Art. L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

Avant-propos

Sans être insurmontable, le baccalauréat représente une étape importante (et parfois difficile) au terme du parcours d'un lycéen.

Cet ouvrage, regroupant **résumés de cours, exercices et sujets de type bac**, doit vous aider dans votre préparation. L'enseignement obligatoire y est développé, conformément au nouveau programme.

Il pourra également être utile aux étudiants qui préparent des **concours paramédicaux**, un nombre non négligeable d'exercices de ce livre étant inspiré de tels concours.

Dans votre préparation, quelques conseils vous seront sans doute utiles :

- * C'est une évidence, il faut arriver à l'épreuve en étant correctement préparé. Ce livre ne se substitue pas à votre cours, mais il s'y ajoute. N'hésitez pas à faire (et refaire s'il le faut) les exercices nombreux et variés que nous vous proposons.

- * Pour les exercices de type I : ils représentent à eux seuls la moitié des points de l'épreuve. C'est dire si leur préparation doit être soignée. Première remarque, de simple bon sens, lisez attentivement l'énoncé. Beaucoup de candidats omettent de traiter une partie du sujet ou, au contraire, font du hors-sujet qui, même s'il n'est pas obligatoirement pénalisé en termes de points, est de toutes manières pénalisant par le temps qu'il vous fait perdre.

Délimitez donc bien le sujet et construisez un plan (qui sera apparent, c'est-à-dire dans lequel les différents paragraphes seront bien séparés et, si possible titrés) qui réponde pertinemment à la question posée. Utilisez le vocabulaire scientifique adapté, et n'hésitez pas à faire des schémas (qui doivent être clairs, soignés, légendés, titrés,...).

Soignez l'introduction, qui devra poser le problème scientifique général et présenter la problématique.

Pensez également à la conclusion qui doit montrer que vous avez répondu à la question posée et proposer une ouverture sur d'autres problèmes liés à celui que vous avez traité.

Dans cet ouvrage, de nombreux exercices de type I vous sont proposés, avec commentaires et proposition de plans détaillés.

- * Pour les exercices de type II1, efforcez-vous de vous en tenir au document proposé. Les connaissances, si elles servent à la compréhension du document, ne doivent en aucun cas être exposées dans un exercice de ce type. On ne vous demande pas d'analyser le document dans son ensemble, mais d'y trouver des informations permettant de répondre à la question posée.

- * Pour les exercices de type II2, il faut analyser avec soin les documents, dans l'optique du problème scientifique que vous avez à résoudre. Un document ne doit pas s'analyser « pour le plaisir », ni pour lui-même, mais en gardant à l'esprit que l'on doit en tirer des informations pertinentes pour la résolution du problème. Une synthèse permettra de mettre les documents en relation, et

apporter, si nécessaire des connaissances qui viendront compléter les documents, s'ils ne sont pas suffisants. En aucun cas cela ne doit être une restitution de connaissances. Vous devez montrer que vous maîtrisez la communication et le mode de raisonnement scientifique (n'oubliez pas que vous présentez un bac scientifique).

* Dans tous les cas, soignez la présentation, l'orthographe, la syntaxe (vos phrases ne doivent pas être ambiguës ou, pire, incompréhensibles). Pensez, lorsque vous estimez avoir résolu le problème qui vous est posé, à relire la question, pour bien vérifier que vous n'avez pas oublié de traiter une partie de la question.

* Ne vous précipitez pas sur votre copie pour rédiger dès que vous avez eu en main l'énoncé. Prenez le temps de réfléchir. La rédaction ne doit faire que terminer votre travail. Le plus gros aura déjà été fait au brouillon et dans votre tête. Vous n'êtes pas noté en fonction du nombre de feuilles que vous rendez, mais en fonction de la qualité scientifique et rédactionnelle de votre copie.

* Enfin, apprenez à bien gérer votre temps. Les exercices qui vous sont proposés dans ce livre sont accompagnés d'un temps indicatif de résolution. Une approximation habituellement retenue est de considérer qu'il faut compter 10 minutes pour chaque point. Ainsi l'exercice I doit vous prendre environ 100 minutes, l'exercice II1, 40 minutes et l'exercice II2, 60 minutes. Cela vous laisse encore environ 10 minutes pour relire votre copie et vérifier une dernière fois que rien n'a été oublié. Ces temps sont, bien sûr, indicatifs et ne doivent pas nécessairement être pris au pied de la lettre, mais ils donnent une bonne base de travail.

Si vous êtes correctement préparés, le baccalauréat ne devrait pas vous poser de problèmes. Ce n'est pas une sanction, c'est un examen destiné à vérifier vos compétences. Si celles-ci sont acquises, il n'y a aucune raison pour que l'épreuve ne se déroule pas bien.

Bon courage...

■ Sommaire ■

Chapitre 1.	Approche du temps en Biologie et Géologie	7
Chapitre 2.	La mesure du temps dans l'histoire de la Terre et de la Vie	17
Chapitre 3.	Couplage des événements biologiques et géologiques au cours du temps.....	57
Chapitre 4.	La convergence lithosphérique et ses effets	90
Chapitre 5.	Parenté entre êtres vivants actuels et fossiles- Phylogénèse-Evolution	124
Chapitre 6.	Procréation.....	154
Chapitre 7.	Stabilité et variabilité des génomes et évolution	199
Chapitre 8.	Immunologie	231

Approche du temps en Biologie et Géologie

Quel point commun peut-il exister entre un homme et une chaîne de montagnes ? A priori, il faut le reconnaître, on ne voit pas grand-chose, hormis le fait qu'ils soient tous deux constitués d'atomes.

Et pourtant, le point commun est fondamental. En effet, ces deux structures sont les produits du temps. La montagne et l'homme ont une histoire. Ils sont les témoins de cette histoire, biologique et géologique, qui affecte la Terre, et ils portent en eux les indices permettant de reconstituer cette histoire.

Cette histoire peut être décrite à différentes échelles. On peut, en cherchant bien, remonter à la formation de la Terre ($-4,5$ Ga), pour reconstituer l'histoire de la montagne et des roches qui la constituent, mais on peut tout aussi bien ne tenir compte que de l'époque de sa formation (quelques dizaines de millions d'années dans le cas des Alpes par exemple), ou bien encore, à une échelle de temps plus réduite, considérer les forces qui la sculptent, tels les glaciers, dont l'effet érosif se mesure en dizaines ou centaines d'années. Enfin, l'histoire de la montagne peut être décrite à une échelle de l'ordre de la minute si l'on tient compte du dernier éboulement d'une falaise qui vient de se produire.

Il en est de même pour l'histoire humaine, qui peut être décrite à des échelles de temps très variées. L'homme est le produit de l'évolution biologique, qui a débuté il y a environ $3,8$ Ga avec l'apparition de la vie sur Terre. Mais on peut ne faire remonter l'histoire de l'homme qu'à l'apparition des premiers mammifères (-250 Ma environ), ou des premiers représentants du genre *Homo* ($-2,5$ Ma). En réduisant un peu l'échelle d'observation, on peut reconstituer l'histoire d'un homme en partant du moment de la fécondation qui a permis sa formation, et on le voit se développer durant neuf mois. Enfin, l'histoire de l'homme peut également être étudiée à l'échelle de ses molécules, dont certaines ne vivent que quelques fractions de secondes, impliquées dans le métabolisme qui assure la vie et le fonctionnement de l'individu.

Le temps est une donnée fondamentale pour l'étude de la biologie et de la géologie, les phénomènes décrits et expliqués par ces disciplines se déroulant dans le temps et l'histoire. Les ordres de grandeur sont extrêmement variables. Du fait de cette variabilité, ce qui paraît stable à une échelle (un homme, une montagne, ne changent apparemment pas en quelques minutes) ne l'est pas nécessairement à une autre échelle (un homme change d'année en année, c'est beaucoup moins perceptible pour la montagne ; en revanche, si l'on considère des durées de l'ordre du million

d'années, on voit des changements dans la morphologie de la montagne et dans la morphologie de l'homme, voire de ses ancêtres évolutifs). La stabilité n'est qu'apparente et l'une des difficultés à surmonter pour aborder ces problèmes de temps est donc de bien préciser à quelle échelle on se place pour pouvoir apprécier la dynamique de ces phénomènes.

L'ensemble du programme de terminale scientifique est basé sur cette notion de temps. Vous aborderez le temps avec la formation des chaînes de montagnes, avec l'évolution des climats, avec l'évolution des espèces (l'homme y compris), avec le développement embryonnaire, avec les réactions immunitaires, avec les réactions métaboliques...

Au cours de cette année, vous aurez à maîtriser des dates et des durées, mais vous aurez aussi à réfléchir sur la pertinence des notions de temps qui seront abordées. Comment reconstituer la chronologie d'événements anciens ? Comment évaluer la durée d'un phénomène qui s'est produit il y a un milliard ou un million d'années, et comment être sûr de sa datation ? Quelles sont les techniques employées pour dater des événements datant de millions d'années et quelles sont les techniques permettant d'apprécier des durées de quelques nanosecondes ? Ces techniques sont-elles fiables ?

Que nous enseignent les études qui sont ainsi faites, sur une aventure biologique et géologique qui nous concerne forcément puisqu'elle nous permet de retracer, d'une certaine façon, notre histoire.

Voilà le vaste, mais passionnant programme auquel vous allez être confrontés cette année.

► Énoncés des exercices ◄

■ Exercice 1 (45 min)

Retrouvez, en complétant le tableau ci-après, dans vos livres de cours, dans des encyclopédies, sur internet,..., les dates approchées des événements suivants. Placez-les ensuite sur une frise à l'échelle, l'axe des temps pouvant être morcelé.

Formation de la Terre		Premiers métazoaires	
Premiers mammifères		Premiers poissons	
Premiers Homo		Dernière pangée	
Découverte de Lucy		Premiers eucaryotes	
Apparition de la photosynthèse		Apparition de la vie sur Terre	
Découverte du VIH		Disparition des dinosaures	
Début de formation des Alpes		Apparition de l'oxygène atmosphérique	

■ Exercice 2..... (15 min)

Si l'on assimilait le temps écoulé depuis la formation de la Terre à une année (formation de la Terre au cours de la nuit du 31 décembre au 1 janvier, à minuit), à quelle date se seraient produits les événements suivants (dont vous retrouverez les dates approximatives dans vos livres, encyclopédies...) ?

- Apparition de la vie
- Premières cellules eucaryotes
- Premiers vertébrés
- Crise Crétacé/Tertiaire
- Premiers australopithèques
- Premiers Homo
- Découverte de l'ADN.

■ Exercice 3..... (30 min)

Après avoir trouvé dans diverses sources les durées correspondant aux phénomènes suivants (valeurs moyennes approchées), vous les classerez dans l'ordre de durée décroissante et vous reporterez ces valeurs sur un graphique.

Mitose animale		Réplication de l'ADN chez un eucaryote	
Rotation terrestre sur son axe		Trajet de l'œuf fécondé de la trompe à l'utérus, chez l'Homme	
Présence des ammonites sur Terre		Présence des australopithèques sur Terre	
Surrection et érosion d'une chaîne de montagne		Demi-vie du carbone 14	
Grossesse dans l'espèce humaine		Durée d'un cycle menstruel	

■ Exercice 4..... (30 min)

Imaginons une cellule eucaryote se divisant à un rythme de une division par 24 heures. Imaginons également une cellule procaryote se divisant à un rythme de une division toutes les demi-heures (valeurs moyennes pour l'un et l'autre de ces types cellulaires).

1. Rappelez les ressemblances et différences fondamentales existant entre cellule eucaryote et procaryote. Dans quel ordre ces cellules sont-elles apparues sur Terre ?
2. Soit une culture cellulaire eucaryote contenant initialement un million de cellules. Soit d'autre part, une culture cellulaire procaryote contenant

initialement une cellule unique. Les deux types cellulaires sont mis en culture simultanément. Déterminez graphiquement à quel moment les deux cultures contiendront le même nombre de cellules.

Combien de cellules seront théoriquement présentes dans chaque milieu au bout de 5 jours ?

3. Considérons à présent une paramécie (organisme unicellulaire eucaryote) subissant une division toutes les douze heures. Admettons que la masse d'une telle cellule soit 10^{-7} g. On place en culture une paramécie unique. Quelle sera la masse théorique de cellules formées au bout de 24 heures ? Quelle sera cette masse au bout de 7 jours ? Quelle sera cette masse théorique au bout d'un mois de 30 jours ?

► Corrigé des exercices ▼

Corrigé 1

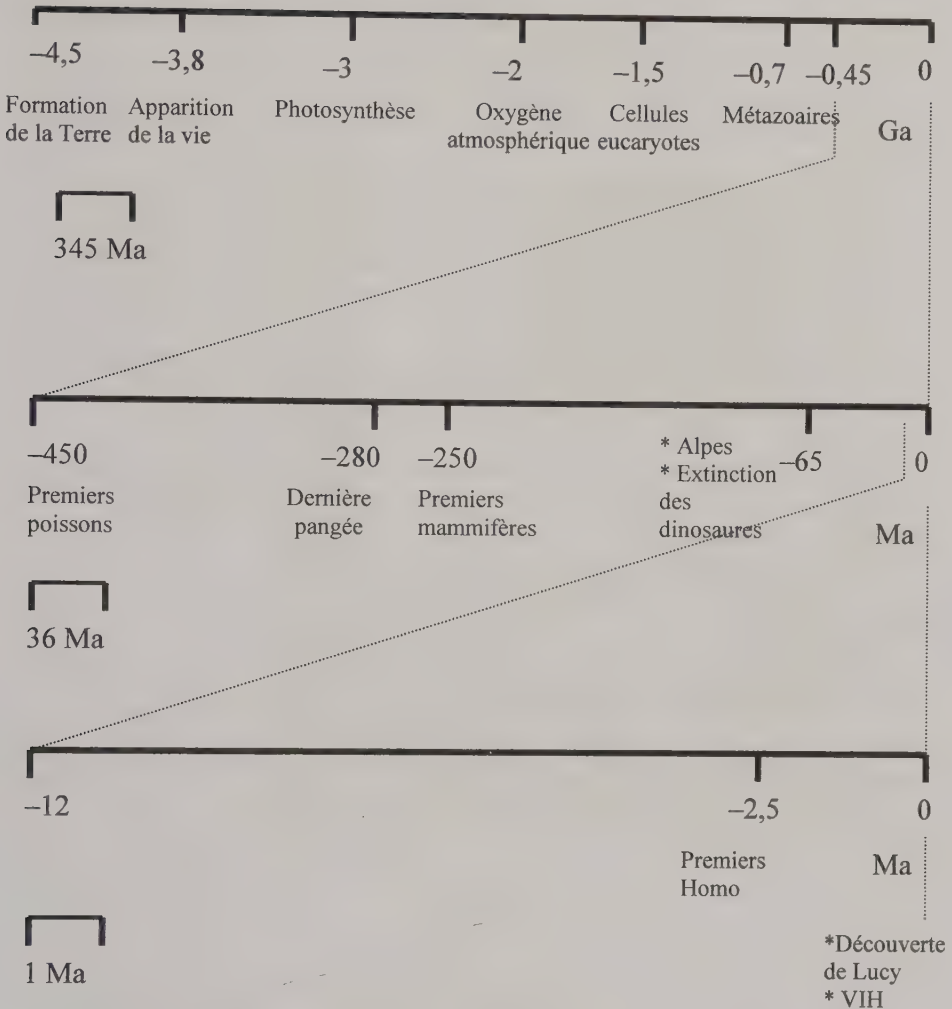
Les dates approximatives correspondant aux événements présentés sont :

Formation de la Terre	−4,5 Ga	Premiers métazoaires	−0,7 Ga
Premiers mammifères	−250 Ma	Premiers poissons	450 Ma
Premiers Homo	−2,5 Ma	Dernière pangée	280 Ma
Découverte de Lucy	1974	Premiers eucaryotes	−1,5 Ga
Apparition de la photosynthèse	− 3Ga	Apparition de la vie sur Terre	−3,8 Ga
Découverte du VIH	1983	Disparition des dinosaures	−65 Ma
Début de formation des Alpes	−65 Ma	Apparition de l'oxygène atmosphérique	−2 Ga

1 Ga = 1 Giga années = 1 milliard d'années

1 Ma = 1 Mega années = 1 million d'années

Il est évident que ces dates sont d'ordres de grandeur très divers et il est particulièrement difficile, sinon impossible de les faire apparaître sur un unique axe des temps de longueur raisonnable. En revanche, puisqu'on peut fractionner l'axe des temps, il est possible de faire plusieurs axes, chaque axe étant l'agrandissement d'une portion de l'axe précédent.



Frise chronologique présentant quelques événements marquants de l'histoire de la vie et de la Terre

(*Aux échelles utilisées, les deux derniers événements sont encore très proches et non séparés).

Corrigé 2

Si **une année** de 365 jours correspond à une durée de **4,5 milliards d'années** (4500 millions d'années), alors **un jour** correspond à $4500/365 = 12,3$ **millions d'années**. Une **heure** correspond alors à $12,3/24 = 0,513$ **million d'années**, soit environ **510000 ans**. Une **minute** équivaut donc, à cette échelle, à $510000/60 = 8500$ **ans** et une **seconde** correspond finalement à $8500/60 = 141,7$ **ans**.

En prenant cette échelle de temps (formation de la Terre le premier janvier à minuit), les événements cités se seraient produits :

- Apparition de la vie (–3,8 Ga) : le **25 février** en fin de journée.
- Premières cellules eucaryotes (–1,5 Ga) : le **premier septembre** en fin de journée.
- Premiers vertébrés (–0,5 Ga) : le **21 novembre** en début de journée.
- Crise Crétacé/Tertiaire (–65 Ma) : le **25 décembre** en fin de journée.
- Premiers australopithèques (–4 Ma) : le **31 décembre vers 16 h 10**.
- Premiers Homo (–2,5 Ma) : le **31 décembre vers 19 heures et 6 minutes**.
- Découverte de l'ADN (1953) : le **31 décembre, dans le dernier tiers de la dernière seconde de la journée**.

A cette échelle, la terre semble très dynamique (ce qu'elle est réellement à l'échelle des temps géologiques) et les phénomènes biologiques et géologiques se déroulent à une vitesse folle !...

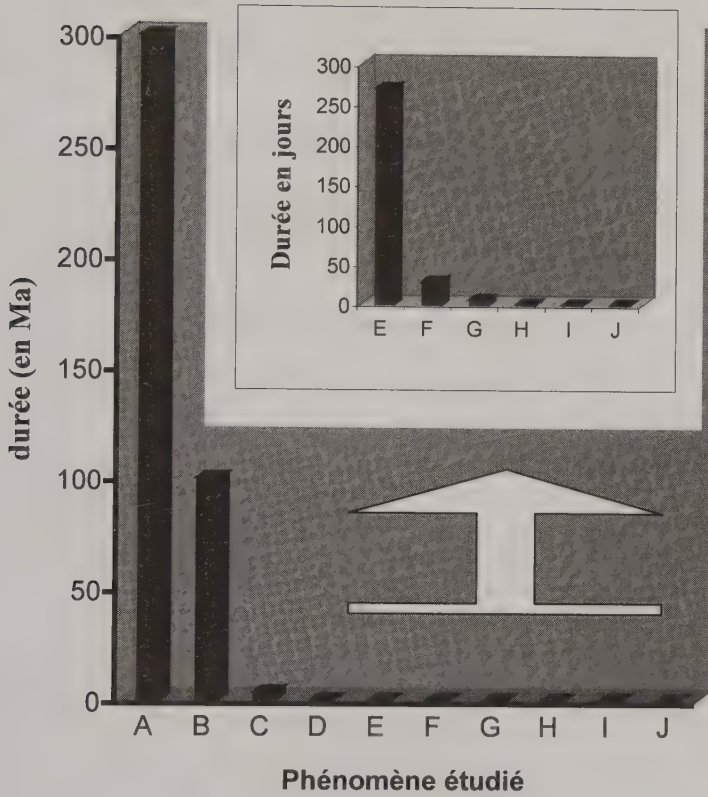
Corrigé 3

Les durées des phénomènes présentés sont (approximativement) :

Mitose animale	1 heure	Réplication de l'ADN chez un eucaryote	6 heures
Rotation terrestre sur son axe	24 heures	Trajet de l'œuf fécondé de la trompe à l'utérus, chez l'Homme	6 jours
Présence des ammonites sur Terre	300 millions d'années	Présence des australopithèques sur Terre	3 millions d'années
Surrection et érosion d'une chaîne de montagne	100 millions d'années	Demi-vie du carbone 14	5870 ans
Grossesse dans l'espèce humaine	9 mois	Durée d'un cycle menstruel	28 jours

Après avoir classé dans l'ordre ces différentes durées, nous constatons, là encore, qu'il est impossible de représenter l'ensemble sur un graphique ne comportant qu'une unique échelle. Le graphique est donc subdivisé, de manière à rendre plus apparentes ces diverses durées.

Représentation de quelques durées

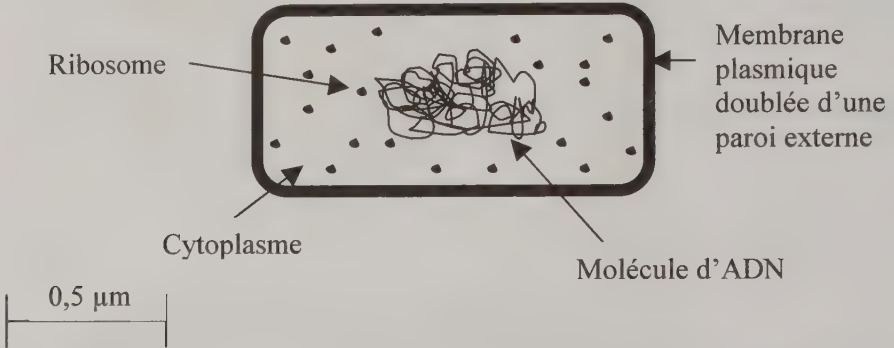


- A : Présence des ammonites sur Terre
- B : Surrection et érosion d'une chaîne de montagne
- C : Présence des australopithèques sur Terre
- D : Demi-vie du carbone 14
- E : Grossesse dans l'espèce humaine
- F : Durée d'un cycle menstruel
- G : Trajet de l'œuf fécondé de la trompe à l'utérus, chez l'Homme
- H : Rotation terrestre sur son axe
- I : Réplication de l'ADN chez un eucaryote
- J : Mitose animale.

Là encore, même si plusieurs échelles sont adoptées, la diversité est telle qu'il reste difficile de différencier certains phénomènes.

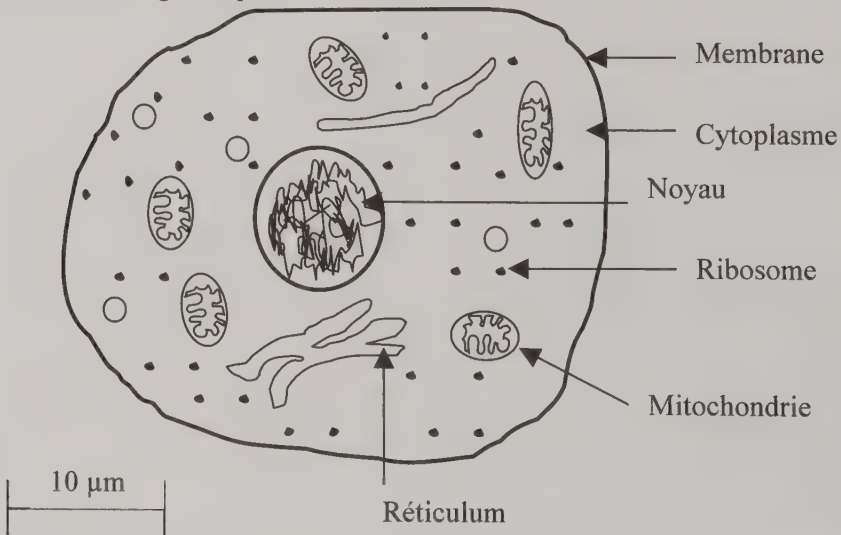
Corrigé 4

1. Les cellules procaryotes sont apparues il y a environ 3,8 Ga. De taille restreinte (de l'ordre du micromètre), ces cellules sont non compartimentées. Elles ne possèdent pas d'organite intracellulaire et pas de noyau. Leur matériel héréditaire se trouve sous forme d'un unique « chromosome » baignant dans le cytoplasme.



Une cellule procaryote : exemple, une bactérie en bâtonnet (les ribosomes sont volontairement grossis pour être visibles et leur nombre réduit pour ne pas encombrer le schéma).

Les cellules eucaryotes sont apparues plus tardivement au cours de l'évolution (–1,5 Ga environ). Elles sont de taille plus importante (de l'ordre de la dizaine de micromètres) et sont compartimentées. Cela signifie qu'elles possèdent des organites intracellulaires tels que mitochondries, réticulum... Elles possèdent en particulier un noyau dans lequel est enfermée l'information génétique, sous forme d'ADN.



Une cellule eucaryote animale (cf. ci-dessus remarque concernant les ribosomes).

2. Il convient, pour la représentation graphique des courbes de croissance des deux types cellulaires, de trouver un mode d'expression de cette croissance qui puisse convenir dans les deux cas. Il faut trouver un même axe des abscisses pour les deux courbes.

Dans le cas de la cellule eucaryote, le rythme de divisions est d'une division toutes les 24 heures. Si l'on schématise les événements, il se produira :



Autrement dit, à chaque période de 24 heures, le nombre de cellules double et ce nombre est donc, à chaque instant $10^6 \times 2^n$, n étant le nombre de périodes de 24 heures qui se sont écoulées depuis la mise en culture de 10^6 cellules.

Au départ (à $t = 0$) : $10^6 \times 2^0 = 10^6$ cellules ; après 24 heures : $10^6 \times 2^1 = 2 \cdot 10^6$ cellules ; après 48 heures : $10^6 \times 2^2 = 4 \cdot 10^6$ cellules...

Dans le cas de la cellule procaryote, le rythme de divisions est d'une division toutes les demi-heures. Si l'on schématise les événements, il se produira



Autrement dit, à chaque $\frac{1}{2}$ heure, le nombre de cellules double et le nombre de cellules est donc à chaque instant 2^m , m étant le nombre de périodes de $\frac{1}{2}$ heures qui se sont écoulées depuis la mise en culture d'une unique cellule. Il y a 48 périodes de $\frac{1}{2}$ heure dans une journée de 24 heures. Le nombre de cellules peut donc également s'exprimer 2^{48n} , n étant, comme précédemment, le nombre de périodes de 24 heures écoulées depuis la mise en culture.

Au départ ($t = 0$) : $2^0 = 1$ cellule ; après $\frac{1}{2}$ heure $2^1 = 2$ cellules ; après 1 heure $2^2 = 4$ cellules, ...

Nous avons donc à présent deux équations de courbes, toutes deux en fonction du nombre n de jours écoulés depuis la mise en culture.

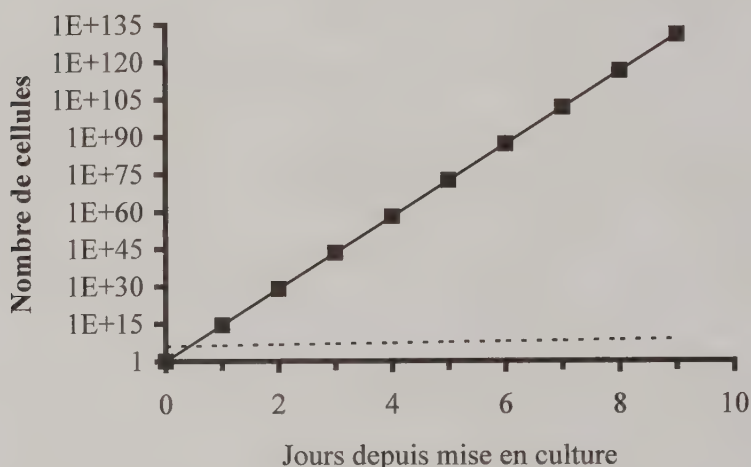
Les graphiques sont présentés ci-après. L'axe des ordonnées est un axe logarithmique, la croissance bactérienne s'effectuant à grande vitesse, on en arrive rapidement à utiliser les puissances de 10.

La résolution graphique du problème posé (à quel moment la population bactérienne excède-t-elle la population de cellules eucaryotes ?) revient à déterminer graphiquement le point d'intersection des deux droites.

Ce point est très rapidement atteint, en moins d'une journée les deux populations cellulaires se rejoignent. Une analyse un peu plus fine nous donne un délai d'environ 9 heures entre le début de la culture et le moment où les cellules procaryotes sont en nombre aussi important que les cellules eucaryotes, alors que celles-ci étaient initialement 1 million de fois plus

nombreuses. La vie ne « se passe » pas à la même vitesse pour les deux types cellulaires.

Croissance des populations cellulaires



Croissance des populations de cellules mises simultanément en culture.

En trait plein : cellules procaryotes, en pointillés : cellules eucaryotes.

Remarque : $1E+14 = 1.10^{14}$.

Au bout de cinq jours, il y aura, dans la culture de cellules eucaryotes 2^5 cellules, soit 32 millions. Dans la culture procaryote, il y aura alors 2^{240} , soit $1,77.10^{72}$ cellules.

3. Le principe du calcul est le même que précédemment. Le nombre de cellules double après chaque période de 12 heures. Le nombre de cellules est donc 2^{2n} , où n est le nombre de jours écoulés depuis la mise en culture. On multiplie ensuite ce nombre de cellules par la masse d'une cellule (que l'on imagine voisine de 10^{-7} g ici).

Au bout de 12 heures, il y aura deux paramécies, et, au bout de 24 heures, il y en aura quatre, soit une masse de 4.10^{-7} g.

Après 7 jours de culture, nous aurons dans le milieu 2^{14} cellules, soit une masse de $1,64.10^{-3}$ g.

Après 30 jours de culture, le nombre de cellules sera 2^{60} , soit une masse théorique de cellules légèrement supérieure à $1,15.10^{11}$ g, c'est-à-dire plus de 115 000 tonnes !

Il s'agit évidemment d'une masse théoriquement atteinte... Encore faudrait-il avoir donné suffisamment de nourriture à ces cellules pour que la croissance se passe effectivement ainsi et qu'elles disposent de suffisamment de place dans le milieu.

■ 2 ■

La mesure du temps dans l'histoire de la Terre et de la Vie

Le chapitre précédent nous a permis de voir que l'état actuel de la planète Terre et des diverses formes de vie qu'elle porte, est le résultat d'une longue histoire, initiée au moment de la formation de la Terre ($-4,5$ Ga) et au moment de l'apparition de la vie ($-3,8$ Ga). Cette histoire est jalonnée d'étapes importantes qu'il faut pouvoir replacer dans l'ordre chronologique et dater avec précision. C'est à cette condition que l'on pourra retracer l'histoire géologique et biologique de la Terre.

Quelles sont les méthodes utilisées dans la reconstitution de cette histoire et quelle est leur fiabilité ?

LA CHRONOLOGIE RELATIVE

Le but de la chronologie relative est de replacer des événements les uns par rapport aux autres. Il s'agit d'utiliser des « relations d'ordre » pour situer des objets géologiques, des êtres vivants ou des phénomènes les uns par rapport aux autres, sans pour autant leur donner un âge précis. Il ne s'agit donc pas de donner aux événements un âge précis, mais de parvenir à une chronologie du type : A s'est produit avant B, qui s'est produit avant C, etc.

Dans le domaine de la géologie, ceci va pouvoir se faire grâce à l'étude de la disposition et de la géométrie des terrains à dater. Quelques grands principes, très simples à exprimer, sont utilisés.

► Principe de superposition

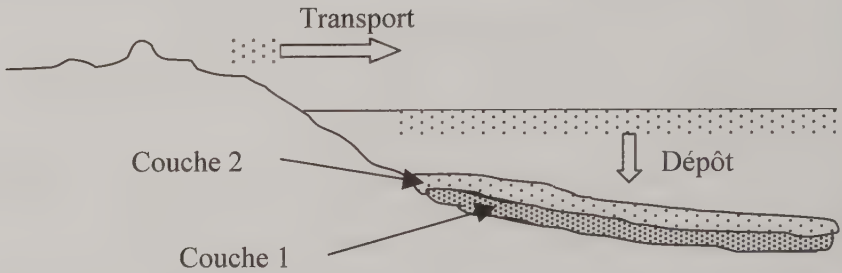
Une couche sédimentaire (ou une coulée de lave, où un édifice volcanique) est postérieure à la couche (ou la coulée, ou l'édifice volcanique) qu'elle recouvre, et antérieure à celle qui la recouvre. Autrement dit, plus on va profond, plus on remonte le temps.

Ce principe est fondé sur le mode de formation des roches sédimentaires : la sédimentation se produit, dans des zones calmes (où les agents d'érosion et de transport des particules détritiques sont faibles voire nuls ; la plus grande partie de la sédimentation s'effectue dans le milieu marin), et elle s'effectue sous l'effet de la gravité. Chaque particule sédimentaire tombe donc de haut en bas sur des particules qui sont tombées avant elle. Les

sédiments s'empilent donc de bas en haut au fur et à mesure que le temps passe.

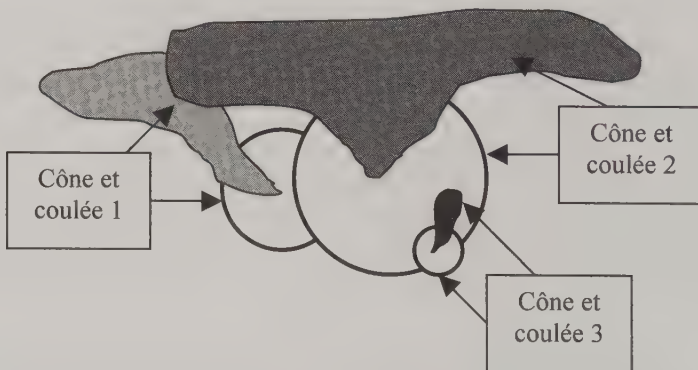
Continent : érosion et transport des particules détritiques

Milieu marin : dépôt des sédiments sous l'effet de la gravité



Le principe de superposition pour des couches sédimentaires déposées en milieu marin. Les sédiments composant la couche 1 se sont déposés avant les sédiments formant la couche 2 et se trouvent donc en dessous.

Nous pouvons noter qu'en général il se produit un granoclassement des particules sédimentaires, c'est-à-dire que les particules les plus légères sont emportées sur une plus grande distance, contrairement aux particules plus lourdes qui ne franchissent pas des distances considérables.

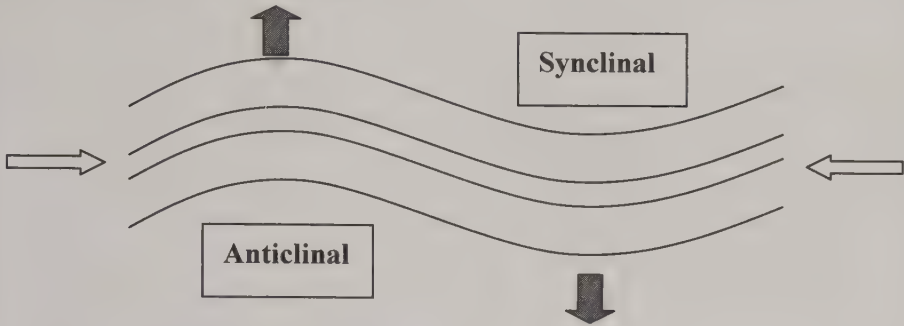


Le principe de superposition appliqué aux coulées de lave (vue de dessus). Le cône volcanique et la coulée 3 se superposent au cône 2 et lui sont donc postérieurs. De même le cône et la coulée 2 se situent sur le cône et la coulée 1 et lui sont également postérieurs. L'ordre chronologique des événements est donc ici volcanisme 1 puis volcanisme 2 et enfin volcanisme 3.

► Principe de recoupement

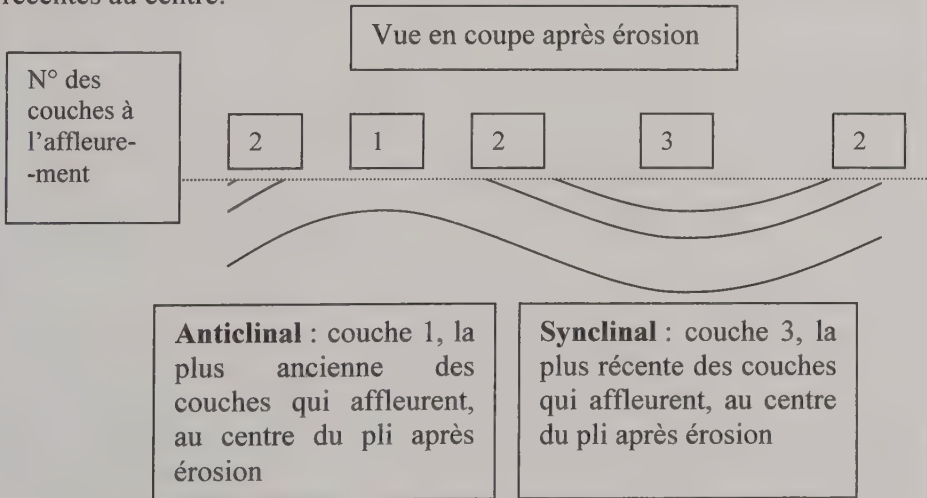
Un événement ayant généré des changements de géométrie des couches (plis) ou un métamorphisme, ou des discontinuités (failles, intrusion magmatique) est postérieur à la formation qu'il affecte.

Cas des plis : les plis sont des déformations de terrain qui témoignent de forces compressives qui ont « appuyé » de chaque côté du terrain étudié et créé des mouvements verticaux.



Formation de plis dans le cadre d'une tectonique compressive (en coupe).
Flèches blanches : forces compressives s'exerçant latéralement. Flèches en gris : mouvement relatif des couches sédimentaires soumises à cette compression.

Nous pouvons noter qu'après érosion, vu de dessus, un anticlinal se caractérise par un affleurement des couches les plus anciennes au centre, alors qu'un synclinal présentera à l'affleurement les couches les plus récentes au centre.



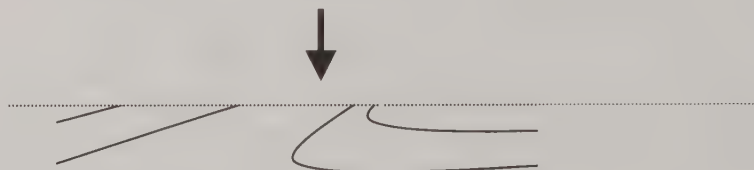
Anticlinal et synclinal après érosion : géométrie des couches à l'affleurement. Les couches ont été nommées 1, 2 et 3 dans l'ordre chronologique de leur formation (couche 1 la plus profonde).

Certains plis sont parfois si marqués que les couches subissent d'intenses modifications de leur géométrie. C'est le cas, par exemple des plis couchés.



En coupe : les importantes forces tectoniques ont comprimé le terrain jusqu'à coucher les strates. Celles-ci sont normalement ordonnées (la plus ancienne en dessous).

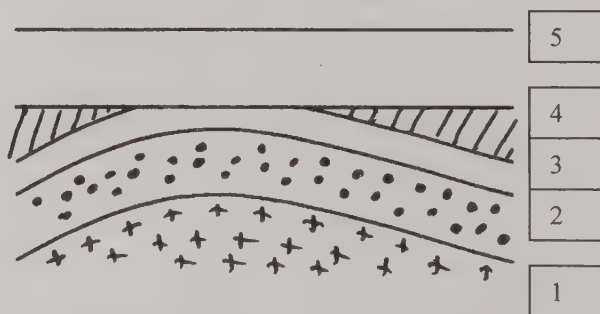
Après intense érosion, la vue en coupe devient :



Un forage effectué au niveau de la flèche noire verticale peut montrer un **agencement inverse des couches**, la plus ancienne étant localement passée au dessus de la plus récente.

Application dans le cadre de la chronologie relative :

Soit un terrain géologique qui, en coupe, se présente de la manière suivante :



Coupe simplifiée d'un terrain géologique.

Nous pouvons constater ici que le plissement affecte les couches 1 à 4, mais qu'il ne touche pas la couche 5. En vertu du principe de recoupement, nous pouvons donc affirmer que le plissement est postérieur à la formation de la couche sédimentaire 4, mais antérieur à la formation de la couche sédimentaire 5.

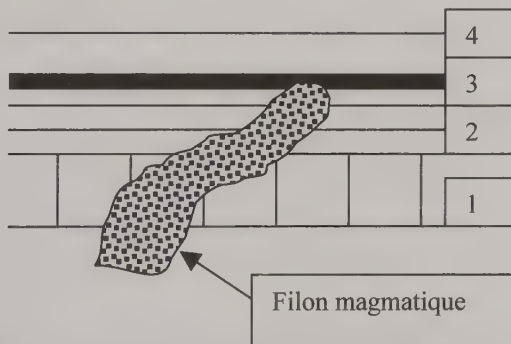
Reconstituons l'histoire géologique de ce terrain. Il y a tout d'abord eu sédimentation des couches 1 à 4, celles-ci étant alors normalement ordonnées, la plus ancienne au dessous. Puis le plissement s'est produit et l'on voit ici un anticlinal. Il y a eu ensuite érosion qui a mis à nu une partie de la couche 3. Enfin, une nouvelle phase de sédimentation, s'est produite,

permettant la mise en place de la couche sédimentaire 5. Nous constatons que cette dernière couche n'est pas dans la continuité géométrique des quatre premières. On dit qu'il y a discordance (= contact anormal) entre les couches 3, 4 d'une part et 5 d'autre part.

L'étude d'un tel terrain peut encore fournir d'autres informations. En effet, si la sédimentation s'est effectuée en milieu marin et si l'érosion s'est produite en domaine continental (cas les plus fréquents), alors entre la formation de la couche 4 et celle de la couche 5 il y a eu : retrait de la mer (régression), érosion hors du milieu marin, puis avancée de la mer (transgression).

L'analyse d'un terrain géologique peut donc se révéler très riche en enseignements concernant l'histoire de ce terrain (et parfois, l'histoire des êtres vivants qui l'ont occupé).

Cas du magmatisme intrusif: Il s'agit de remontées magmatiques (le magma chaud étant moins dense que la roche encaissante). On parle de phénomènes de plutonisme et il y a formation de plutons (en général constitués de granite) ou de filons.



Vue en coupe d'un terrain affecté par une intrusion magmatique.

Dans l'exemple ci-dessus, nous pouvons affirmer, selon le principe de recoupement, que le filon est postérieur aux couches 1, 2 et 3 qu'il recoupe. En revanche, rien ne permet d'affirmer avec certitude (d'après ce que nous en voyons ici), que le filon est antérieur ou postérieur à la couche sédimentaire 4.

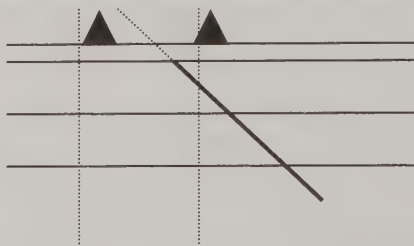
Un indice de terrain supplémentaire pourrait nous aider : en règle générale, lorsqu'un magma remonte dans des terrains géologiques, la température dégagée par ce magma modifie, à l'état solide, les roches pré-existantes (phénomène de métamorphisme de contact).

Une auréole de métamorphisme apparaît au contact du magma intrusif, le degré de métamorphisme étant décroissant à mesure que l'on s'éloigne du magma. Il nous faudrait donc savoir ici si la couche 4 a été métamorphisée (auquel cas l'intrusion magmatique lui est postérieure) ou non.

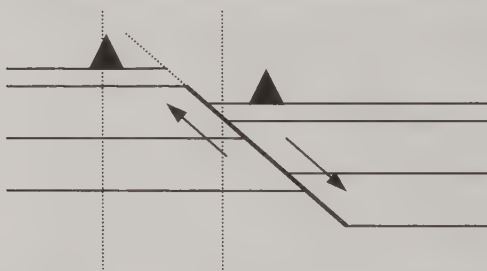
Cas des failles : si les plis témoignent de déformations qui se produisent au sein de terrains relativement ductiles (souples) et capables de subir des déformations, les failles apparaissent lorsque les couches affectées par les mouvements tectoniques sont trop rigides pour pouvoir se déformer. On parle alors de tectonique cassante.

Selon la nature de l'événement tectonique ayant affecté le terrain, on peut rencontrer deux grands types de failles.

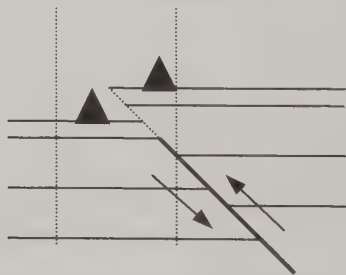
Imaginons une série sédimentaire simple sur laquelle deux petits repères (triangles), ont été placés. Une faille (trait oblique) va affecter le terrain. Les flèches indiquent le déplacement relatif des deux blocs.



Première situation : la tectonique est extensive (cas par exemple du phénomène de rifting). Les repères s'éloignent. La faille est dite normale.



Deuxième situation : la tectonique est compressive (cas des zones de convergence abordées par la suite). Les repères se rapprochent. La faille est dite inverse et il y a chevauchement d'un bloc sur l'autre.



Il est à noter que le principe de recoupement décrit ici dans le cas de roches et de terrains géologiques à grande échelle peut également s'appliquer aux minéraux contenus dans des roches ayant subi des déformations postérieures à la formation des minéraux.

► Principe de continuité

Des marqueurs temporels peuvent être étendus sur une grande surface. Si une couche A a le même toit et le même plancher qu'une couche B, alors on peut affirmer que les couches A et B sont de la même époque. Toutes les couches géologiques formées à la même époque ne sont pas identiques sur toute la surface de la Terre. Les conditions locales de formation (climat, activité géologique, position géographique...) peuvent induire la formation de roches présentant des faciès différents.

► Principe d'identité paléontologique

Fondé sur la reconnaissance de fossiles stratigraphiques. Il permet d'étendre un marqueur temporel lorsque le principe de continuité n'est pas applicable. Si deux couches sont identiques sur le plan des fossiles qu'elles contiennent (identité paléontologique), alors on peut affirmer que ces couches se sont formées en même temps. Une échelle stratigraphique internationale des temps géologiques, basée sur la reconnaissance de fossiles précis, a été établie.

► L'utilisation des fossiles

Les fossiles correspondent à des organismes anciens (ou à des traces d'organismes) qui ont été pris dans les roches au moment de la formation de celles-ci (roches sédimentaires). Au fil du temps, l'organisme pris dans la roche a été minéralisé, ce qui permet sa conservation.

Les fossiles peuvent être utilisés de différentes manières :

- Utilisation des fossiles comme marqueurs de faciès : Les fossiles permettent de déterminer quelles étaient les conditions qui régnaient en un point du globe, au moment de la formation de la roche qui contient le fossile étudié. Cela suppose que l'on admette que les exigences de vie des organismes actuels et fossiles sont les mêmes. C'est le principe d'actualisme. Par exemple, les coraux actuels ne se développent que dans des eaux relativement chaudes, claires, à faible profondeur. Si l'on trouve des coraux fossiles dans une roche, on considère qu'au moment de la formation de la roche, la zone étudiée était recouverte par une mer peu profonde, à une température relativement élevée.

- Utilisation des fossiles comme indicateurs d'orientation : nous avons vu précédemment que, dans certaines conditions tectoniques, l'ordre naturel des roches sédimentaires peut être inversé. Pour s'assurer que la roche étudiée est bien dans sa position initiale, on peut utiliser des fossiles qui marquent l'orientation de la roche. C'est le cas de certains coquillages par exemple, qui se développent verticalement, pointe en bas.

Si, dans une strate sédimentaire, de nombreux exemplaires de fossiles de ces espèces sont retrouvés pointe en haut, il y a fort à parier que la couche a subi une inversion au cours de son histoire.

- Utilisation des fossiles comme marqueurs stratigraphiques : les fossiles sont utilisés ici en tant qu'indicateurs de la période géologique au cours de laquelle la roche s'est formée. Les espèces considérées doivent avoir une

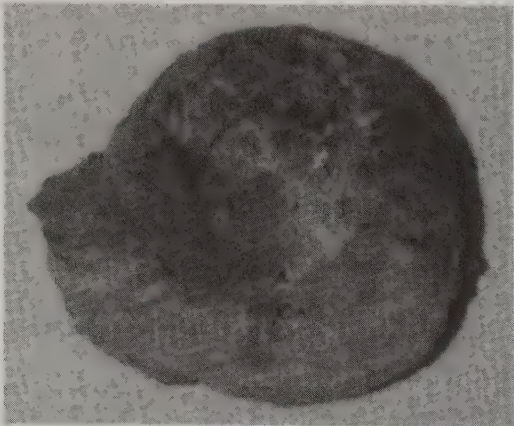
courte durée de vie (cela n'a rien à voir avec la durée de vie des individus eux-mêmes), de manière à ce que des formes variées se soient succédées rapidement dans les temps géologiques. Trouver une espèce précise dans une roche permettra de dire avec une assez bonne précision, l'âge de formation de celle-ci. Les fossiles stratigraphiques permettent d'établir des corrélations à distance et de subdiviser les couches géologiques en strates minces qui correspondent à des périodes courtes. Outre la faible durée de vie des espèces utilisés, les fossiles stratigraphiques doivent être répandus à la surface de la planète (pour pouvoir opérer lesdites corrélations entre divers points du globe) et être assez nombreux pour pouvoir être trouvés dans les couches géologiques sans trop de difficultés.

Les trilobites sont des organismes ayant vécu à l'ère primaire. Ils peuvent servir de marqueurs stratigraphiques de cette période.



Un trilobite : cet animal, cousin des crustacés, vivait dans les mers du globe de l'ère primaire.

Les ammonites, ayant vécu au secondaire et s'étant considérablement diversifiées au cours de cette période (avant de s'éteindre à la limite secondaire/tertiaire) sont de bons fossiles stratigraphiques de l'ère secondaire.



Une ammonite, fossile typique du milieu marin de l'ère secondaire.

L'idéal est de pouvoir utiliser des associations de fossiles, caractéristiques d'une époque géologique donnée, appelée horizon biostratigraphique.

LA DATATION ABSOLUE

Même si, dans certains cas, la chronologie relative permet des repérages très fins, elle ne permet pas de donner l'âge d'un événement. Pour cela, il faut recourir à d'autres méthodes, dites de datation absolue. Ces méthodes sont multiples et il convient de bien choisir, de manière pertinente, la méthode à utiliser, en fonction de l'échantillon à dater.

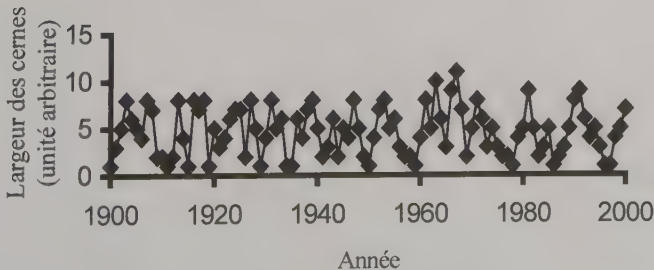
► **La dendrochronologie** (« chronologie des arbres »). Dans nos régions tempérées, présentant des saisons bien marquées, il est facile de vérifier que la croissance des arbres passe par l'élaboration d'anneaux (= cernes) annuels. Un arbre de cent ans présentera cent cernes concentriques, le plus ancien étant le plus au centre. L'épaisseur de ces cernes dépend de l'espèce considérée, ainsi que des conditions environnementales dans lesquelles la croissance s'est déroulée. Pour une espèce donnée, une région donnée, et pour une période donnée, il existe une succession de cernes caractéristiques.



Succession des anneaux de croissance sur un fragment de tronc. A chaque anneau (= cerne) correspond une année. L'arbre présente ici 20 cernes. Il a été abattu à l'âge de 20 ans.

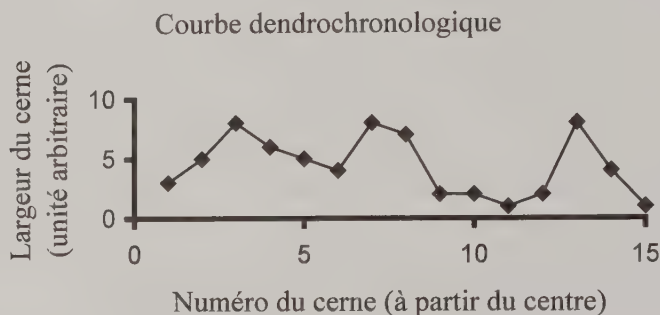
En utilisant la succession des épaisseurs de cernes suivie sur plusieurs années, on aboutit à l'élaboration d'une courbe étalon valable pour une espèce et une région données.

Etalon dendrochronologique



Courbe étalon dendrochronologique : pour une espèce et une région données, on reporte sur ce graphique, la largeur des cernes (anneaux de croissance) d'année en année.

En établissant la succession des cernes d'arbres d'âge inconnu, on établit la séquence de cet arbre, que l'on compare à la courbe étalon, et l'on obtient alors la date d'abattage de l'arbre étudié.



Courbe dendrochronologique effectuée à partir d'écorce d'un arbre dont la date d'abattage est inconnue. On mesure la succession de cernes de cet arbre, que l'on compare à un étalon, tel que présenté ci-dessus. On recherche la zone de correspondance (de superposition) entre l'étalon et la courbe correspondant à l'arbre inconnu. Ici la zone où la correspondance est la meilleure indique une date d'abattage voisine de 1915.

Cette méthode donne des résultats pouvant atteindre la précision d'un an.

Cependant, elle ne peut être utilisée que pour des périodes datant de quelques siècles. De plus, toutes les espèces d'arbres ne peuvent être utilisées (on utilise de manière majoritaire le chêne, le châtaignier, le pin, le cèdre,...).

► La thermoluminescence

Lorsque certains minéraux sont soumis à des rayonnements ionisants, ils sont susceptibles de piéger des électrons. Cette capture d'électrons se fait de manière naturelle, du fait d'une irradiation naturelle assurée par l'environnement de l'objet à dater. Ces électrons piégés peuvent être libérés par chauffage, ce qui s'accompagne d'une émission lumineuse mesurable, proportionnelle à la quantité d'irradiation reçue, elle-même proportionnelle à la radioactivité naturelle de l'environnement de l'objet (dose annuelle = dose d'irradiation reçue chaque année), et du temps passé par l'objet dans cet environnement (âge).

En pratique, les objets à dater doivent avoir subi un chauffage au cours des temps passés (céramique ancienne, poterie cuite, par exemple), ce qui vide les pièges à électrons et provoque donc une mise à zéro du « chronomètre ». L'objet accumule alors une quantité d'irradiation que l'on détermine par un nouveau chauffage en mesurant la quantité de lumière émise. On compare cette quantité de lumière émise à des valeurs étalons.

Cette technique permet de dater des objets datant de quelques centaines à quelques centaines de milliers d'années.

► La radiochronologie

Cette méthode de datation est basée sur la désintégration d'éléments radioactifs (= radioéléments) au cours du temps :

Atome père (P) $\longrightarrow$ Atome radiogénique fils (F) + particule.
A chaque instant, le nombre de désintégrations par unité de temps est proportionnel au nombre d'atomes P présents. Ce nombre diminue, bien sûr, avec le temps. On parle de décroissance radioactive.

Si l'on nomme P_0 le nombre d'atomes pères présents au temps 0, le nombre d'atomes P présents à chaque instant est donné par la formule :

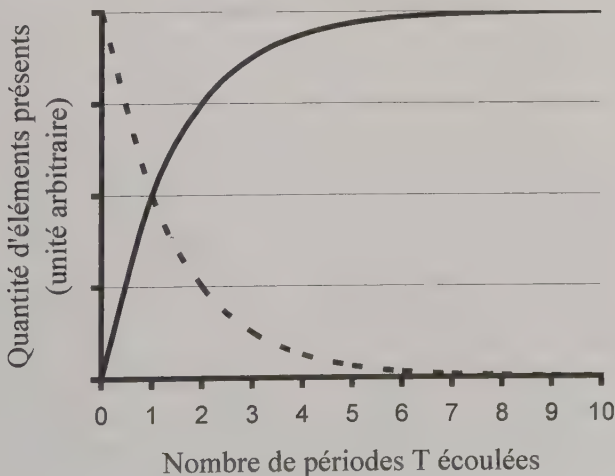
$$P = P_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ et } P_0 = P \cdot e^{\lambda t}$$

Si l'on nomme F_0 , le nombre d'atomes fils présents initialement dans l'échantillon, alors le nombre F d'atomes fils présents à chaque instant est :

$$\underline{F} = F_0 + (P_0 - P) = F_0 + P \cdot (e^{\lambda t} - 1) \approx \underline{F_0} + \underline{P \cdot \lambda t}, \text{ si } \lambda t \text{ tend vers } 0$$

Où λ est la constante de désintégration de l'élément radioactif considéré.

On nomme T, la période radioactive (= période de demi-vie) de l'élément radioactif considéré. Elle correspond au temps qu'il faut pour que diminue de moitié le nombre d'atomes pères dans l'échantillon.



Disparition des éléments pères (tirets) et apparition des éléments fils (trait plein) lors de désintégrations radioactives de période T.

Le tableau ci-dessous indique, pour deux éléments les plus fréquemment utilisés en radiochronologie, la période de demi-vie T et la constante de désintégration λ .

Eléments radioactifs	T (en années)	λ (en an^{-1})
$^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$	49.10^9	$1,42.10^{-11}$
$^{14}\text{C}/^{14}\text{N}$	5370	$1,21.10^{-4}$

L'utilisation des radiochronomètres pour la datation absolue d'échantillons géologiques et/ou biologiques suppose tout un ensemble de conditions et de précautions.

Le radiochronomètre se met en place (temps 0) à la fermeture du système, c'est-à-dire lorsque les échanges entre les constituants du système et l'extérieur cessent (les isotopes sont alors confinés, c'est à dire, en quelque sorte, piégés). L'échantillon à dater ne doit pas être contaminé par la suite.

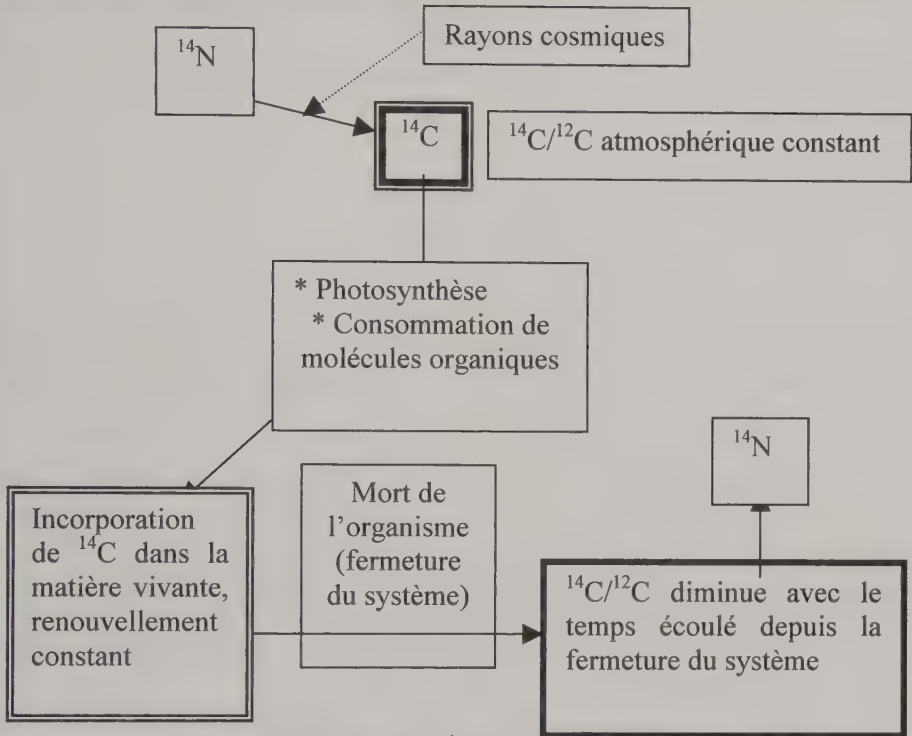
De plus, on admet que la datation que l'on peut effectuer n'est valable que pour des durées mesurées allant du centième de la période radioactive à dix fois cette période.

$$T/100 < \text{date de fermeture du système} < 10.T$$

Parmi les diverses méthodes utilisables, nous pouvons citer :

– *La radiodation au carbone 14* : cet isotope radioactif du carbone est un élément rare naturellement (les plus abondants sont les deux isotopes stables ^{12}C , le plus abondant de tous, et ^{13}C). Le ^{14}C se forme en permanence dans la haute atmosphère, à partir du ^{14}N . Il entre dans la formation du $^{14}\text{CO}_2$ et l'on admet que la proportion de $^{14}\text{CO}_2$ est stable dans l'atmosphère. Les organismes vivants intègrent dans leur tissus du ^{14}C , et la proportion de ^{14}C incorporé est stable tout au long de la vie de l'organisme (rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ constant et connu, il suffit pour cela de mesurer les taux actuels de ces isotopes dans les organismes vivants). La mort de l'organisme correspond à la fermeture du système. A partir de ce moment, le ^{14}C incorporé n'est plus renouvelé et il se désintègre pour former du ^{14}N qui s'échappe du système. La mesure de la quantité de ^{14}C restant dans un échantillon permet alors d'obtenir une estimation de la date de la mort de l'organisme.

Un schéma permet de résumer cela :



Incorporation et disparition du ^{14}C dans un échantillon organique

Si l'on admet qu'au cours des temps géologiques, la concentration de ^{12}C est stable, et en admettant que le rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ n'a pas varié depuis la fermeture du système, l'âge d'un échantillon est donné par :

$$t = \text{Ln} (^{14}\text{C}_{\text{échantillon}} / ^{14}\text{C}_{\text{actuel}}) \cdot T / \text{Ln} 2$$

Avec t : temps en années depuis la fermeture du système

T période radioactive = 5370 ans.

Une autre méthode de calcul est :

$$(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{échantillon}} = (^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{actuel}} \cdot e^{-\lambda t}$$

Avec t : temps passé depuis la fermeture du système

λ : $1,21 \cdot 10^{-4} \text{ an}^{-1}$.

La radiodotation au carbone 14 permet donc de dater des échantillons d'origine organique âgés de moins de 50000 ans.

– *La méthode potassium/Argon* : le potassium (K) est un constituant important des roches de la croûte terrestre (on le trouve dans les micas, l'orthose...). Le ^{40}K se désintègre pour former de l' ^{40}Ar . Ce gaz s'échappe du système dans lequel il est formé, jusqu'à la fermeture de ce dernier

(refroidissement rapide des laves en l'occurrence). A la fermeture du système, la quantité d' ^{40}Ar est donc nulle ($F_0 = 0$). Nous avons alors :

$$^{40}\text{Ar} = ^{40}\text{K} \cdot (e^{\lambda t} - 1), \text{ avec } \lambda = 5,55 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$$

Soit en approximation :

$$^{40}\text{Ar} = ^{40}\text{K} \cdot \lambda t$$

Et donc :

$$T = (^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}) \cdot 1/\lambda$$

Cette méthode permet des datations (de laves) couvrant des périodes plus grandes que la datation au radiocarbone (plusieurs millions d'années). Elle est à utiliser avec précaution du fait de la possible contamination des échantillons par l'argon atmosphérique.

– *La méthode Strontium/Rubidium* : ces éléments peuvent se trouver intégrés dans des roches magmatiques (granite par exemple) lors de leur formation. Le refroidissement de ces roches (qui peut être très lent) correspond à la fermeture du système. Le ^{87}Rb (il en existe d'autres isotopes) se désintègre et forme du ^{87}Sr (dont il existe également d'autres isotopes). La période radioactive est $49 \cdot 10^9$ ans. Cela permet des datations de roches de quelques centaines de millions d'années.

Bien que le principe de la radiodation soit ici le même que précédemment, le système présente une complication supplémentaire. En effet, on ne connaît pas les quantités initiales de Strontium et de Rubidium. Pour résoudre le problème, on mesure sur différents minéraux (ayant cristallisé simultanément au sein d'une même roche) la concentration de différents isotopes de ces atomes et l'on calcule les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$. Ces valeurs sont reportées sur un graphique : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = f(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})$

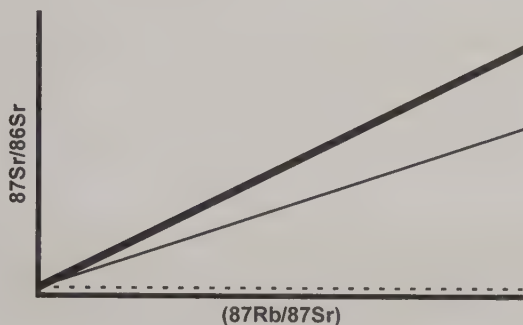
A la fermeture du système, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est le même pour tous les minéraux de la roche. En revanche, le rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ varie d'un minéral à l'autre. Les points correspondant sont, sur le graphique, alignés horizontalement (droite de pente nulle).

Au cours du temps, avec la désintégration $^{87}\text{Rb} \longrightarrow ^{87}\text{Sr}$, il y a baisse de la quantité de ^{87}Rb (et diminution du rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$) dans l'échantillon et augmentation conjointe de la quantité de ^{87}Sr (ainsi que du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Les points correspondant aux différents minéraux restent alignés sur une même droite, mais la pente de cette droite augmente au fil du temps.

La pente (coefficient directeur) de la droite (dite droite isochrone) obtenue dépend de l'âge de l'échantillon (et donc du temps passé depuis la fermeture du système), et l'on montre que la droite a pour équation :

$$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (e^{\lambda t} - 1) \cdot ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} + ^{87}\text{Sr}_0/^{86}\text{Sr}, \text{ avec } \lambda = 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$$

Ce qui correspond à une équation de type $y = ax + b$, où a est la pente de la droite (son coefficient directeur) et équivaut à $(e^{\lambda t} - 1)$, dont une approximation est λt . On en déduit alors que $t = [\ln(a+1)]/\lambda$ ou, en approximation $t = a/\lambda$, a étant déduit de la courbe tracée d'après les mesures faites.



Droites d'équation $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (e^{\lambda t} - 1) \cdot ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} + ^{87}\text{Sr}_0/^{86}\text{Sr}$, avec t croissant.

Unités arbitraires ici. Plus l'échantillon est ancien (droite en tirets, trait fin puis trait épais dans l'ordre chronologique), plus la pente est importante.

► L'échelle stratigraphique internationale

L'application des principes de la chronologie relative (superposition, utilisation des fossiles marqueurs stratigraphiques, continuité et identité paléontologique...) a permis de subdiviser les temps géologiques en périodes distinctes. Ces subdivisions, faites sur la base de changements dans la faune, la flore, ... ont été établies avant même qu'un âge précis puisse être attribué aux diverses périodes.

Les premières grandes divisions sont les ères : Primaire (= paléozoïque) ; Secondaire (= mésozoïque) ; Tertiaire et Quaternaire, ces deux dernières formant le cénozoïque.

Les ères sont à leur tour subdivisées en systèmes, eux-mêmes découpés en étages.

Chaque étage porte un nom qui rappelle le nom de la localité où l'étage a été décrit de manière caractéristique. C'est le stratotype.

Le Givetien par exemple, faisant partie de l'ère primaire, a été décrit à Givet, dans les Ardennes françaises ; le Toarcien (ère secondaire) a été décrit à Thouars, dans les Deux-sèvres ; le Maastrichtien (ère secondaire) a été décrit à Maastricht, aux Pays-bas, etc.

Un tableau, présentant les ères et systèmes, accompagnés des dates leur correspondant, est proposé à la page suivante.

Il est bien évident que si l'on pratique un forage en une région précise du globe, on ne s'attend pas à retrouver dans l'ordre toutes les strates correspondant à l'ensemble de l'histoire géologique de la Terre.

Tout d'abord parce que certaines ont pu disparaître par un phénomène d'érosion.

Ensuite parce qu'une région donnée n'est pas forcément une zone de dépôt sédimentaire tout au long de son histoire. Une phase sédimentaire en un lieu peut être suivie, après régression marine, d'une phase non sédimentaire jusqu'à ce que la mer revienne à nouveau sur cette zone (transgression). Les couches absentes constituent alors une lacune sédimentaire.

Ere	Système	Age (en Ma)
PRIMAIRE = PALEOZOIQUE		– 540
	Cambrien	
		– 500
	Ordovicien	
		– 440
	Silurien	
		– 410
	Dévonien	
		– 360
SECONDAIRE = MESOZOIQUE	Carbonifère	
		– 290
	Permien	
		– 250
	Trias	
TERTIAIRE ET QUATERNAIRE = CENOZOIQUE		– 205
	Jurassique	
		– 135
	Crétacé	
		– 65
	Paléogène	
		– 23,5
	Néogène	
		– 1,65
	Quaternaire	

Echelle stratigraphique internationale des temps géologiques. Seuls les ères et systèmes ont été ici représentés. Ces périodes sont elles-mêmes divisées en séries (paléocène, éocène, oligocène, miocène, pliocène par exemple pour l'ère tertiaire) et en étages.

► Enoncés des exercices ◀

■ Exercice 1 (15 min)

Donnez aux termes suivants une définition concise mais complète.
Chronologie relative, principe d'identité paléontologique, stratotype, élément radiogénique, période de demi-vie.

■ Exercice 2 : Vrai ou faux (15 min)

Indiquez si les affirmations suivantes sont exactes ou inexactes. Rectifiez les affirmations fausses de manière à les rendre exactes, en opérant le moins de modifications possibles.

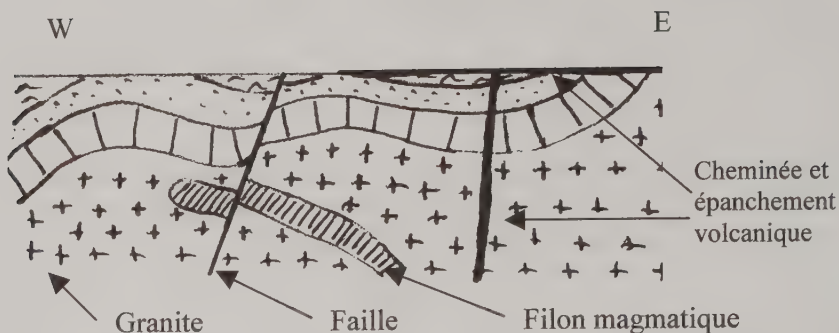
1. Le principe de superposition permet de dire que plus une couche est profonde, plus elle est ancienne.
2. Un fossile marqueur stratigraphique permet de reconstituer l'environnement dans lequel s'est constitué le dépôt sédimentaire à l'origine de la roche formée.
3. D'après le principe de recoupement (chronologie absolue), tout événement ayant affecté la géométrie initiale de couches sédimentaires est nécessairement antérieur à la formation de ces couches.
4. La période de demi-vie du carbone 14 est d'environ 5370 ans.
5. Le domaine d'utilisation d'un élément radioactif est de l'ordre du dixième de la période de demi-vie, jusqu'à cent fois cette période.
6. La radiodation au carbone 14 permet de dater des échantillons d'origine magmatique ou métamorphique.
7. Dans le cadre de la datation Strontium/Rubidium, les droites isochrones obtenues ont une pente qui dépend de l'âge de l'échantillon.

■ Exercice 3..... (15 min)

Le schéma ci-après représente une coupe géologique théorique.

Après avoir fait l'inventaire des phénomènes observables, vous tenterez de reconstituer l'histoire géologique de la région représentée, en explicitant votre raisonnement.

Vous préciserez, parmi les événements que vous aurez ainsi classés, si des incertitudes demeurent.



Coupe géologique théorique.

Légendes :

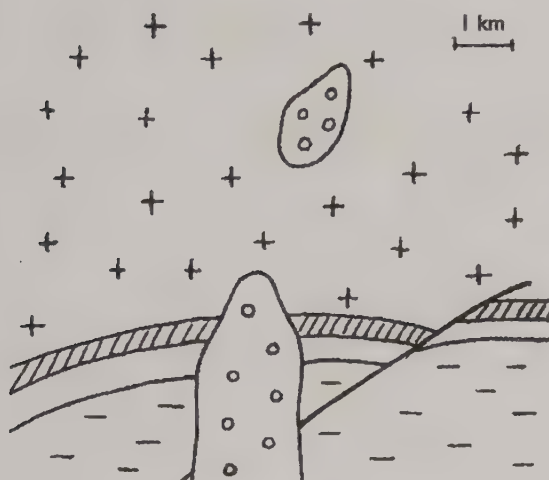
	Socle granitique	
	Calcaire	} Roches sédimentaires
	Grès	
	Marnes	
	Calcaire à débris	
	Filon	

■■■ Exercice 4 (30 min)

La carte géologique ci-dessous (document 1) a été établie d'après des observations de terrain dans les Pyrénées (massif de l'Agly). Le document 2 apporte des indications sur la nature de certaines des roches présentées (on précise que les cornéennes sont des roches métamorphiques, formant une auréole autour du granite). Le document 3 présente les domaines de stabilité de divers minéraux présents dans ces cornéennes.

1. Par l'analyse des minéraux les constituant et en vous appuyant sur les domaines de stabilité de ces minéraux, indiquez dans quelles conditions se sont formées les cornéennes a et b. Vous indiquerez sur le document 3 le domaine de formation de ces roches métamorphiques.
2. Etablissez la chronologie relative des événements géologiques ayant affecté la région étudiée.

(D'après bac. Etranger, 1998)



Document 1 : Carte géologique simplifiée s'un secteur du massif de l'Agly (Pyrénées)

Légende :



Formations glaciaires



Schistes



Cornéenne b



Cornéenne a



Granite intrusif

Cornéennes et schistes ont des compositions chimiques voisines.



Faille

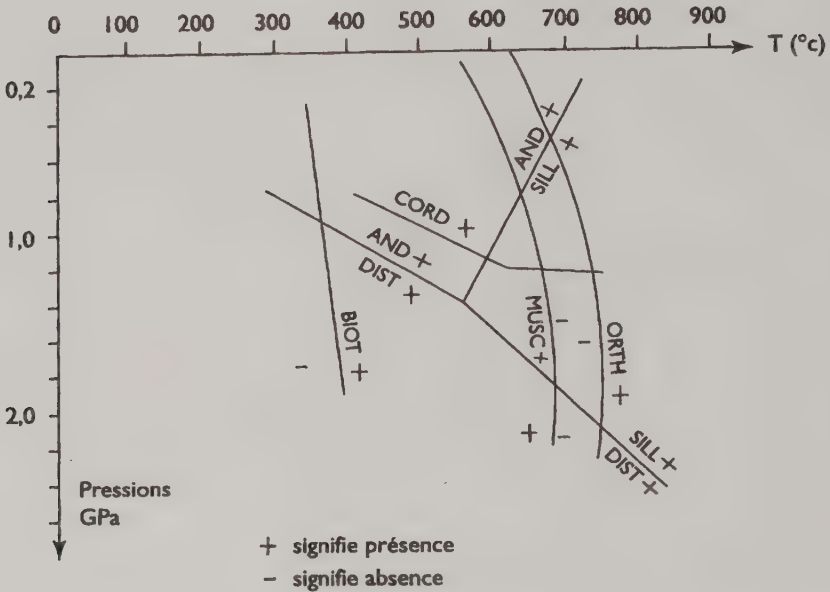
Document 2 : Minéraux des roches de la région étudiée

	Biotite (BIOT)	Muscovite (MUSC)	Quartz	Cordérite (CORD)	Andalousite (AND)	Sillimanite (SILL)	Orthose (ORTH)
a	+	-	+	+	-	+	+
b	+	+	+	+	+	-	-

a, b : cornéennes a et b.

+ signifie présence ; - signifie absence.

Document 3 : diagramme de stabilité de quelques minéraux



■ ■ **Exercice 5**..... (60 min)

La situation décrite ci-après, certes loin d'être réaliste, permet de s'approcher, par analogie, de la notion de datation absolue par utilisation de la décroissance radioactive d'éléments radioactifs.

Au pays des lutins, il existe des sacs vivants. Ces sacs sont emplis de boules bleues et rouges. Durant toute la vie des sacs, le rapport entre les boules bleues et rouges est maintenu constant. Ce rapport est également constant au sein d'une même espèce de sac. A la mort des sacs, de malicieux lutins transforment les boules bleues en boules rouges de telle façon que, après chaque période de deux jours, la quantité de boules bleues restant dans le sac est la moitié de la quantité présente au cours de la période précédente.

Un lutin malin se dit alors que, en comptant le nombre de boules bleues présentes dans un sac, on peut déterminer la date de sa mort.

1. Complétez le tableau suivant (colonnes (B) pour commencer), en considérant, comme exemples, les cas suivants : Imaginons un sac qui contiendrait au moment de sa mort (il faut redessiner à chaque fois le tableau).

- * Cas 1 : 1000 boules bleues et 1000 boules rouges.
- * Cas 2 : 4000 boules bleues et 2000 rouges.
- * Cas 3 : 1000 bleues et 4000 rouges.

* Cas 4 : 5000 bleues et 5000 rouges.

* Cas 5 : 6000 bleues et 3000 rouges.

jours	Boules bleues (B)	Boules rouges (R)	(B)/(R)	jours	Boules bleues (B)	Boules rouges (R)	(B)/(R)
0				10			
2				12			
4				14			
6				16			
8				18			

Représentez graphiquement $(B) = f(t)$

– Au bout de combien de jours restera-t-il 400 boules bleues dans le sac dans chacun des cas envisagés ?

– Si l'on trouve un sac mort (ayant possédé tout au long de sa vie autant de boules bleues que de boules rouges) contenant 500 boules bleues, quelle est la date approximative de sa mort ?

Quel problème apparaît ? Quelle en est la cause ?

- Le lutin malin a alors une autre idée. Il calcule, dans tous les cas, le rapport $(B)/(R)$.

Faites ce calcul (colonnes (R) et $(B)/(R)$ du tableau) puis représentez graphiquement $(B)/(R) = f(t)$.

- En utilisant vos graphiques

Au bout de combien de jours le rapport $(B)/(R)$ sera-t-il égal à 0,02 ?

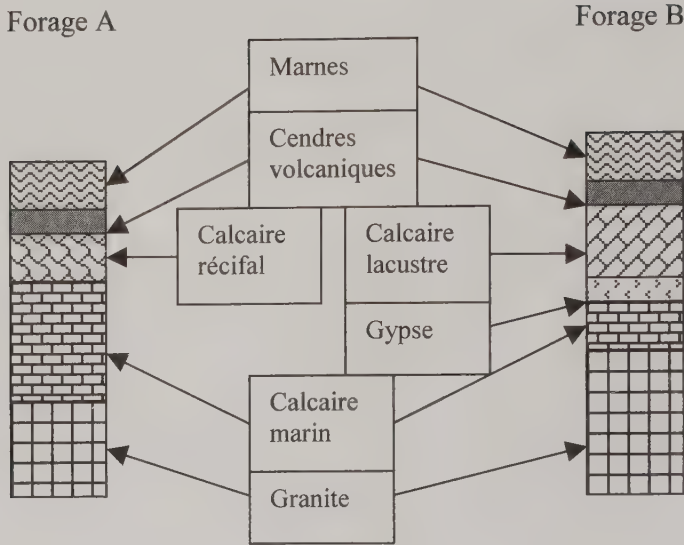
Quel intérêt présente ce dernier mode de représentation ?

Avec ce nouveau mode de représentation, de quel(s) paramètre(s) dépend l'allure de la courbe ?

- En imaginant maintenant que l'on trouve un sac mort, contenant un rapport $(B)/(R)$ égal à 0,01, déterminez graphiquement depuis combien de jours ce sac est mort sachant que son espèce correspond à celle des cas 1 et 4.

■■■ Exercice 6 (40 min)

Deux forages (théoriques) réalisés à quelques kilomètres de distance dans une même région, ont donné les résultats suivants :



On précise :

- * Que les calcaires marins des deux forages ont le même contenu paléontologique, à savoir des fossiles de poissons et mollusques marins de haute mer.
- * Que le gypse est une évaporite, c'est-à-dire une roche se formant par précipitation saline dans des milieux saturés tels que lagunes, ou milieux riches en sels, soumis à de fortes phases d'évaporation.
- * Que le calcaire récifal ici trouvé est riche en débris coquilliers de mollusques de mer peu profonde.
- * Que dans les cendres volcaniques des deux forages, ont été trouvés des fragments calcinés de bois. La mesure de la radioactivité liée au carbone 14 de ces cendres volcaniques est de 6,7 dpm (désintégrations par minute), alors que les valeurs actuelles (mesurées dans des échantillons de bois vivant) sont de l'ordre de 13,6 dpm.

1. Compte tenu des couches géologiques qui les surmontent, il a été émis que les deux granites présents à la base des forages doivent avoir le même âge. Quel(s) principe(s) peuvent étayer cette affirmation ?
2. La mesure de la teneur en isotopes du strontium et du rubidium de différents minéraux de ces granites a donné les résultats présentés dans le tableau ci-dessous.

Minéraux du granite du forage A	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
Minéral 1	0,720	5
Minéral 2	0,751	13,6
Minéral 3	0,774	20,1

Minéraux du granite du forage B	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
Minéral 1	0,798	26,4
Minéral 2	0,827	35
Minéral 3	0,839	38,1

Ces mesures vous permettent-elles de confirmer l'hypothèse d'un âge identique pour ces deux granites ? Précisez l'âge des granites.

3. Datez l'épisode volcanique survenu dans cette région.
4. Proposez une explication aux différences de faciès observées dans les terrains de ces deux localités.

.....■ CONTROLES ■.....

Exercice 1 (100 min ; 10 pts) Question type I

Au cours des temps géologiques, les roches se sont constituées, se sont modifiées, ont été érodées, tandis que la vie évoluait sur la planète. Ces divers phénomènes laissent des traces à la surface de la Terre, qui permettent de reconstituer des pans entiers de son histoire.

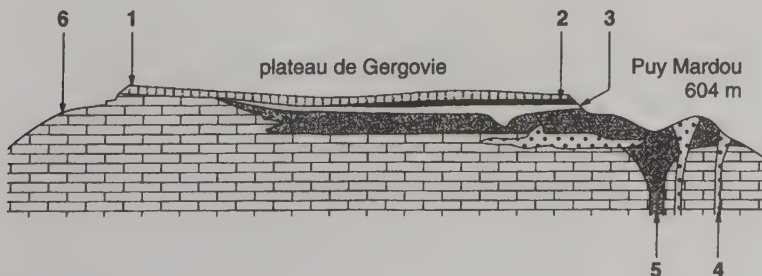
En utilisant vos connaissances, indiquez quelles sont les méthodes utilisées pour reconstituer l'histoire géologique d'une région.

Votre exposé sera clair et accompagné d'illustrations judicieuses.

Exercice 2 (40 min ; 4 pts) Question type II1

Question : En exploitant le document fourni (coupe géologique au niveau du plateau de Gergovie, 6 km au sud de Clermont-Ferrand) proposez une chronologie argumentée des événements ayant affecté la région, ainsi qu'une date possible pour la mise en place des brèches volcaniques.

On précise que de telles brèches volcaniques se mettent en place par intrusion et mélange d'une lave dans des sédiments non encore consolidés.



- 1- basalte supérieur (16 Ma)
- 2- basalte inférieur (19 Ma)
- 3- alluvions fluviatiles (20 Ma)
- 4- intrusions de basalte (18 Ma)
- 5- brèches volcaniques
- 6- calcaire lacustre de Limagne (30 Ma)

échelle :

500 m

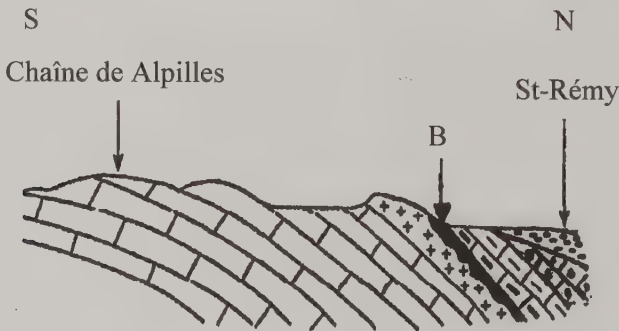
(Adapté, d'après bac. Antilles, septembre 1996)

Exercice 3 (40 min ; 4 pts) Question type II1

On cherche à établir la chronologie relative des événements géologiques qui ont affecté la région des Alpilles (sud-est de la France) depuis le crétacé inférieur.

Question : A partir de l'exploitation du document proposé, identifiez et datez – en justifiant votre réponse – les événements géologiques qui ont affecté cette région.

Document : coupe transversale des Alpilles passant par les Baux-de-Provence (d'après Guieu, modifié).



Légende stratigraphique

- | | | | |
|-------------------|---|--|---|
| Miocène | | Burdigalien : molasse (calcaire marin à débris) = Bu | |
| Crétacé supérieur | { | | Rognacien (calcaire et grès) = Ro |
| | | | Béguvien (marnes grisâtres et bancs calcaires) = Bé |
| | | | Valdo-Fuvélien (calcaire et marnes, formation, fluvio-lacustres) = Va |
| Crétacé inférieur | { | | Urgonien (calcaire récifal à rudistes) = ur |
| | | | Hauterivien (calcaire à oursins) = Ha |
| | | Bauxite | |
- 1 km

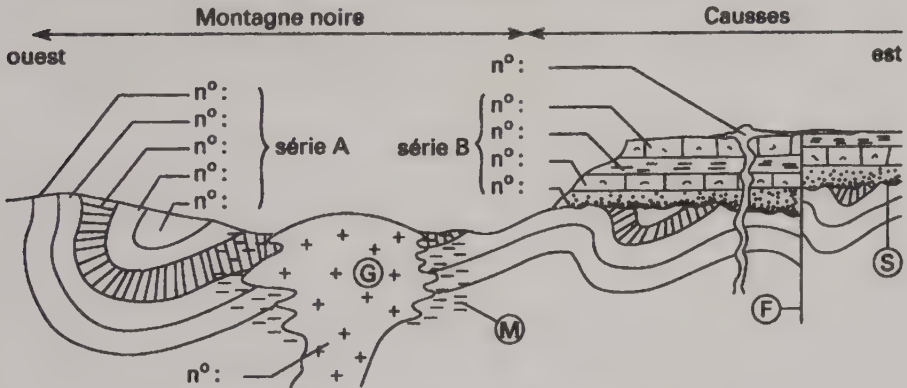
La bauxite est un minéral d'aluminium qui se forme soit par altération d'une roche dans un sol de région chaude et humide, soit par dépôt dans un bassin sédimentaire après transport en surface et lessivage d'un sol rouge de région tropicale humide.

(Sujet 0, bac. 2003)

Exercice 4 (60 min ; 6 pts) Question type II2

Question : A partir de l'ensemble des documents fournis, donnez une chronologie argumentée des événements ayant affecté la région étudiée.

Document 1 : Coupe géologique dans le massif central.



les séries A et B sont des séries sédimentaires

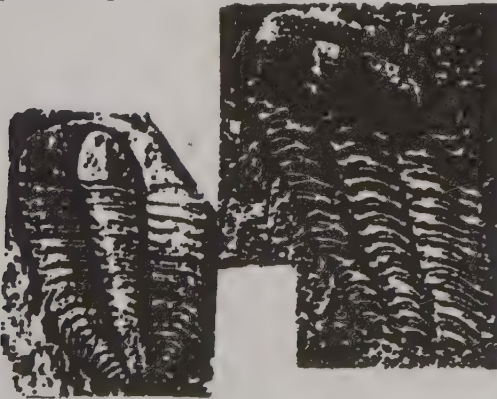
G = granite

M = cornéenne et schistes tachetés (roches métamorphiques)

F = faille

S = surface d'érosion

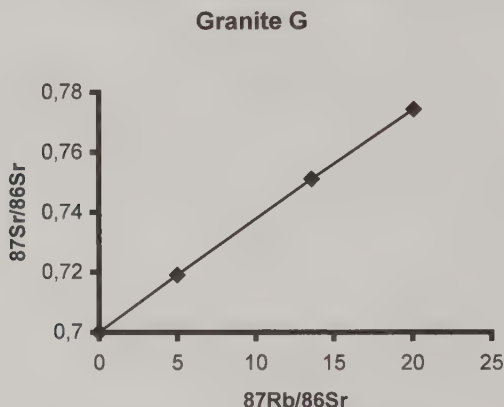
Document 2A : Fossile de la série A : invertébré marin (trilobite) de l'ère primaire (paléozoïque, – 540 à – 250 Ma)



Document 2B : Fossile de la série B : invertébré marin (ammonite) de l'ère secondaire (mésozoïque, – 250 à – 65 Ma)



Document 3 : Rapports isotopiques Sr et Rb de minéraux du granite G.



On rappelle que la relation entre ces radioisotopes est :

$$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = \lambda \cdot t \cdot (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}) + ^{87}\text{Sr}_0/^{86}\text{Sr}.$$

Avec t = temps écoulé depuis la fermeture du système et $\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$.

Exercice 5 (60 min ; 6 pts) Question type II2

On a trouvé, dans une couche sédimentaire (couche 3 du document 1), des fossiles dont on aimerait déterminer l'âge approximatif. La disposition de cette couche par rapport aux autres couches et/ou roches est présentée dans le document 1.

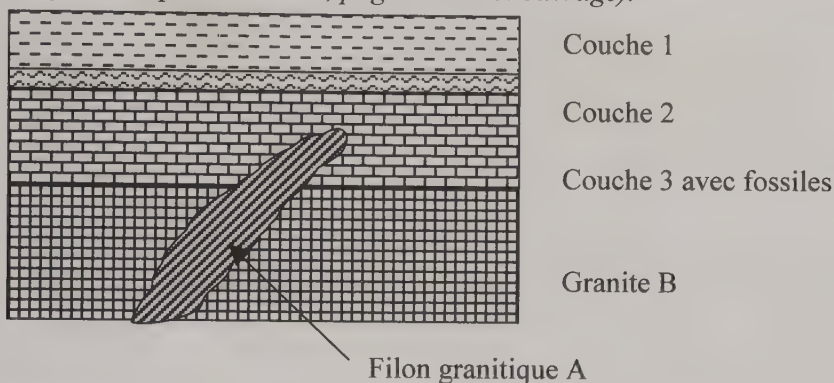
Question : A l'aide de l'ensemble des documents proposés indiquez, en justifiant soigneusement la méthode et la démarche utilisées, à quelle(s) période(s) géologique(s) on peut associer la couche sédimentaire 3.

Les minéraux du granite sous-jacent et du filon granitique sont analysés et les rapports isotopiques et sont déterminés, les valeurs étant reportées dans un graphique : document 2.

On rappelle que la relation entre ces radioisotopes est :

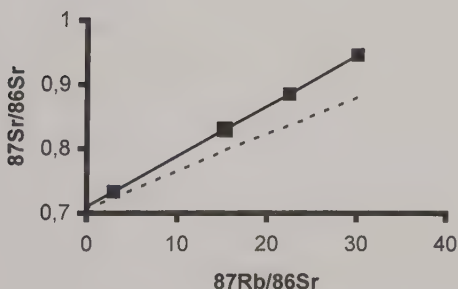
$$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = \lambda.t.(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}) + ^{87}\text{Sr}_0/^{86}\text{Sr}.$$

Avec t = temps écoulé depuis la fermeture du système et $\lambda = 1,42.10^{-11} \text{ an}^{-1}$.
Le document 3 précise le nom des périodes géologiques des temps fossilifères, en indiquant leur âge approximatif (ce document 3 se trouve en fait à la fin de la partie résumé, page 32 de cet ouvrage).



Document 1 : coupe géologique simplifiée de la région étudiée.

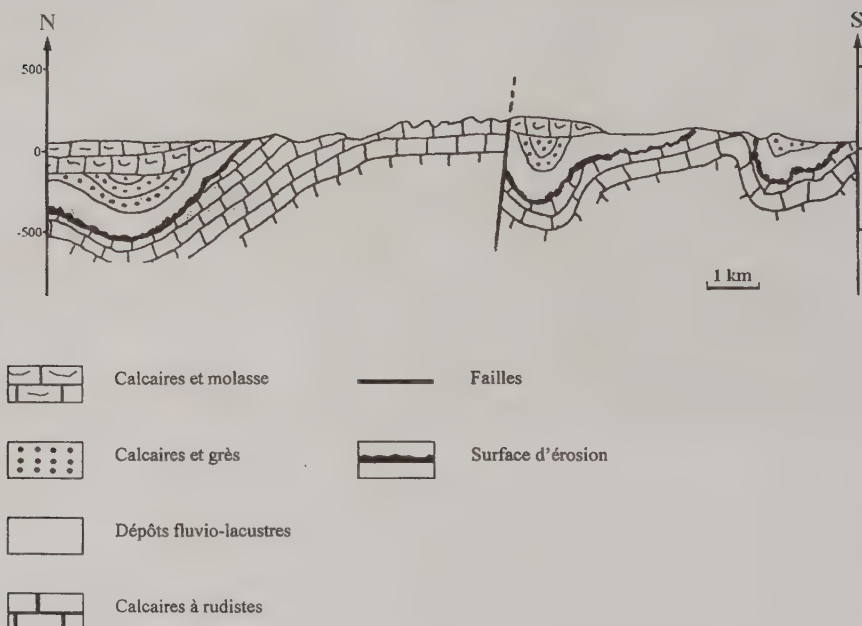
Rapports isotopiques granites A et B



Document 2 : rapports isotopiques de divers minéraux des granites A et B.
Trait plein : granite B ; en tirets : filon granitique A.

Exercice 6 (40 min ; 4 pts) Question type II1

Question : Grâce à un raisonnement rigoureux, réalisez une datation relative des quatre événements indiqués sur le document et visibles sur la coupe géologique présentée, puis établissez leur chronologie.

Document : Coupe géologique simplifiée d'une région de Provence

Les quatre événements à prendre en compte : la faille, la phase de plissement, la surface d'érosion, le dépôt de calcaires et grès.

Baccalauréat 2003

► Corrigé des exercices ▼

Corrigé 1

La chronologie relative est un ensemble de méthodes et de principes, basés sur une étude de la géométrie des couches géologiques et de leur contenu paléontologique. Elle permet de situer des événements dans le temps, les uns par rapport aux autres, sans leur attribuer un âge précis.

Le principe d'identité paléontologique est un des principes de la chronologie relative. Une expression simple de ce principe est que si deux couches géologiques sont identiques sur le plan de leur contenu en faune et flore fossiles, on peut affirmer qu'elles sont d'âge identique.

Un stratotype est une souche géologique de référence (strate-type) qui permet de définir, par son contenu en fossiles, un étage géologique précis,

qui porte alors un nom rappelant celui de la localité où se trouve la stratotype. Selon le principe d'identité paléontologique, toute couche géologique ayant les mêmes caractéristiques que cette couche de référence appartient au même système.

Un élément radiogénique est un élément chimique-fils, issu de la désintégration d'un isotope (nommé élément-père).

La période de demi-vie d'un élément radioactif est le temps nécessaire à la désintégration radioactive de la moitié de la quantité d'un élément-père dans un échantillon.

Corrigé 2

1. **Vrai.**

2. **Faux.** Cela correspond à la définition d'un marqueur de faciès. Un bon fossile stratigraphique permet de donner un âge relatif à une couche géologique. Il doit être largement répandu à la surface du globe, être abondant et appartenir à une espèce ayant une courte durée de vie. Après modification (un mot), la phrase peut devenir : un fossile marqueur *de faciès* permet de reconstituer l'environnement dans lequel s'est constitué le dépôt sédimentaire à l'origine de la roche formée.

3. **Faux.** D'après le principe de recoupement (chronologie *relative*), tout événement ayant affecté la géométrie initiale de couches sédimentaires est nécessairement *postérieure* à la formation de ces couches.

4. **Vrai.**

5. **Faux.** Le domaine d'utilisation d'un élément radioactif est de l'ordre du *centième* de la période de demi-vie, jusqu'à *dix* fois cette période.

6. **Faux.** La radiodation au carbone 14 permet de dater des échantillons d'origine *organique*.
(c'est-à-dire : coquilles, os, bois,...).

7. **Vrai.**

Corrigé 3

Les événements que l'on peut repérer sur la coupe fournie sont (dans un ordre quelconque pour l'instant) :

– Une sédimentation sur un socle granitique. Le principe de superposition nous indique que la couche la plus profonde est également la plus ancienne.

– Une érosion décelable à la discordance existant entre le calcaire à débris et les autres couches.

– Un plissement, ayant affecté toutes les couches sédimentaires, à l'exception du calcaire à débris qui est donc postérieur au plissement, d'après le principe de recoupement.

– Un volcanisme qui recoupe les couches sédimentaires, à l'exception du calcaire à débris qui lui est donc postérieur. Ce volcanisme est postérieur à une phase de plissement et d'érosion puisque les laves émises reposent en discordance sur les couches sédimentaires sous-jacentes.

– Une faille qui recoupe et déplace les terrains sédimentaires à l'exception du calcaire à débris, qui est donc postérieur à la faille. Cette faille est une faille normale.

– Une intrusion magmatique, matérialisée par le filon. Celui-ci ne recoupe que le socle granitique. Mais il est antérieur à la faille qui est elle-même postérieure à la sédimentation. On ne peut pas préciser si le filon est antérieur ou postérieur au volcanisme.

L'ordre chronologique que l'on peut proposer est :

* Sédimentation sur un socle granitique : formation du calcaire, du grès et des marnes.

* Plissement, sous l'effet de forces compressives.

* Intrusion magmatique.

* Faille apparaissant sous l'effet de forces distensives (faille normale). La faille affecte le filon.

* Erosion puis phase volcanique, les laves étant en discordance sur les terrains sous-jacents.

* Nouvelle phase sédimentaire, donnant naissance au calcaire à débris.

Les éléments pour lesquels nous n'avons pas de grande certitude sont :

Filon avant ou après volcanisme ?

Filon avant ou après la sédimentation ? Le filon pouvait très bien être en place avant la phase sédimentaire, il aurait été affecté de la même façon par la faille.

Faille avant ou après volcanisme ?

Il est important de bien montrer qu'on ne peut pas forcément tout déterminer à partir des documents à notre disposition. Prendre du recul et reconnaître les limites des documents, c'est aussi une attitude scientifique.

Corrigé 4

1. Les deux roches étudiées contiennent du quartz, qui n'apparaît pas sur le document 3, ce minéral ne nous est d'aucune aide ici. La présence de cordiérite dans les deux roches indique qu'elles se sont formées à une faible pression (inférieure à 1 GPa). La présence de biotite dans ces roches indique qu'elles se sont formées à une température supérieure à 350 °C.

La cornéenne a contient orthose et sillimanite, mais pas de muscovite. Sa formation s'est faite à température élevée (au-delà de 600-700 °C).

La cornéenne b contient muscovite et andalousite. Elle s'est formée à une température plus basse (inférieure à 600 °C).

Les conditions de formation de ces roches sont reportées dans le graphique ci-dessous.

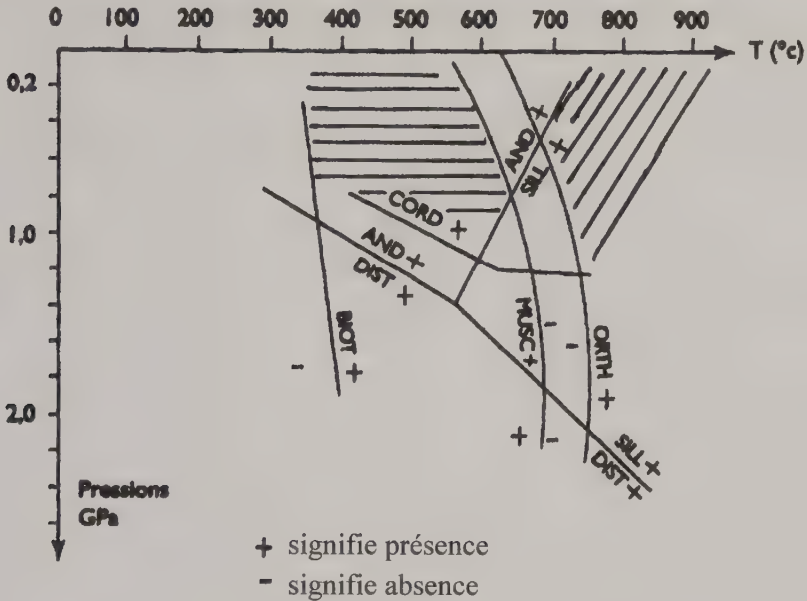


Diagramme de stabilité de quelques minéraux. En hachures horizontales : domaine de formation de la cornéenne b, en hachures obliques : domaine de formation de la cornéenne a.

Ces deux roches se sont formées lors d'un phénomène de métamorphisme à basse pression et température relativement élevée. On peut supposer que ce métamorphisme s'est produit lors de la mise en place de l'intrusion granitique. La montée de magma chaud a provoqué la transformation (à l'état solide) des roches déjà en place et le degré de métamorphisme est d'autant plus élevé que l'on est proche du granite (plus on s'éloigne de ce granite, plus la température était faible au moment de sa mise en place).

2. La chronologie des événements est la suivante :

- * Mise en place des schistes.
- * Intrusion granitique et formation des cornéennes formant une auréole de métamorphisme.
- * Faille (qui touche l'auréole de métamorphisme, mais pas les formations glaciaires).
- * Dépôt des formations glaciaires, après une érosion qui a mis à nu le granite intrusif.

Corrigé 5

1. Seul le tableau correspondant au cas N°1 est représenté, à titre d'exemple (les autres ne doivent pas poser de problème particulier). Les valeurs ont été arrondies par défaut.

jours	Boules bleues (B)	Boules rouges (R)	(B)/(R)	jours	Boules bleues (B)	Boules rouges (R)	(B)/(R)
0	1000			10	31,2		
2	500			12	15,6		
4	250			14	7,8		
6	125			16	4		
8	62,5			18	2		

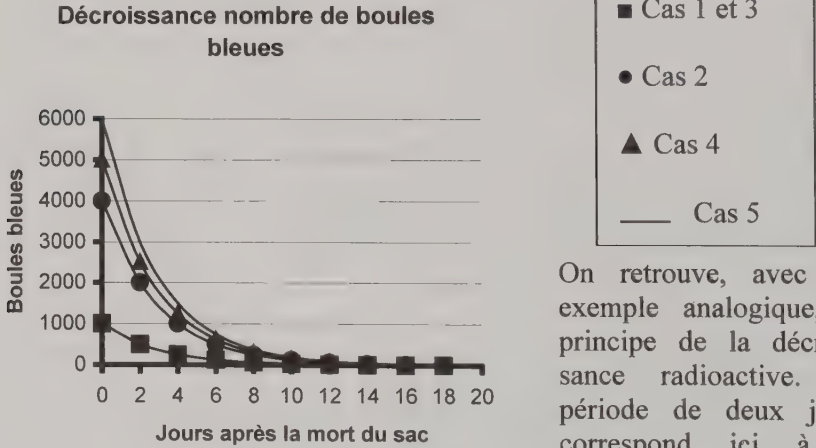
Il restera 400 boules bleues dans les sacs au bout de (environ) :

Cas N° 1 et 3 : 2 jours et demie.

Cas N° 2 : 6 jours.

Cas N° 4 : 6 jours et demie.

Cas N°5 : 7 jours.



On retrouve, avec cet exemple analogique, le principe de la décroissance radioactive. La période de deux jours correspond ici à la période de demi-vie T.

Si l'on trouve un sac mort contenant 500 boules bleues, sa mort peut correspondre à différentes dates, selon le cas considéré. Dans le cas N° 1, la mort daterait de deux jours, alors que, dans le cas N° 4, elle daterait de six jours, soit le triple de la date évaluée d'après le cas N° 1. C'est comme si l'on datait un événement sans pouvoir déterminer avec précision s'il faut retenir 100 ou 300 millions d'années, selon la méthode utilisée.

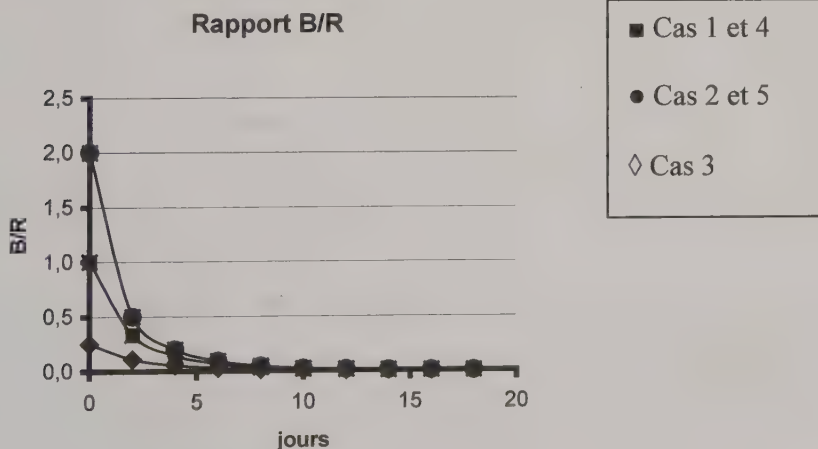
La cause est que l'on ne sait pas combien de boules bleues contenait le sac au moment de sa mort.

Le problème est donc le même que celui qui se pose lorsqu'on cherche à utiliser la décroissance radioactive dans la chronologie absolue : comment savoir quelle était la quantité d'atomes-pères (ou d'atomes-fils) dans le système, à sa fermeture ? Si l'on a parfois des réponses (quantité d'atomes-fils nulle dans le cas de la datation potassium/argon par exemple), on reste souvent dans l'inconnu et il faut procéder autrement.

2. Les valeurs données ici, à titre d'exemple, ne concerne, encore une fois, que le cas N° 1.

jours	Boules bleues (B)	Boules rouges (R)	(B)/(R)	jours	Boules bleues (B)	Boules rouges (R)	(B)/(R)
0	1000	1000	1	10	31,2	1968,8	0,016
2	500	1500	0,333	12	15,6	1984,4	0,008
4	250	1750	0,143	14	7,8	1992,2	0,004
6	125	1875	0,067	16	4	1996,1	0,002
8	62,5	1937,5	0,032	18	2	1998	0,001

Les graphiques obtenus sont :



3. Là encore, tout dépend du cas considéré :

Cas 1 et 4 : 9 jours.

Cas 2 et 5 : 10 jours.

Cas 3 : 7 jours.

Ce dernier mode de représentation, permet, comme on peut le constater, de ne plus tenir compte de la taille des sacs, mais uniquement de leur espèce. Tous les sacs de l'espèce à laquelle appartiennent les cas 1 et 4 (rapport

initial = 1) suivent la courbe marquée par des carrés, peu importe le nombre exact de boules contenues au départ (à la fermeture du système), ce qui est important ici pour déterminer l'allure de la courbe est de connaître le rapport initial des boules, c'est-à-dire l'espèce.

L'analogie que nous pouvons faire avec la radiodattation est que, lorsque les quantités initiales d'élément père ou fils sont inconnues, un travail sur les rapports isotopiques permet de s'affranchir de ces difficultés.

4. On recherche, dans le graphique précédent, sur la courbe correspondant aux cas 1 et 4, le point d'ordonnée 0,01. Ce point à pour abscisse 11 jours environ, ce qui correspond à la période de fermeture du système, soit la mort du sac. Nous ne savons donc pas quelle était la taille du sac au cours de sa vie, mais la connaissance de son espèce et l'utilisation du rapport B/R (équivalent au rapport atomes-pères/atomes-fils pour la radiochronologie) permet de déterminer avec certitude la date de sa mort.

Corrigé 6

1. Les arguments géologiques qui permettent de soutenir l'hypothèse que les deux granites sont de même âge font partie des principes de la géologie relative.

Le principe d'identité paléontologique permet d'affirmer que si deux couches géologiques ont un même contenu en fossiles, ces deux couches sont d'âge identique. C'est le cas du calcaire marin retrouvé dans les deux forages. Ces calcaires retrouvés dans les forages A et B sont de même âge.

Le principe de continuité indique que si deux couches géologiques ont un même plancher et un même toit, ces couches sont de même âge. Nous ignorons ici ce qui se trouve sous le granite, mais nous savons, en revanche que ces granites sont surmontés de couches (calcaire marin) d'âge identique. Ces arguments plaident en faveur d'un âge identique pour les granites des forages A et B.

2. A partir des valeurs qui nous sont fournies pour les minéraux des granites des forages A et B, nous pouvons construire les courbes isochrones (page suivante) qui nous permettront de dater les granites.

Nous pouvons constater que, non seulement les pentes des deux droites sont les mêmes, mais que tous les points sont alignés. La pente étant la même pour les deux droites isochrones, on peut affirmer que les deux granites ont bien le même âge.

Précisons l'âge des ces granites.

La droite isochrone répond à une équation du type $y = ax + b$, et, plus précisément, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = \lambda.t.(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}) + ^{87}\text{Sr}_0/^{86}\text{Sr}$.

La pente de l'unique droite obtenue est déterminée en prenant deux points de cette droite

Point 1 : ($x_1 = 5$; $y_1 = 0,720$)

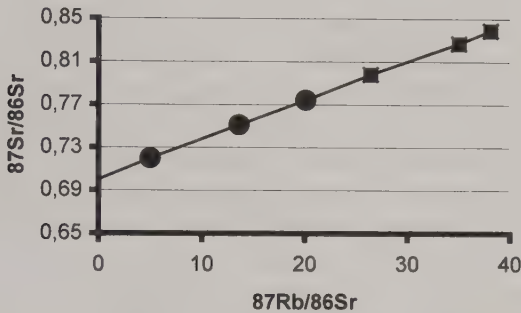
Point 2 : ($x_2 = 35$; $y_2 = 0,827$)

La pente est : $a = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1) = 0,107/30 = 3,56 \cdot 10^{-3}$

$\lambda \cdot t$ est la pente de cette droite, avec $\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$.

On en déduit $t = a/\lambda = 3,56 \cdot 10^{-3}/1,42 \cdot 10^{-11} = 250,7$ millions d'années.

Les deux granites trouvés à la base des forages A et B sont donc contemporains et ont 250 millions d'années environ.



Droites isochrones établies à partir des rapports isotopiques des minéraux des deux granites. ● : minéraux du granite du forage A ; ■ : minéraux du granite du forage B.

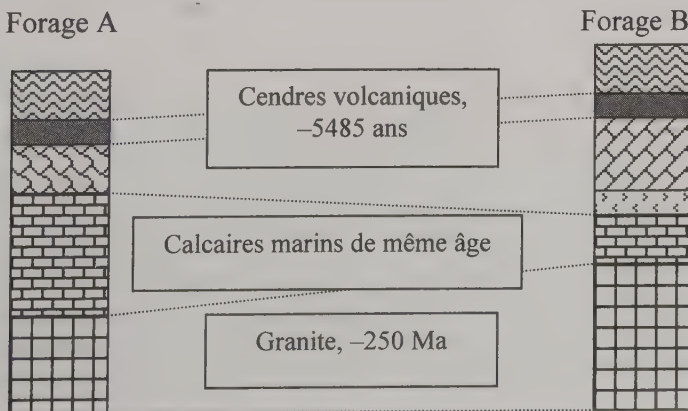
3. Dans le cadre de la radiodattation au carbone 14, une formule de calcul utilisable est : $t = \text{Ln} (^{14}\text{C}_{\text{échantillon}}/^{14}\text{C}_{\text{actuel}}) \cdot T/\text{Ln}2$ (où l'on peut remplacer la teneur en carbone 14 par la valeur de son activité en dpm), avec, ici :

$^{14}\text{C}_{\text{échantillon}} = 6,7 \text{ dpm}$; et $^{14}\text{C}_{\text{actuel}} = 13,6 \text{ dpm}$.

D'où

$$t = -5485 \text{ ans.}$$

4. A l'aide des datations absolues effectuées, et en utilisant les principes de datation relative énoncés précédemment, nous pouvons établir les correspondances stratigraphiques entre les deux forages.



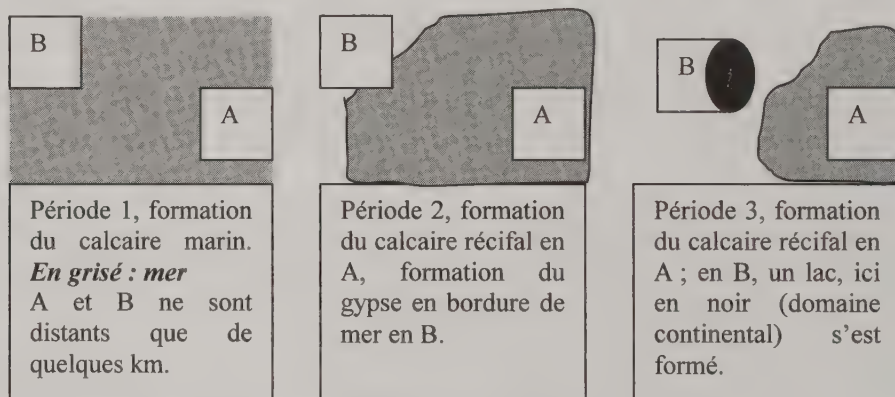
D'après le principe de continuité, on déduit que le calcaire récifal d'une part et d'autre part le gypse et le calcaire lacustre sont contemporains (ils sont tous deux limités en dessous et en dessus par des couches identiques et de même âge, à savoir le calcaire marin et les cendres volcaniques).

Comment expliquer alors qu'à peu de distance, les couches sédimentaires soient différentes ?

Pour le forage A, on constate qu'un calcaire récifal de faible profondeur succède au calcaire marin de profondeur. Il y a donc eu, au niveau de ce point, baisse du niveau marin (recul de la mer = régression).

Pour le forage B, au calcaire marin de profondeur succèdent des roches formées en milieu lagunaire ou continental. Il est donc envisageable qu'en cet endroit, le recul de la mer ait été un peu plus prononcé. Cette zone s'est tout d'abord trouvée en bordure de mer (formation du gypse) puis totalement hors du milieu marin.

Le bord de mer devait donc, à cette période, se trouver entre les zones où ont été faits les forages A et B.



Conditions de formation de certaines roches des forages A et B

.....■ CORRIGE DES CONTROLES ■.....

Exercice 1

Il faut, dans un premier temps, bien cerner le sujet. Rien dans l'énoncé ne permet d'exclure la chronologie relative ou la chronologie absolue et les deux permettent de reconstituer, avec plus ou moins de précision, l'histoire d'une région. C'est bien de l'histoire géologique dont il s'agit à priori (et non pas de l'histoire de la Vie). Traiter des grandes périodes de l'histoire de la Terre serait hors-sujet. Il faut réinvestir les connaissances dans le cadre de l'histoire d'une région, en s'appuyant, si possible sur des schémas nombreux et clairs. Il s'agit donc ici de déterminer concrètement, sur quels observations de terrain on s'appuie pour reconstituer l'histoire d'une région précise. Les généralités sont à éviter.

L'introduction (qui ne doit être faite que lorsqu'on a correctement analysé le sujet et que l'on connaît le plan du développement) doit permettre de poser le problème en définissant quelques termes (histoire géologique par exemple) et annoncer le plan qui doit être logique et apparent si possible (c'est-à-dire que l'on ne doit pas trop le chercher. La solution la plus simple et de faire des titres numérotés et soulignés. La simple lecture de ces titres doit permettre de comprendre la démarche suivie).

Proposition d'introduction et de plan détaillé.

L'aspect naturel de la Terre résulte d'une histoire longue et complexe. Formation de dépôts sédimentaires, soulèvement et érosion de chaînes de montagnes, volcanisme, phénomènes tectoniques, etc. modèlent peu à peu les paysages. Comment reconstituer l'histoire géologique d'une région ? Sur quels indices, recueillis sur le terrain, peut-on se baser pour connaître ce passé ? Nous allons montrer en quoi la géométrie des roches permet de comprendre la succession d'événements qui s'est produite en un lieu donné et nous verrons comment dater ces événements.

I) Etude de la géométrie des couches

Principes de chronologie relative, appliqués à une région. La région a été une zone sédimentaire : principe de superposition. La région a, par la suite, été bouleversée par des plis, des failles : principe de recoupement.

On peut, en cas de besoin, effectuer des corrélations à distance : principe de continuité et principe d'identité paléontologique.

Les fossiles trouvés sur place peuvent être utilisés pour reconstituer l'environnement de dépôt à une période donnée.

II) Etude d'échantillons pour la datation absolue

Il s'agit de méthodes de laboratoire, mais avec des échantillons recueillis sur le terrain (sur la région à étudier).

Principes de la datation relative, surtout de la radiodation, en précisant bien la nature des échantillons utilisables et le domaine d'application des méthodes utilisées (exemple, datation au carbone 14 : sur des restes organiques exclusivement, datés de moins de 50000 ans).

En conclusion : L'étude de la géométrie des couches formant un terrain géologique permet de reconstituer la chronologie des événements qui ont affecté cette région. On peut alors, par des méthodes fiables, dater les terrains et proposer une reconstitution de l'histoire de la région.

Une telle étude peut, par la suite, nous permettre de décrire le déroulement de l'évolution du vivant dans cette région.

La conclusion doit résumer (sans le répéter inutilement) ce qui a été présenté auparavant, pour bien montrer que l'on a répondu à la question posée. Pensez donc à relire le sujet au moment de conclure, il est peut être encore temps de rectifier le développement. De plus, la conclusion doit proposer une ouverture vers un autre sujet.

Exercice 2

En appliquant les principes de superposition et de recoupement, on peut assez aisément retrouver la chronologie des événements, qui est, a priori :

Dépôt de calcaire en milieu continental (calcaire lacustre)

Volcanisme et dépôt des brèches volcaniques

Dépôt des alluvions fluviales

Coulées basaltiques inférieure et supérieure

Les intrusions basaltiques sont postérieures au dépôt des cendres volcaniques qu'elles recoupent.

Cette chronologie est confirmée par les datations absolues qui nous sont données, permettant de préciser en outre que les intrusions basaltiques (18 Ma) sont intervenues après la formation du basalte inférieur (19 Ma) et avant la formation du basalte supérieur (16 Ma).

La connaissance du mode de formation des brèches volcaniques permet de préciser que celles-ci se sont mises en place alors que les alluvions fluviales n'étaient pas encore consolidées, c'est-à-dire il y a environ 20 Ma.

Il n'est pas nécessaire de décrire ce que sont les principes de superposition et de recoupement. Les citer suffit amplement. En revanche, il faut bien faire attention à exploiter le document et à ne pas se précipiter trop vite sur les datations absolues.

Exercice 3

La chronologie des événements semble assez simple à définir, à l'aide des principes de superposition et de recoupement :

On observe des phases sédimentaires (superposition de couches), de plissement (affectant toutes les couches, à l'exception des terrains du Miocène et donc antérieur à cette période), d'érosion (repérable par la discordance Crétacé sup./Miocène).

La chronologie est la suivante :

Phase de sédimentation, en milieu marin (oursins, récifs), dépôts de calcaires
Formation de la couche de bauxite (peut-être après émergence et altération en milieu continental)

Sédimentation calcaire fluviale et lacustre (eau douce, donc en milieu continental, la mer s'est bien retirée)

Sédimentation calcaire (en milieu marin ?)

Plissement, touchant toutes les couches jusqu'au Crétacé supérieur

Phase d'érosion, après émergence

Nouvelle phase de sédimentation marine au Miocène, ce qui suppose un retour de la mer (transgression). Ces couches calcaires reposent en discordance sur les couches inférieures érodées.

Exercice 4

Identifions les éléments qu'apportent les différents documents :

Doc. 1 : Utilisation de la chronologie relative, principes de superposition et de recoupement : il y a sédimentation de la série A (la plus profonde), puis plissement (qui n'affecte que la série A), érosion, sédimentation de la série B, formation d'une faille (qui touche tous les terrains sauf les couches volcaniques) et enfin phase volcanique.

Il existe une ambiguïté portant sur la datation relative de l'intrusion granitique. Celle-ci s'est produite après le dépôt de la série A, le granite ne semble pas trop déformé par les plis, il doit lui être postérieur, mais c'est tout ce que l'on peut dire.

Les doc. 2A et 2B confirment l'antériorité de la série A (ère primaire, avec fossiles caractéristiques = trilobites) sur la série B (ère secondaire, avec fossiles caractéristiques = ammonites).

Le doc. 3 permet de lever partiellement l'ambiguïté portant sur l'intrusion granitique, en la datant. Si l'on prend deux points de la droite : $x_1 (5 ; 0,72)$ et $x_2 (20 ; 0,775)$, on calcule une pente de $3,66 \cdot 10^{-3}$.

$T = 257$ Ma environ.

Le granite s'est donc mis en place à la fin de l'ère primaire.

Reprenons l'ensemble :

Sédimentation à l'ère primaire ; Plissement ; Intrusion granitique (– 257 Ma) ; Erosion ; Sédimentation à l'ère secondaire ; Faille ; Erosion ; Volcanisme.

La mise en relation des documents est, ici, fondamentale.

Exercice 5

Pour dater (de manière approximative) la couche fossilifère 3, nous allons utiliser des principes de chronologie relative.

La couche 3 est postérieure au granite B qu'elle recouvre.

En revanche, cette même couche est antérieure au filon granitique a, puisque celui-ci la recoupe (on ne sait pas si ce filon est ou non postérieur aux couches sédimentaires 1 et 2, mais cela n'a aucune importance ici, compte tenu de la question posée).

La couche 3 a donc un âge compris entre l'âge du granite A et l'âge du granite B.

Nous devons donc dater ces deux granites pour avoir un encadrement de l'âge de la couche 3.

Les droites isochrones du document 2 nous permettent ces datations absolues. En prenant des points sur les courbes, nous pouvons déterminer la pente de chacune des droites.

Il se confirme bien que le granite B est antérieur au filon granitique A (pente plus forte pour la droite isochrone correspondant au granite B).

Les pentes sont :

Filon granitique A : $5,69.10^{-3}$, soit un âge de 400 Ma environ.

Granite B : $8,04.10^{-3}$, soit un âge de 566 Ma environ.

L'âge de la couche 3 est donc compris entre 400 et 566 Ma.

Le document 3 permet donc de dire que cette couche date de l'ère primaire (ou juste avant).

Elle peut appartenir au Précambrien, au Cambrien (–540 à –500 Ma), à l'Ordovicien (–500 à –440 Ma), au Silurien (–440 à –410 Ma), ou au tout début du Carbonifère (–410 à –360 Ma).

Là encore, c'est la mise en relation des documents qui permet d'aboutir à un résultat clair. Il ne sert à rien d'analyser dans le détail un document, si l'on ne fait pas les nécessaires recoupements avec les autres données.

Exercice 6

Pour placer les quatre événements dans le temps, relativement les uns aux autres, il nous faut utiliser les principes de la datation relative.

La faille (ce n'est pas, à proprement parler un événement, mais le résultat d'un événement tectonique) est postérieure à la formation de tous les terrains, puisqu'elle les recoupe tous.

La phase de plissement est postérieure à la formation des calcaire et grès (qu'elle affecte) mais antérieure à la formation des calcaire et molasse qui reposent en discordance sur les terrains plus plissés anciens.

La surface d'érosion est postérieure à la formation des calcaires à rudistes, mais antérieure aux dépôts fluvio-lacustres.

Enfin le dépôt de calcaires et grès est antérieur au plissement et à la faille (qui le recoupe). Il recouvre les dépôts fluvio-lacustres (et il leur est donc postérieur) mais est recouvert par le dépôt de calcaires et molasse (il est donc antérieur à ce dépôt).

La chronologie est donc :

[Dépôt du calcaire à rudistes, en milieu marin]

Erosion du calcaire marin à rudistes (après émergence)

Nouvelle phase sédimentaire, avec, en particulier dépôt des calcaires et grès

Plissement

[Erosion puis dépôt de la couche de calcaires et molasse]

Faille [faille inverse ici, dans un contexte compressif]

Il ne faut utiliser du document que ce qui est nécessaire à la résolution du problème (dater relativement les quatre événements proposés). Il est inutile de citer (et à plus forte raison de détailler) les principes utilisés. Il faut les appliquer ! Entre crochets figurent des éléments dont nous n'avons normalement pas à parler, puisque cela ne constitue pas un élément de réponse à la question posée.

Couplage des événements biologiques et géologiques au cours du temps

Devant une frise chronologique présentant l'histoire de la Vie sur Terre, on peut s'imaginer que cette histoire se déroule de manière régulière et continue. Des espèces disparaissent en permanence et de manière régulière semble-t-il, tandis que d'autres espèces apparaissent, là encore de manière régulière (notons tout de suite qu'il n'est pas besoin qu'une espèce disparaisse pour qu'une autre apparaisse).

Cependant, cette vision continue et graduelle de l'évolution de la vie n'est pas toujours confirmée par les archives fossiles et a été remise en cause à plusieurs reprises. Il semble, en effet, que l'évolution biologique puisse se dérouler par à-coups, ces derniers pouvant être liés à des phénomènes géologiques brutaux et de grande ampleur.

NOTION DE CRISE BIOLOGIQUE : LA CRISE CRETACE-TERtiaIRE

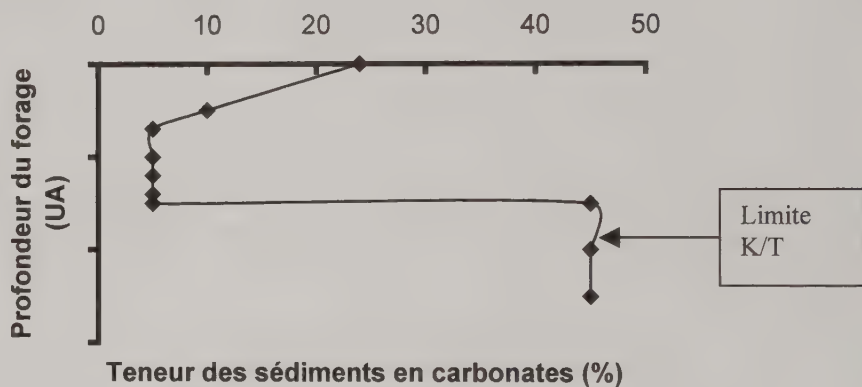
L'étude des fossiles trouvés dans les roches datées de la fin du Secondaire (Crétacé) et du début du Tertiaire (paléocène, la limite entre ces deux périodes étant située à - 65 Ma), montre qu'il s'est produit à cette époque un important renouvellement des espèces vivantes. L'exemple le plus « médiatique » de ce phénomène est la disparition des dinosaures. Les changements faunistiques caractéristiques de cette période (nommée limite K/T) ont été décrits dès le XIX^e siècle. Les bouleversements de la limite K/T présentent des caractéristiques précises.

► Un caractère massif

La limite K/T correspond à une phase d'extinction massive des espèces : totalité des dinosaures, des ichtyosaures, des ammonites, des belemnites, des rudistes, majorité des foraminifères planctoniques (les globotruncanidés disparaissent), des requins, des raies... Au total, ce sont 15% environ des familles animales qui disparaissent ainsi lors de cette transition Secondaire-Tertiaire.

► Cette extinction massive est brutale

S'il est vrai que des espèces disparaissent en permanence de la surface de la Terre, les extinctions caractéristiques de la crise K/T sont particulièrement brutales. Les changements sont visibles, dans les archives fossiles, sur des épaisseurs de quelques centimètres seulement, ce qui est très bref, à l'échelle géologique bien sûr. La chute brutale de la teneur en carbonates (d'origine biologique) des sédiments en est un exemple frappant. On constate de plus que, sur le plan géologique, outre la chute de cette teneur en carbonates, la limite K/T correspond à une mince couche d'argile riche en Iridium (cette couche est un marqueur de la limite K/T), surmontant les craies du Maastrichtien (fin du Secondaire) et surmontée par les marnes du Danien (début du Tertiaire). Un brusque changement du régime sédimentaire s'est donc produit à cette période.



Brusque chute dans la sédimentation carbonatée à la limite Crétacé-Tertiaire (– 65 Ma). UA = Unités arbitraires. Les sédiments les plus profonds sont, d'après le principe de superposition, les plus anciens. Le temps s'écoule donc, ici, du bas vers le haut.

Il faut toutefois remarquer que le rythme de ces extinctions n'est pas le même selon le groupe considéré. Si de nombreuses espèces disparaissent bien brutalement à la limite Crétacé-Tertiaire, le déclin est plus progressif pour d'autres groupes. C'est par exemple le cas des ammonites, dont la diversité diminue dès la moitié du crétacé. C'est également le cas des rudistes dont le déclin est amorcé deux millions d'années avant la limite K/T.

► Cet événement est planétaire

La couche d'argile caractéristique de cette période, ainsi que les changements faunistiques qui lui sont associés se retrouvent sur tous les continents (par exemple : Bidart, France ; El Kef, Tunisie ; Hells Creek, Etats-Unis, ...). L'événement survenu à la limite K/T a donc eu une ampleur suffisante pour affecter l'ensemble de la planète.

Loin de n'être qu'un phénomène local isolé, c'est un phénomène aux conséquences planétaires.

On parle d'une crise mondiale.

► Cet événement affecte des groupes systématiques très variés

Comme nous l'avons précédemment vu, la crise Crétacé-Tertiaire ne touche pas que les dinosaures, même si ce fait est le plus connu. De très nombreux groupes, animaux et végétaux sont affectés par cette crise :

- * Organismes de grande taille (c'est le cas de nombreux dinosaures, d'ammonites,...) ou de petite taille (microorganismes planctoniques).

- * Organismes animaux (dinosaures, ammonites, rudistes, ...) et végétaux (les gymnospermes par exemple, s'ils ne disparaissent pas totalement sont néanmoins très touchés).

- * Organismes continentaux (dinosaures, gymnospermes,...) ; marins (ammonites, bélemnites, foraminifères...) ; aériens (ptérosaures).

- * Organismes herbivores ou carnivores.

La diversité des espèces touchées par cette crise suppose une cause générale de grande ampleur, et ne peut pas être expliquée par des causes particulières à chaque groupe.

► Suite à cette crise se produit un important renouvellement des espèces

Lors du passage de la crise, les groupes (animaux ou végétaux) considérés, peuvent présenter des sorts différents.

Certains groupes disparaissent totalement, au moment de la crise (parfois un peu avant) : groupes éteints (exterminés).

D'autres parviennent à franchir le cap difficile, se développent mais ne survivent finalement pas longtemps : groupes profiteurs.

D'autres encore semblent disparaître lors de la crise, puis réapparaissent par la suite, alors qu'ils pouvaient passer pour éteints : groupes fantômes (ou groupes « Lazare »). Il s'agit de groupes très affectés par la crise et dont le faible nombre de survivants n'a pas permis de laisser de traces fossiles pendant quelques centaines de milliers d'années.

Enfin, les groupes survivants, même s'ils ont parfois été touchés par la crise, ont pu franchir la limite K/T. On peut les voir alors se diversifier considérablement. C'est, par exemple le cas des mammifères et des oiseaux dans le cas de cette crise K/T. Il se produit un remplacement des espèces éteintes par les survivants.

La faune (et, dans une moindre mesure ici, la flore) que l'on peut trouver après la crise est donc assez différente de celle qui précédait la crise.

La **crise Crétacé-Tertiaire**, il y a 65 millions d'années, nous donne un exemple de ce que peut être une **crise écologique** majeure : la disparition **brutale et massive d'organismes très variés**, à l'échelle **planétaire**, suivie d'un **renouvellement** rapide des formes vivantes. Il s'agit d'une coupure dans l'histoire de la Terre.

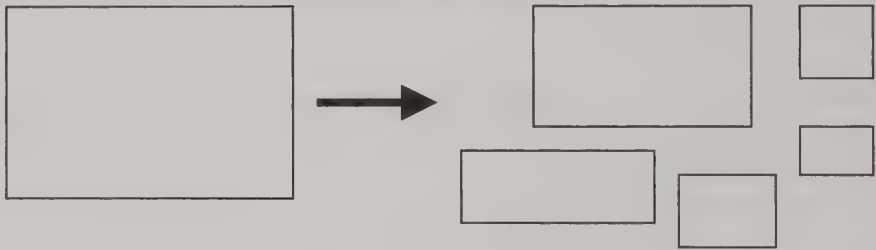
► Causes et scénarios envisageables pour cette crise K/T

Au vu de la brutalité de l'extinction, de son caractère massif et mondial, les causes envisagées doivent avoir une portée générale et doivent pouvoir engendrer des conséquences planétaires rapides.

Des causes locales, ou caractéristiques d'un unique groupe ne sauraient donc convenir ici. On a, par exemple, invoqué le développement des angiospermes (plantes à fleurs, la plupart produisant des substances toxiques) pour expliquer la disparition des dinosaures (les herbivores auraient alors été empoisonnés). Pourquoi pas ? Mais cela n'explique en rien la disparition des ammonites, des bélemnites, la raréfaction du plancton marin, la survie d'autres herbivores, etc.

Envisageons quelles sont les causes qui ont pu avoir un fort impact :

*** Tectonique des plaques :** au début de l'ère Secondaire, les continents sont réunis et forment une vaste pangée. Celle-ci subit une dislocation qui débute au Trias (début du Secondaire). Cette activité tectonique se traduit par une augmentation de la longueur totale des côtes.



La dislocation d'une masse unique en plusieurs morceaux de taille plus petite (tailles finales ajoutées = taille initiale) se traduit par une augmentation de la longueur totale des côtes.

Cela s'accompagne de variations climatiques (passage de climats continentaux à des climats océaniques par exemple), de variations du niveau et de la salinité des océans (forte régression),... qui ont pu gravement perturber l'équilibre écologique de la planète.

Ces perturbations ne doivent cependant s'être produites que sur des temps assez longs, et non de manière très ponctuelle, ce qui n'explique que très imparfaitement la brutalité de la crise Crétacé-Tertiaire.

Elles ont néanmoins pu affecter la vie sur Terre de manière importante et sont peut-être impliquées dans les disparitions d'espèces qui se sont produites à un rythme lent avant la crise.

La recherche d'autres causes possibles, plus brutales, passe par le constat suivant : l'une des principales caractéristiques géologiques de la limite Crétacé-Tertiaire est l'anomalie sédimentaire que représente la couche d'argile précédemment décrite, qui sert de repère temporel pour cette crise.

Cette couche d'argile est riche en cendres, suie et en éléments inhabituels tels que Iridium, quartz choqués sphérules de verre et spinelles nickélifères.

L'Iridium : sa teneur dans la croûte terrestre est très faible. Il est, en revanche plus abondant dans les laves issues du manteau, et, plus encore dans les météorites.

Les quartz choqués sont les témoins d'une compression énorme.

Les sphérules de verre sont le résultats d'une fusion de roches.

Les spinelles nickélifères (ou magnétites nickélifères) ne sont produites que par oxydation de roches riches en Nickel, dans des conditions que l'on ne rencontre pas à la surface de la Terre. En revanche une production dans l'atmosphère est tout à fait envisageable.

L'existence de ces caractéristiques nous conduit donc à deux pistes de recherche : une origine volcanique et une origine extra-terrestre (météorite par exemple) pour la crise Crétacé-Tertiaire.

*** Recherche d'un événement volcanique :** la fin de l'ère Secondaire est caractérisée par une intense activité tectonique. Il se produit un important volcanisme, en particulier au niveau d'un point chaud très actif, se trouvant actuellement au dessous de l'île de la Réunion. Il y a 65 millions d'années, ce point chaud se trouvait en dessous de l'Inde (qui migrerait vers l'Asie). Il se produit alors un volcanisme intense, avec une émission considérable de magma basaltique ayant donné naissance à un empilement de laves gigantesque = les trapps du Deccan. Ces laves s'empilent sur une épaisseur moyenne de 2400 m et la surface sur laquelle elles s'épanchent est voisin de 1 million de km² (soit presque deux fois la superficie de la France). Cette intense activité volcanique dura environ 1 million d'années et ces laves furent datées de la limite Crétacé-Tertiaire, grâce à la méthode Potassium/Argon.

Les conséquences de cette énorme émission de gaz et de cendres dans l'atmosphère ont dues être terribles pour le climat. Si l'on songe que des éruptions récentes (Krakatoa, Pinatubo, El Chichon...) infiniment moins intenses que le volcanisme du Deccan, ont provoqué des baisses de température mesurables à la surface de la Terre, on n'ose imaginer la catastrophe climatique qu'a dû provoquer ce volcanisme.

En fait, les répercussions sont doubles : dans un premier temps, l'obscurcissement de l'atmosphère, en gênant la pénétration des rayons solaires, a dû provoquer un refroidissement. Dans un second temps, les gaz accumulés dans l'atmosphère et ayant un effet de serre (méthane, dioxyde de carbone, par exemple) vont agir et la température va alors s'élever.

Le résultat est que, de toutes manières, le climat a subit au cours de cette période des variations importantes qui ont dues être fatales à un certain nombre d'espèces, en particulier celles qui ne pouvaient réguler leur température interne.

De plus, l'obscurcissement de l'atmosphère par les cendres et gaz émis par l'activité volcanique du Deccan a dû avoir un effet sur l'intensité de la photosynthèse, alors fortement diminuée. Outre les végétaux eux-mêmes qui durent souffrir (voire disparaître) du fait de cette baisse, on peut également imaginer de graves perturbations pour l'ensemble des chaînes écologiques (herbivores puis carnivores touchés).

Ce phénomène n'est pas surréaliste, les laves sont là pour en témoigner et les conséquences de cet événement sur les organismes vivants doivent avoir été considérables. Cependant, ce volcanisme reste encore assez étalé dans le temps (bien que un million d'années soit assez bref à l'échelle géologique), et il reste encore des éléments inexplicables parmi les anomalies stratigraphiques observées dans la couche d'argile de la limite K/T.

*** Recherche d'un événement de type impact météoritique**

Nous avons précédemment dit que les météorites sont riches en Iridium, et que la couche d'argile caractéristique de la limite K/T l'est également. Ce constat conduisit L. Alvarez à proposer, en 1979, que la teneur en Iridium anormalement élevée de cette couche d'argile soit liée à un impact météoritique. Cette hypothèse – qui fut loin de faire d'emblée l'unanimité – a le mérite d'apporter des explications non seulement à la présence forte d'Iridium, mais également à la présence de quartz choqués, des sphérules et des magnétites nickélifères, qui proviendraient d'une oxydation d'un corps riche en nickel dans la haute atmosphère terrestre.

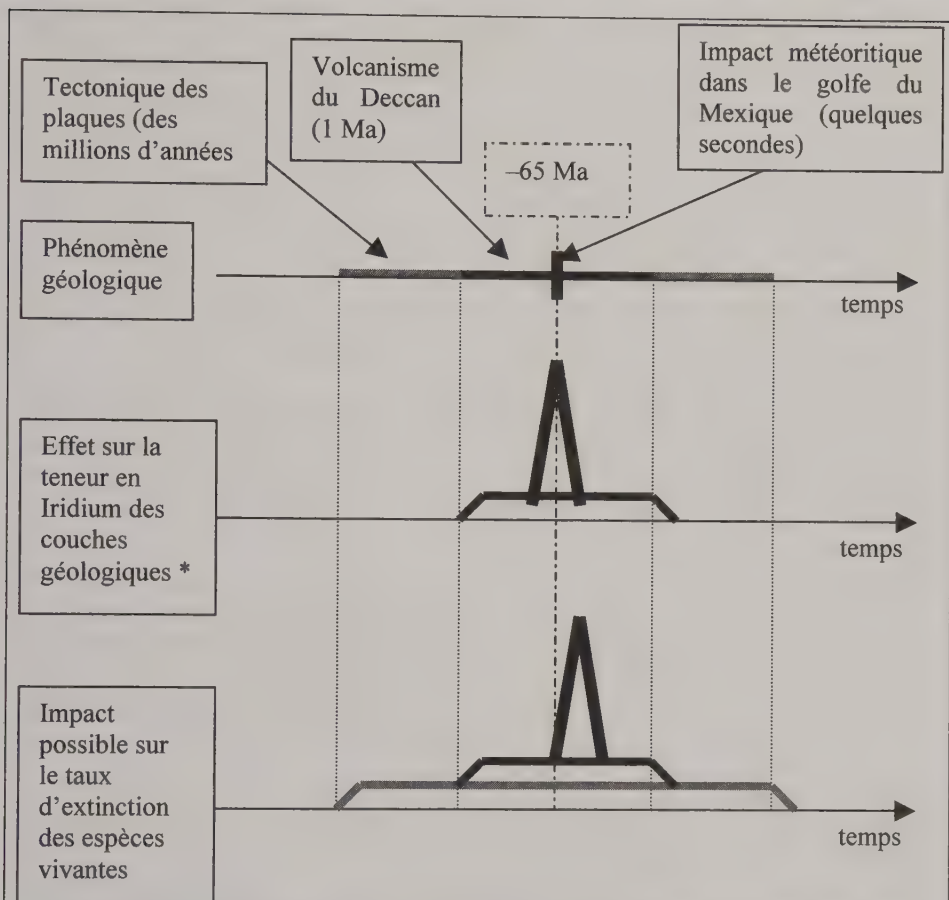
A présent, cette hypothèse est validée, en particulier par la découverte d'un cratère d'impact, datant de – 65 Ma, dans le golfe du Mexique (Chicxulub). D'après les mesures et les modélisations qui ont été faites, ce cratère serait la conséquence de l'impact d'un objet de 10 km de diamètre environ, ayant frappé la Terre à une vitesse de quelques dizaines de km par seconde. Outre l'impact, en lui-même dévastateur par son intensité, capable de détruire toute forme de vie à proximité, les conséquences ont, là encore, dû être terribles : raz de marées, incendies (avec rejet de gaz carbonique, de suie et de cendres), projection dans l'atmosphère de poussières et débris...

D'importantes répercussions sont, évidemment, prévisibles sur le climat et la photosynthèse.

Cet événement, par sa brutalité, correspondrait parfaitement au caractère brusque de l'extinction.

Nous disposons donc de faits probants concernant les causes probables de la crise Crétacé-Tertiaire. Les différentes hypothèses évoquées précédemment ne s'excluent pas mutuellement et il est tout à fait probable que la crise Crétacé-Tertiaire soit finalement la conséquence d'une conjonction purement accidentelle de différents phénomènes géologiques fortuits, terrestres ou extra-terrestres.

L'ensemble peut être schématisé (schéma purement descriptif, unités arbitraires) :



Enchaînement des causes de la crise K/T et leurs répercussions possibles.

(* : on ne peut exclure que le taux assez important d'Iridium dans les couches sédimentaires au dessus et au dessous de la limite K/T soit lié à une diffusion de cet élément après son dépôt).

Ce modèle explicatif incluant des causes diverses permettrait de prendre en compte l'ensemble des données relatives à cette période (rythme inégal des extinctions selon l'espèce considérée, anomalie sédimentaire, teneur en Iridium, quartz choqués, magnétites nickélifères, cratère d'impact, trapps du Deccan...).

► Conséquences de cette crise K/T sur l'histoire de la vie

Les différents groupes d'organismes vivant à la surface de la Terre ont été diversement affectés par la crise K/T. Les groupes survivants ont eu de la chance. En effet, il semble que rien ne prédestinait ces groupes à mieux résister à la crise (de même que rien ne semble prédestiner les groupes éteints à disparaître). Ces disparitions semblent être le résultats d'une contingence, c'est-à-dire une conjonction de phénomènes aléatoires. Cela signifie que, si l'on peut expliquer *a posteriori*, la disparition de certains groupes (par rupture de chaînes alimentaires, changements drastiques des

conditions environnementales, ...), on ne pouvait pas prévoir, *a priori*, quels groupes allaient disparaître. En d'autres termes, si l'on suit le paléontologue (disparu) S. J. GOULD, si l'on revenait en arrière dans l'histoire de la vie, il y a toutes les chances pour que le scénario ne soit pas du tout le même (car il n'y a aucune raison pour que les mêmes phénomènes géologiques aléatoires se reproduisent de la même façon, au même moment, avec la même intensité), et nous ne serions donc pas là pour interroger sur cette histoire biologique.

L'espèce humaine (et beaucoup d'autres) apparaît donc comme le fruit d'une contingence, l'évolution se montrant alors non dirigée vers le but précis que serait l'espèce humaine.

Quoiqu'il en soit, les groupes survivants vont alors subir un phénomène de radiation adaptative. En effet, ils vont coloniser les niches écologiques laissées vacantes par les espèces disparues. Ils investissent ainsi des environnements très variés auxquels ils n'avaient jusque là pas accès du fait de la dominance d'autres groupes.

Étudions, par exemple, le cas des mammifères. Ceux-ci sont apparus il y a environ 250 millions d'années, d'ancêtres reptiliens. Au moment de la crise Crétacé-Tertiaire, cela fait donc près de 200 millions d'années que les mammifères existent. Cependant, à l'ère Secondaire, ce sont principalement les dinosaures qui sont devenus le groupe dominant sur les continents. De manière générale, le Secondaire est l'ère des reptiles, qui ont colonisé tous les milieux : terrestre (dinosaures, crocodiles,...), aquatique (ichtyosaures) et aérien (ptérosaures). Leurs modes de vie sont très variés dans ces différents milieux (petits et grands, herbivores ou carnivores,...).

Dominés sur les continents par les puissants dinosaures, les mammifères en sont alors réduits à occuper des niches écologiques restreintes (vie nocturne, de petite taille, habitant dans des terriers). Ils sont bien adaptés à leur milieu mais ce milieu étant peu diversifié, ils sont eux-mêmes assez spécialisés et donc peu diversifiés.

À la mort des dinosaures (que rien ne destinait à ce sort malheureux, il faut le rappeler), les mammifères vont occuper les niches écologiques ainsi libérées et ils vont alors se diversifier fortement. Alors que cette diversification était restée très limitée pendant des dizaines de millions d'années, elle explose littéralement après la disparition des dinosaures.

En quelques millions d'années, tous les groupes actuels de mammifères apparaissent et ils deviennent un groupe dominant sur Terre, occupant à leur tour tous les milieux (continental pour la plupart, mais également aquatique avec baleines, dauphins etc., et aérien avec les chauves-souris).

Comme dit précédemment, la grande diversité actuelle que connaissent les mammifères est donc le résultat de la disparition des dinosaures et résulte donc d'une conjonction aléatoire d'événements.

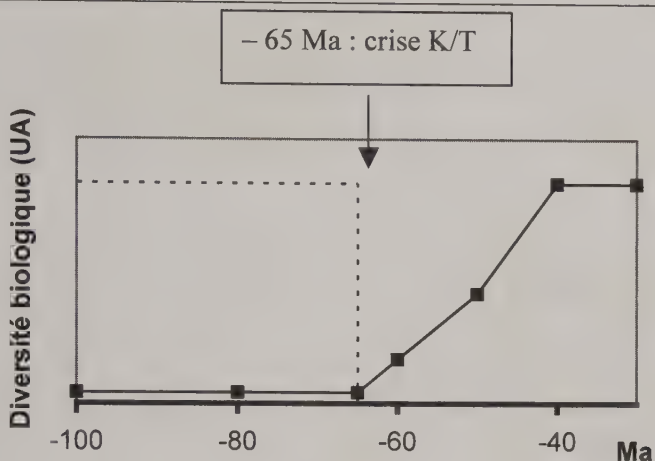
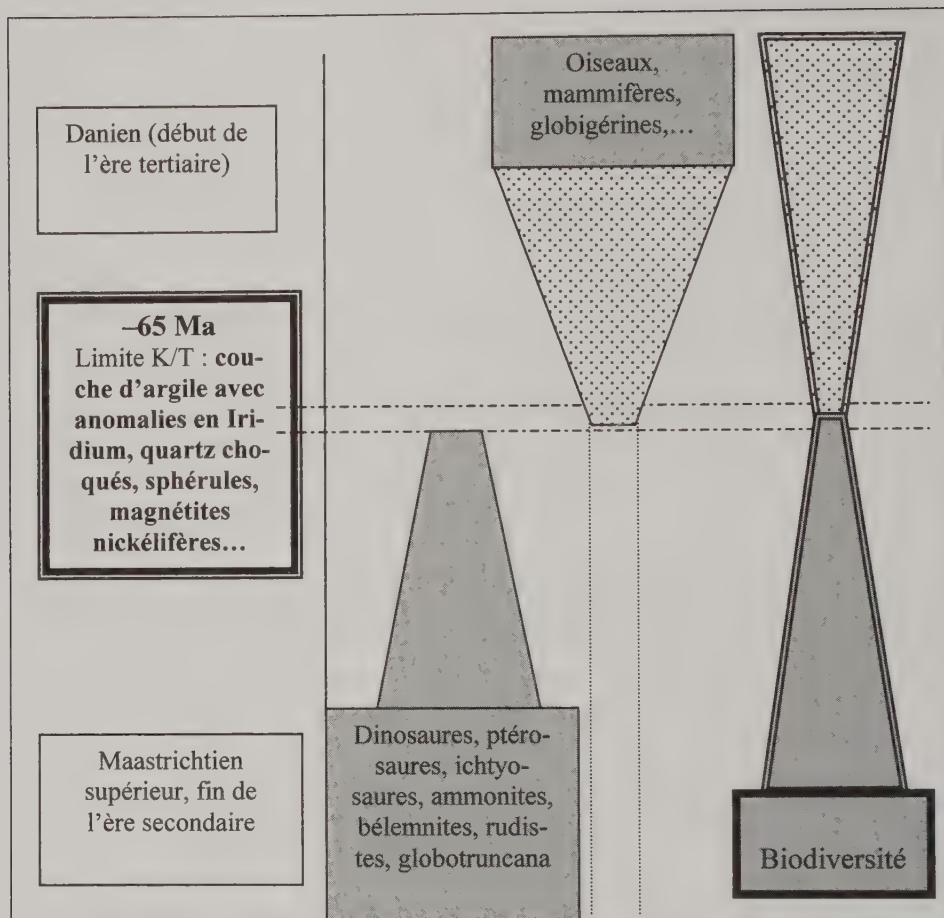


Illustration théorique de la radiation adaptative des mammifères suite à l'extinction des dinosaures il y a 65 millions d'années.

Alors que les dinosaures (tirets) disparaissent brutalement, les mammifères (trait plein + carrés), de manière opportuniste, se diversifient en colonisant des niches écologiques auxquelles ils n'avaient pas accès. (UA = Unités Arbitraires).

Les mammifères ne sont pas les seuls à profiter de l'extinction massive de la fin du Secondaire. Les oiseaux constituent également un bon exemple de radiation adaptative à cette période. En milieu marin des microorganismes tels que les globigérines vont également profiter de la crise et, tout particulièrement de la disparition des espèces du genre globotruncana.

Un résumé des modifications faunistiques et floristiques est proposé à la page suivante.



Extinctions (en grisé) et radiations adaptatives (quadrillage) à la limite Crétacé-Tertiaire.

► Les crises biologiques, repères dans l'histoire de la Terre

L'analyse des archives paléontologiques permet de généraliser la notion de crise biologique (ou écologique). En effet, l'histoire de la Terre est ponctuée de périodes brèves d'extinction massive et planétaire. Si la crise Crétacé-Tertiaire est la plus connue, elle n'est cependant pas la plus meurtrière.

La plus grave crise qu'ait eu à traverser la vie sur Terre se situe en effet à la limite entre le Permien et le Trias, soit à la limite entre l'ère primaire et l'ère Secondaire, il y a 250 millions d'années environ. Lors de ce passage du primaire au Secondaire, ce sont près de 90 % des espèces qui disparaissent (les trilobites par exemple ne survivent pas à la crise). Là encore, à cette brutale extinction, sont associés des phénomènes géologiques tels qu'un volcanisme intense (trapps de Sibérie) et un impact météoritique (cratère identifié au Canada). Des causes semblables semblent donc avoir eu un effet comparable.

De plus, suite à la disparition brutale, planétaire, d'un grand nombre d'espèces, il se produit une radiation adaptative des groupes survivants (les reptiles vont en profiter tout particulièrement, et on peut songer que les dinosaures ne se seraient eux-mêmes peut-être pas autant diversifiés sans cette crise).

D'autres crises sont encore décrites, ponctuant l'histoire de la vie sur Terre de bouleversements profonds (extinctions puis radiations adaptatives). Ces crises sont toujours occasionnées par une conjonction de phénomènes géologiques aléatoires qui, pris isolément n'auraient pas eu cet impact. Le volcanisme n'est pas rare, les continents se déplacent sans cesse, le niveau des océans et le climat varient en permanence à l'échelle géologique et les impacts météoritiques, s'ils sont peu fréquents se sont tout de même répétés à plusieurs reprises. Ces phénomènes peuvent avoir des effets limités sur la faune et la flore. Mais lorsque ces effets s'additionnent, il peut se produire une crise majeure, du fait d'un changement radical des conditions de vie (de l'environnement).

Il apparaît donc que l'histoire géologique de la terre a eu une influence considérable sur le déroulement de l'évolution biologique, c'est en cela qu'il y a couplage entre les événements géologiques et biologiques au cours de l'histoire naturelle de la planète.

Les bouleversements engendrés par ces crises sont si importants que ces dernières servent de repères dans l'histoire de la vie. C'est parce qu'un changement brutal et radical de la faune et de la flore s'est produit il y a 250 millions d'années par exemple, qu'il a été décidé de considérer qu'à ce moment une page de l'histoire de la terre était tournée et que l'on y a placé la transition Primaire-Secondaire.

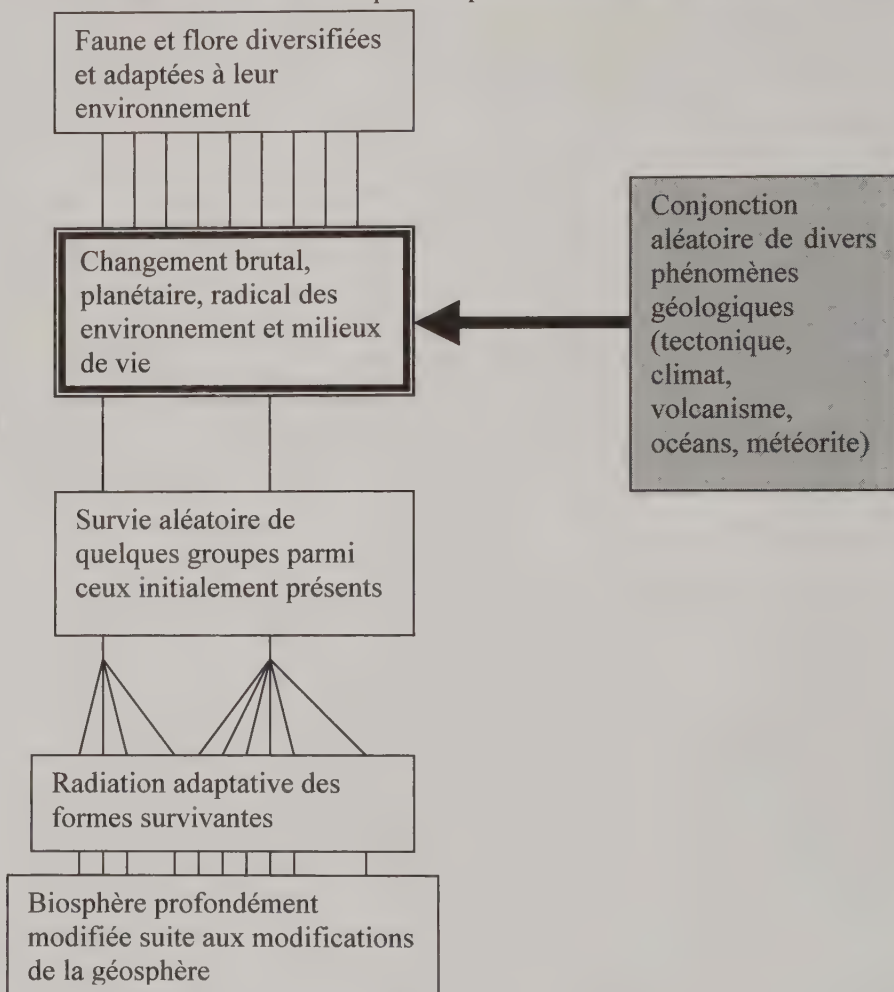
Ces marqueurs temporels ont été utilisés (sur la base des changements faunistiques et floristiques) pour subdiviser l'histoire de la Terre bien avant que leur âge ne soit connu avec précision.

On décrit classiquement cinq crises majeures depuis l'ère primaire : crise Ordovicien-Silurien (-440 Ma) ; crise Dévonien-Carbonifère (-360 Ma) ; crise Permien-trias (-250 Ma) ; crise Trias-Jurassique (-205 Ma) et crise Crétacé-Tertiaire (-65 Ma).

La première grande crise écologique de l'histoire de la terre a dû survenir après l'apparition des premiers êtres photosynthétiques, libérant de l'oxygène dans l'environnement. De nombreuses espèces, incapables de survivre dans cet environnement oxydant ont dû périr.

L'atmosphère s'en est trouvée modifiée, ce qui montre que si les événements géologiques peuvent influencer le déroulement de l'histoire biologique, l'inverse est également vrai.

Ces événements et leurs conséquences peuvent ainsi être résumés :



Modèle schématique explicatif d'une crise écologique et de ses conséquences.

▶ Une nouvelle crise possible

L'Homme est un produit récent de l'histoire biologique. Par ses activités, il modifie considérablement l'environnement dans lequel il évolue. Des espèces ont déjà été éliminées (le Dodo, par exemple). D'autres sont en voie d'extinction ou en grand danger, du fait d'une chasse trop intensive pour des motifs variés (gorilles, baleines, requins,...).

Les activités humaines polluantes (rejet de gaz à effet de serre dans l'environnement, utilisation de pesticides...) ou mutilantes (déforestation) ont pour effet de gravement nuire à l'équilibre écologique de la planète (réchauffement du climat, pollution des eaux,...) et il est tout à fait possible que ces effets puissent conduire à une véritable catastrophe écologique, redoutée par de nombreux scientifiques. Cela se manifeste par la disparition

de nombreux coraux, la raréfaction d'espèces telles que pandas, gorilles,... et, de manière plus générale, par une réduction de la biodiversité. Il y a donc disparition massive d'espèces, le phénomène, à l'échelle géologique est assez brutal, il est planétaire et touche des espèces variées... bref, c'est une crise écologique majeure qui se profile.

La particularité de cette crise, par rapport aux crises passées, est qu'elle est, en partie au moins, prévisible...

Il faudrait donc ajouter à la liste des causes possibles pour les extinctions majeures, une cause récente : l'action anthropique.

▴ Enoncés des exercices ▾

■ Exercice 1 (10 min)

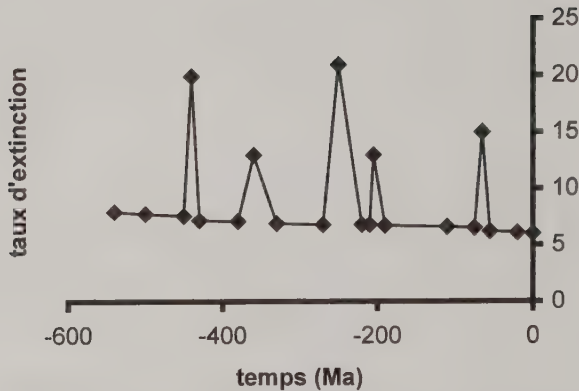
Donnez aux termes suivants une définition concise mais complète.

Crétacé, crise écologique, radiation adaptative, anomalie en Iridium, trapps du Deccan, contingence.

■ ■ Exercice 2 : QCM..... (10 min)

Pour chaque question, choisissez parmi les propositions énoncées, celle(s) qui vous semble(nt) exacte(s).

1. Les crises écologiques majeures se caractérisent par :
 - a) Leur brutalité
 - b) Leur caractère régional
 - c) Leur ampleur
 - d) La diversité des espèces qu'elles touchent.
2. Parmi les causes (directes ou indirectes) possibles de la crise Crétacé-Tertiaire, on peut citer :
 - a) D'importantes variations climatiques
 - b) Une importante régression marine
 - c) Un impact météoritique
 - d) Une augmentation de la photosynthèse
 - e) Un important volcanisme en Sibérie.
3. Le graphique suivant indique le taux moyen d'extinction (en familles par million d'années) depuis l'ère primaire :



- a) Il ne se produit des disparitions qu'au cours des crises
 - b) Il y a cinq crises majeures ici représentées
 - c) La crise la plus importante a lieu il y a 360 Ma environ
 - d) La dernière crise majeure a fait disparaître 20 % des familles environ.
4. La crise Crétacé-Tertiaire se caractérise, sur le plan stratigraphique par :
- a) Une fine couche calcaire
 - b) Une élévation du taux des carbonates dans les sédiments
 - c) Une anomalie en Iridium
 - d) Des éléments tels que quartz choqués, sphérules, magnétites nickélicifères.
5. Les crises écologiques majeures :
- a) Il s'en est produit une centaine depuis le Cambrien
 - b) Elles résultent de conjonctions de causes aléatoires
 - c) Elles entraînent une chute irrémédiable de la biodiversité
 - d) Sont des marqueurs temporels servant de repères dans l'histoire de la Terre.
6. Ils ont disparu lors de la crise Crétacé-Tertiaire :
- a) Les ammonites
 - b) Les dinosaures
 - c) Les trilobites
 - d) Les globotruncanidés
 - e) Les bélemnites
 - f) Les rudistes
 - g) Les globigérines

■ ■ Exercice 3 (20 min)

En sortant d'une conférence sur l'évolution, ces commentaires du public ont été entendus :

– « C'est tout de même curieux cette coïncidence : les crises écologiques se produisent toujours, comme par hasard, à la fin d'une période géologique, comme si elles attendaient que ce soit le bon moment... »

– « J'ai enfin compris ce qu'est une crise : c'est quand les dinosaures disparaissent parce qu'ils sont devenus trop gros par rapport à la taille de leur cerveau. »

Vous êtes justement dans le public. Grâce à vos connaissances, expliquez à ces deux personnes que leur vision des choses n'est peut-être pas la plus juste.

■ ■ Exercice 4..... (30 min)

Pour illustrer la notion de contingence, on peut employer l'analogie (un peu tirée par les cheveux, il faut l'admettre) suivante :

Un groupe de scientifiques lutins décide d'étudier les effets de l'enfermement prolongé sur les individus atteints de diabète (après tout, si ça les amuse...). A cet effet, ils s'enferment (3 diabétiques, dont deux femmes, et 2 non diabétiques à savoir : un médecin et sa femme infirmière, tous deux à la retraite) dans une grotte aménagée. Leur isolement doit durer six mois et tout est prévu pour tenir (aliments en quantité largement suffisante pour tenir un an, y compris de nombreux sacs de haricots secs, eau...). Ils emportent également avec eux un couple de chats et un couple de souris (pour nourrir les chats) et des graines de tournesol (pour nourrir les souris).

Une semaine après leur enfermement, la foudre s'abat sur une centrale nucléaire. Le gardien, encore dans les vapeurs de la fête qu'il avait fait la veille, réagit trop tardivement et se trompe de bouton. La centrale explose et, les vents étant ce jour là capricieux, tout le nuage radioactif envahit le pays lutin et la vie disparaît (à l'exception des lutins enfermés dans leur grotte).

Un an après la catastrophe, ils ressortent (à l'exception du vieux médecin et de sa femme qui n'ont pu supporter les privations) et, constatant les dégâts, ils décident de repeupler le pays lutin.

Quelques décennies plus tard, des explorateurs parvenus au pays lutin le décrivent comme « désolé, très pauvre en biodiversité, peuplé uniquement de haricots, tournesol, souris, chats et lutins diabétiques ».

1. Comment expliquer rétrospectivement le fait que le pays lutin ne contienne que ces espèces ?
2. Ces individus étaient-ils les mieux armés pour la survie, dans des conditions normales ?

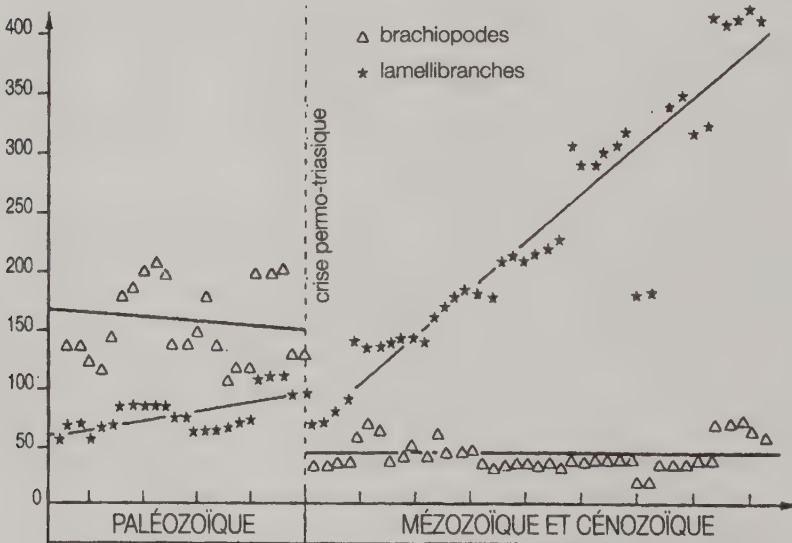
3. Quels sont, dans cette histoire, les paramètres prévisibles ou obligatoires ? Si l'on remonte le temps jusqu'au début de l'histoire et qu'on la laisse à nouveau se dérouler, se répétera-t-elle de la même façon ?

■ Exercice 5..... (20 min)

Le graphique suivant présente l'évolution du nombre de brachiopodes et de lamellibranches au cours des temps géologiques.

Les animaux de ces deux groupes, protégés par une coquille à deux valves, vivent dans les mêmes milieux. Ils reposent par une de leur valves sur le fond, dans le domaine marin peu profond (zone néritique).

Nombre de genres



(D'après Gould et Calloway)

Quels éléments caractéristiques d'une crise écologique ce graphique permet-il d'illustrer ?

Quels éléments ne permet-il pas de mettre en évidence ?

(Adapté d'après bac. 96, Antilles).

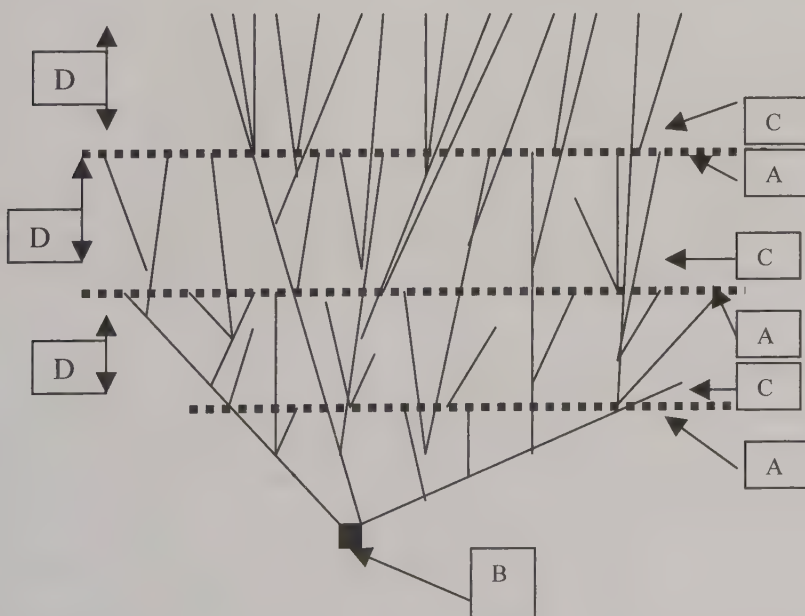
■ Exercice 6..... (20 min)

On a longtemps représenté l'évolution par l'image d'un arbre buissonnant, dans lequel diversité et complexité augmentent régulièrement au cours du temps.



Avec la théorie des équilibres ponctués S. J. Gould propose une autre vision de l'évolution : les espèces restent stables pendant des périodes assez longues, au cours desquelles la biodiversité n'évolue que très peu (phase d'équilibre évolutif). Des changements brutaux apparaissent au cours de cette histoire (= ponctuations), au cours desquelles, en peu de temps, il y a renouvellement des espèces. Au cours de ces périodes brèves, l'évolution et la conservation des espèces semble être le fruit du hasard.

1. En quoi la connaissance des crises écologiques soutient cette vision de l'évolution ?
2. Complétez alors une autre façon de représenter par un arbre, l'évolution de la vie.



■ Exercice 7 (15 min)

Des volcans assez récents ont pu être étudiés et leurs émissions et conséquences mesurées :

El Chichon (Mexique) : 1982, émission de $0,5 \text{ km}^3$ de laves andésitiques et de $2,7 \text{ km}^3$ de gaz, cendres et poussières. Il y eu une baisse de température (faible mais mesurable) au niveau mondial.

Krakatoa (Indonésie) : 1883 : 6 km³ de magma andésitique, 20 km³ de gaz, cendres et poussières. Une baisse de température fut enregistrée dans l'hémisphère nord.

On sait que le volcanisme du Deccan (Inde, -65 Ma) fut particulièrement intense. Les laves s'empilent sur une épaisseur moyenne de 2400 m, sur une superficie voisine de 1 million de km².

Après avoir évalué le volume de laves émises, vous indiquerez un ordre de grandeur du rejet de gaz et vous indiquerez si cet événement a pu avoir un impact (et, dans ce cas, lequel ?) sur la vie terrestre.

D'après vos connaissances, quelle(s) autre(s) cause(s) a (ont) pu être invoquée(s) pour expliquer la crise Crétacé-Tertiaire ?

.....■ CONTROLES ■.....

Exercice 1 (100 min ; 10 pts) Question type I

Au cours de l'histoire de la Terre, des phénomènes liés aux activités des êtres vivants ont pu influencer le déroulement de l'histoire géologique de la planète. Inversement des phénomènes géologiques ont pu influencer sur l'évolution biologique.

L'évolution de la vie a été marquée par des périodes de brusque renouvellement faunistique et floristique (ponctuations de l'évolution), marquées en particulier par la disparition de nombreuses formes de vie. Ces périodes sont des crises écologiques.

Montrez comment des événements géologiques brutaux peuvent avoir des répercussions sur le déroulement de l'évolution biologique. Votre exposé s'appuiera sur des faits constatés à la limite Crétacé-Tertiaire.

Exercice 2 (40 min ; 4 pts) Question type II1

Le document ci-après (tableau) présente le nombre de gisements à mammifères et nombre d'espèces de mammifères répertoriés au Crétacé supérieur et au début du Paléocène, c'est-à-dire de part et d'autre de la crise K/T.

		Europe	Asie	Amérique du nord	Amérique du Sud	Afrique
Paléocène	Gisements	5	125	100	20	1
	Espèces	59	113	450	50	23
Crétacé supérieur	Gisements	6	80	40	6	0
	Espèces	9	20	160	27	0

On précise également qu'au Crétacé supérieur, les sites à dinosaures sont nombreux et riches, alors qu'ils sont totalement absents à partir du Paléocène.

Question : en utilisant ce document, montrez qu’une crise écologique s’accompagne d’un renouvellement de la biosphère.

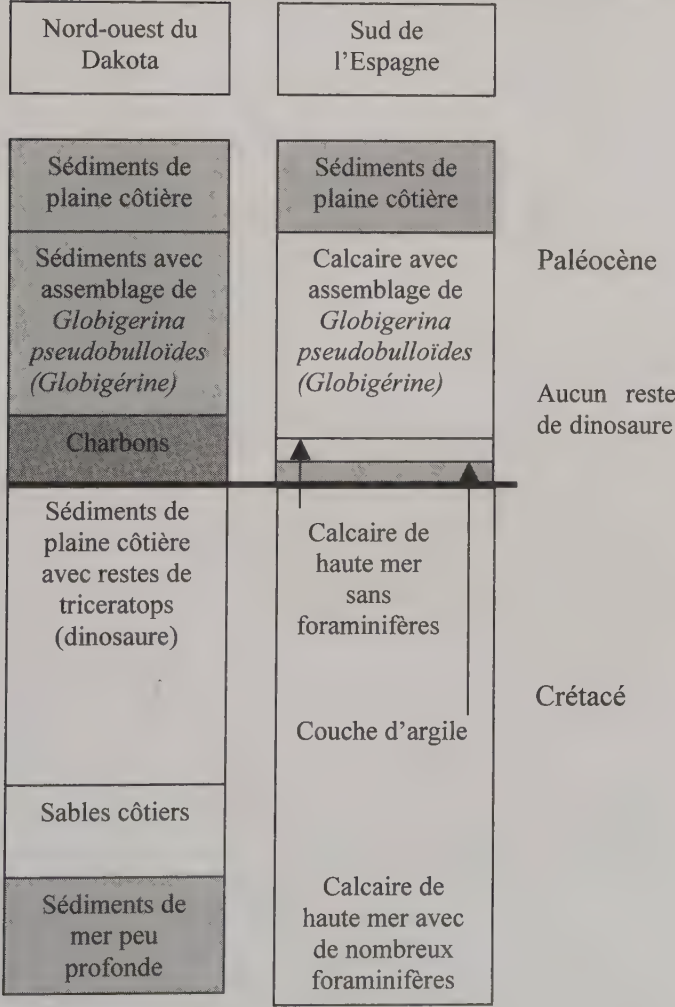
(Modifié, d’après bac. Antilles Guyane 97)

Exercice 3 (40 min ; 4 pts) Question type II1

Le document suivant présente la succession des strates et de leur contenu de part et d’autre de la limite Crétacé-Paléocène dans deux sites : un terrestre (Dakota, Amérique du Nord), un marin (sud de l’Espagne).

Montrez que les renseignements présentés dans ce document sont en accord avec l’existence d’une crise écologique à la limite Crétacé-Tertiaire.

(Modifié d’après bac. Etranger, 98 et Pondichéry, 2000).



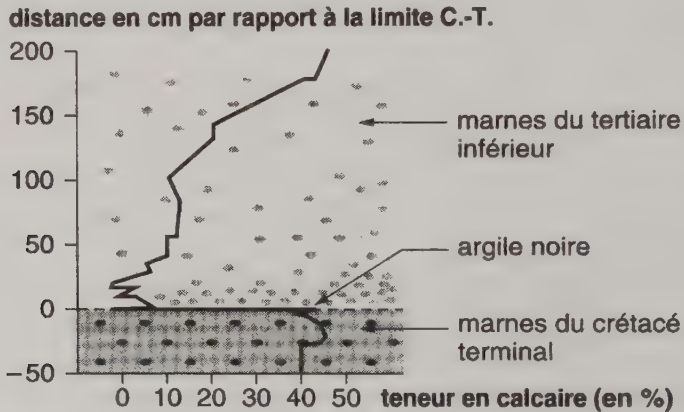
Exercice 4 (60 min ; 6 pts) Question type II2

Les documents ci-après apportent des renseignements sur des événements qui se sont produits à la limite entre l'ère secondaire et l'ère tertiaire.

Document 1 : Série sédimentaire à la limite Crétacé-Tertiaire à El Kef (Tunisie).

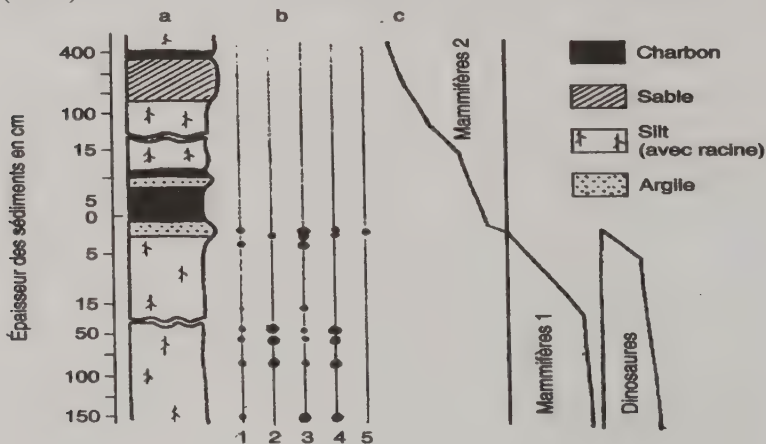
1a : variation de la teneur en calcaire dans la série sédimentaire.

Ce sont les microfossiles, Coccolithes et surtout Foraminifères, qui sont cause de la forte teneur en calcaire des marnes.



1b : Distribution de diverses espèces de Foraminifères planctoniques
Voir page suivante.

Document 2 : Série sédimentaire continentale de Hell Creek au Montana (USA).



Niveau 0 : -65 Ma

Silts = sédiments détritiques très fins

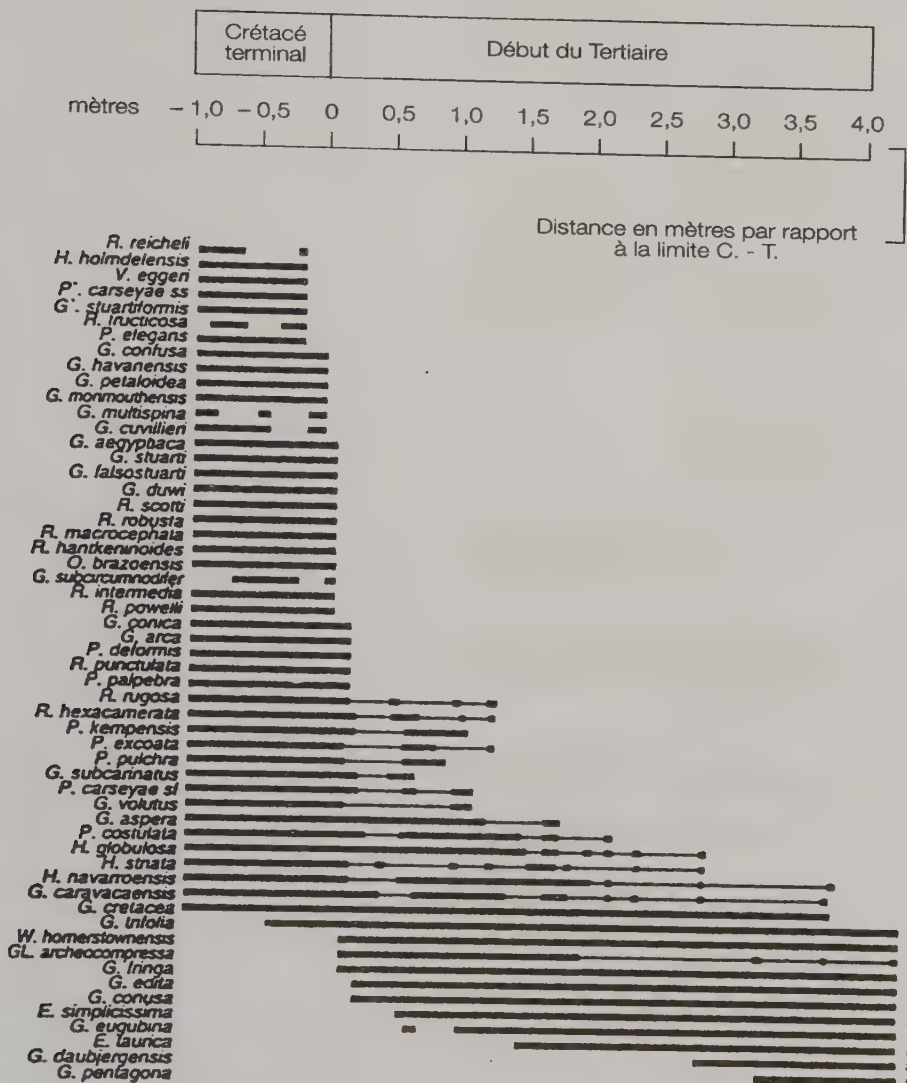
Les mammifères 1 sont différents des mammifères 2.

a : colonne stratigraphique

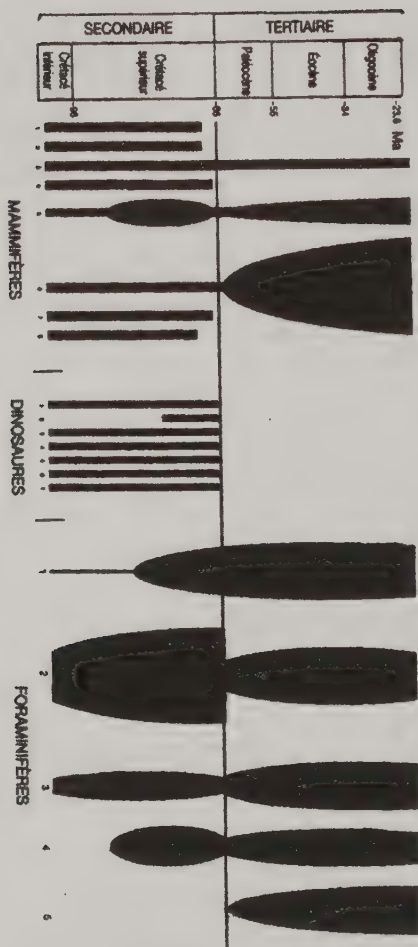
b : Contenu en pollens (la taille des points est proportionnelle à l'abondance)

c : Dinosaures et mammifères

Document 1b



Document 3 : Evolution des taxons au cours du temps. Un taxon est un groupement d'organismes reconnu en tant qu'unité à chacun des niveaux d'une classification hiérarchique : espèce, genre, famille, ordre, classe, embranchement... Leur importance quantitative est représentée par la largeur du figuré (voir page suivante).



D'après Pour la Science (Mars 1982 et juil. 1995) et G. Bignot (Micropaléontologie, Ed. Dunod). Utilisé dans bac. 1997.

Documents d'après bac. 1995 et 1997.

Question : Montrez que ces documents permettent d'affirmer qu'une crise écologique majeure s'est produite à la limite Crétacé-Tertiaire. Vous justifierez également le fait que cet événement a profondément marqué le cours de l'évolution biologique.

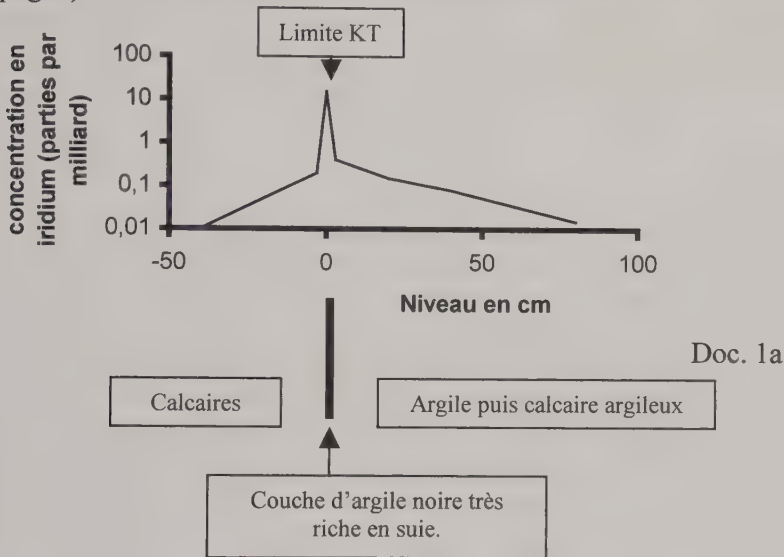
Exercice 5 (60 min ; 6 pts) Question type II2

La limite Crétacé-Paléocène, appelée aussi limite KT, fut marquée par une crise à laquelle on a donné deux origines possibles : volcanique ou météoritique.

Question : Exploitez les données fournies par les documents pour montrer quelle hypothèse elles privilégient. En vous limitant à cette

hypothèse, reconstituez le scénario qui aurait abouti à la disparition de nombreuses espèces.

Document 1 : Données géochimiques sur la série sédimentaire de Caravaca (Espagne) : teneur en iridium



Doc. 1b : Concentration en iridium dans différents échantillons

	Concentration en iridium en μg par kg de matière analysée = en parties par milliard
Croûte terrestre	0,03
Basalte terrestre	0,1
Météorites	500

Document 2 :

Sur le site de Caravaca, en Espagne, on a découvert, dans la couche d'argile caractéristique de la limite KT, des sphérules minérales associées à des grains de quartz choqués.

Les sphérules minérales sont issues de gouttelettes de roches basaltiques qui ont fondu sous un choc et se sont rapidement refroidies lors de leur projection dans la haute atmosphère.

Les grains de quartz choqués présentent des défauts lamellaires caractéristiques. Ces défauts ont été attribués à l'application soudaine d'une pression élevée. On parle de « métamorphisme de choc ».

En 1986, des minéralogistes et géologues découvrirent des minéraux déformés dans la matière éjectée par l'éruption du volcan Toba, en Indonésie.

« Au début des années 1990, des chercheurs de l'université de Lille observèrent au microscope électronique à transmission, des quartz choqués

prélevés dans des cratères d'impacts météoritiques. Les défauts en lamelles ayant été bien identifiés, ils les comparèrent à ceux des quartz de la limite Crétacé-Tertiaire et observèrent les mêmes anomalies. L'étude, avec la même méthode, des quartz déformés du volcan Toba a permis de montrer qu'ils ne contiennent aucun défaut de choc. » (*La Recherche*, déc. 93).

Des magnétites nickélifères, trouvées dans la série sédimentaire de Caravaca ont un degré d'oxydation élevé ayant nécessité une pression en oxygène de 10^{-4} à 1 atmosphère. Dans les magmas, les pressions en oxygène sont inférieures à 10^{-6} atm.

Document 3 :

...« W. Wolbach, I. Gilmore et E. Anders, de l'université de Chicago, ont découvert d'importantes quantités de suie dans l'argile de la limite KT. Si cette argile s'est déposée en quelques années, la suie (noir de fumée mêlé d'impuretés, dû à une combustion incomplète), contenue dans celle-ci serait la preuve de l'embrasement soudain d'une végétation équivalent à la moitié des forêts mondiales d'aujourd'hui. Avec ses collègues de l'université d'Arizona, J. Meos a calculé que le rayonnement infrarouge émis par des projections incandescentes retombant sur Terre peuvent déclencher des incendies sur toute la surface du Globe. »... (*Pour la Science*, Déc. 90).

... « La planète aurait aussi été soumise à d'abondantes pluies acides dues à de l'acide nitrique résultant d'une chaîne de réactions chimiques atmosphériques, déclenchées par l'onde d'un choc et la chaleur d'un impact, ou à de l'acide sulfurique provenant des émissions riches en soufre d'éruptions volcaniques »... (*Pour la Science*, Déc. 90)

(D'après bac. 95, Polynésie 96 et Nouvelle-Calédonie 97)

► Corrigé des exercices ▼

Corrigé 1

Le **Crétacé** est la dernière période (le dernier système) de l'ère Secondaire. Il s'étend d'environ – 135 Ma à – 65 Ma et se termine avec la crise Crétacé-Tertiaire.

Une **crise écologique** correspond à la disparition brutale et massive d'espèces variées (forte diminution de la biodiversité touchant tous les milieux). Elle est planétaire et est suivie d'une radiation adaptative des espèces survivantes. Elle est la conséquence de variations brutales de la géosphère.

La **radiation adaptative** est la diversification rapide d'un groupe animal ou végétal, s'accompagnant d'une apparition importante d'espèces nouvelles (phénomène de spéciation).

L'**anomalie en Iridium** est la teneur anormalement élevée de cet élément, normalement très rare dans les matériaux de la croûte terrestre, que l'on trouve dans la couche d'argile caractéristique de la limite Crétacé-Tertiaire. Il pourrait provenir d'une émission importante de laves (Deccan) ou d'un impact météoritique (les météorites sont riches en Iridium).

Les **trapps du Deccan** constituent en Inde (région du Deccan) une importante accumulation de laves (1 million de km², 2400 m d'épaisseur), émises il y a environ 65 Ma, et ayant participé au déclenchement de la crise Crétacé-Tertiaire. Ces laves furent alors émises alors que l'Inde se trouvait au-dessus d'un point chaud, au dessus duquel se trouve actuellement la Réunion.

Le phénomène de **contingence** est le fait qu'une chose puisse se produire sans qu'il n'y ait aucune obligation qu'elle se produise (la contingence s'oppose alors à la nécessité). Dans le cas de la crise Crétacé-Tertiaire, beaucoup de choses auraient pu ne pas se produire ou se produire à un autre moment (volcanisme, impact météoritique), ou avec une intensité moindre. Les bouleversements biologiques observés auraient alors vraisemblablement été très différents et l'évolution n'aurait alors pas suivi le même cours.

Corrigé 2

question	réponse	Commentaire
1	a, c, d	Une crise majeure se caractérise par son caractère planétaire.
2	a, b, c	Il se produit une baisse de la photosynthèse, du fait de l'obscurcissement de l'atmosphère. Ce sont les trapps du Deccan qui datent de cette période.
3	b	Il se produit des extinctions d'espèces en permanence, mais à un taux habituellement faible et constant. Les crises sont marquées par une forte augmentation de ce taux. La crise la plus importante s'est produite il y a 250 Ma. La dernière crise majeure s'est accompagnée d'une disparition de 15 % des familles environ (– 65 Ma).
4	c, d	La limite K/T se caractérise par une fine couche d'argile et une chute de la sédimentation carbonatée, du fait de la disparition d'une grande partie des microorganismes responsables de cette sédimentation.
5	b, d	Il s'est produit cinq crises majeures depuis le cambrien. Une crise s'accompagne d'une diminution transitoire de la biodiversité, puisqu'elle est suivie d'une importante radiation adaptative.

6	a, b, d, e, f	Les trilobites ont disparu lors de la crise permotriasique. Les globigérines subissent une radiation adaptative lors de la crise K/T (elles ne disparaissent donc pas, au contraire, elles en « profitent »).
---	------------------	---

Corrigé 3

Première affirmation : le problème est posé à l'envers. Il ne s'agit bien sûr pas d'une coïncidence. Les périodes géologiques ont été définies d'après des observations portant sur des phénomènes géologiques ou des changements faunistiques et/ou floristiques passés. Il est donc logique et non surprenant qu'une crise écologique majeure, marquée par un important bouleversement de la vie soit considérée comme le marqueur temporel d'un changement de période géologique.

Deuxième affirmation : tout d'abord, la première partie de l'affirmation (disparition des dinosaures) ne concerne pas **les** crises, mais **la** crise Crétacé-Tertiaire. Ensuite, l'explication qui est donnée pour la crise Crétacé-Tertiaire ne pourrait, au mieux, expliquer que la disparition des gros dinosaures. Elle ne pourrait pas s'appliquer aux petits dinosaures (très nombreux), ni aux multiples espèces, marines, continentales et aériennes qui ont disparu lors de cette crise.

Corrigé 4

La contingence dans la catastrophe du pays lutin.

1. Il n'y a plus que ces espèces dans le pays lutin car il n'y a qu'elles qui ont survécu à la catastrophe. Elles ont survécu parce qu'elles se trouvaient alors à l'abri dans la grotte. Les autres espèces ont disparu suite à tout un enchaînement malheureux de circonstances (orage, mauvaise journée du responsable de la centrale, vent...).

2. Ces individus, qui ont survécu parce qu'ils étaient à l'abri, n'étaient pas particulièrement destinés à survivre mieux que les autres *a priori*. C'est tout particulièrement le cas pour les lutins diabétiques. La maladie très invalidante dont ils souffrent ne les mettait pas, *a priori* dans une position avantageuse. Ils ne doivent leur survie qu'à un heureux concours de circonstances.

3. Aucun des paramètres cités n'est obligatoire ici. Si l'on revient au début de l'histoire, les lutins n'auraient peut-être pas eu l'idée saugrenue de mettre des diabétiques, des chats, des souris, ... dans une grotte. Si cela s'était tout de même produit, l'orage ne se serait peut-être pas produit à cet endroit et à ce moment. La foudre aurait pu frapper ailleurs. Le gardien de la centrale

aurait pu ne pas faire la fête la veille. Il aurait pu être mieux reposé et mieux réagir. Le vent aurait pu souffler dans une autre direction et le nuage toxique aurait pu se dissiper avant d'atteindre les zones habitées. Quant aux lutins, ils auraient pu être 3 mâles ou 3 femelles, et dans ce cas, ils n'auraient pas eu de descendance (même remarque pour les chats).

Bref, la fin de cette histoire est le résultat de tout un ensemble de circonstances qui auraient très bien pu ne pas se produire, ou se produire ailleurs, ou à un autre moment, ou avec une intensité moindre. Aucun de ces événements n'avait de caractère obligatoire. Si l'un d'eux ne s'était pas produit ainsi (situation très probable si l'on recommence au début de l'histoire), la fin peut être considérablement modifiée. C'est cela, la contingence.

Corrigé 5

Caractéristiques d'une crise écologique que ce document permet de mettre en évidence :

- Brutalité du phénomène : on note une brusque chute du nombre de genres de brachiopodes à la limite Permien-Trias.
- Caractère massif : à la limite Permien-trias, disparaissent environ 80 % des genres (160 avant la limite, 30 après) et environ 20 genres (soit entre 25 et 30 %) de lamellibranches.
- La limite Permien-Trias est suivie par une radiation adaptative des lamellibranches survivants qui se diversifient (nombre de genres en nette augmentation, multiplié par 8 depuis la limite Permien-Trias).

Il est à noter que brachiopodes et lamellibranches ont le même mode de vie, habitent tous le milieu aquatique et sont en quelque sorte « en compétition ». Les brachiopodes sont dominants avant la crise et, de ce fait, les lamellibranches sont peu diversifiés, ayant peu de niches écologiques à leur disposition. Avec la disparition de la plupart des brachiopodes, les lamellibranches vont coloniser rapidement les niches écologiques laissées vacantes et se diversifier considérablement.

Le document ne permet pas de montrer :

- Le caractère planétaire de la crise (aucun renseignement ne nous est apporté sur la ou les localisation(s) du(des) site(s) fossilifère(s) étudié(s)).
- La diversité des espèces touchées. Nous n'avons ici des renseignements que pour une catégorie assez précise d'organismes vivants, tous marins, ayant des modes de vie semblables.

Corrigé 6

1. Une crise écologique correspond à une brusque disparition d'un nombre important d'espèces variées à l'échelle de toute la planète (brusque diminution de la biodiversité). Suite à une crise, il se produit une radiation adaptative. Il y a donc un rapide changement du rythme évolutif et un renouvellement rapide des espèces. Une crise écologique peut donc constituer un saut évolutif, une accélération de l'évolution, ce qui correspond parfaitement à la notion de ponctuation développée ici.

2. Les légendes du schéma sont :

A : Phase d'extinction massive (réduction de la biodiversité).

B : Apparition de la Vie.

C : Radiation adaptative (augmentation de la biodiversité).

D : Phase de relative stabilité (peu d'espèces apparaissent ou disparaissent).

Corrigé 7

L'accumulation de laves correspond à une surface de un million de km^2 , pour une épaisseur moyenne de 2,4 km. Le volume est donc voisin de 2,4 millions de km^3 . Si l'on s'en tient aux informations fournies (et dans la mesure où une proportionnalité peut être établie), le volume de gaz doit être de l'ordre de quelques millions de km^3 de gaz, cendres et poussières.

Si avec quelques km^3 de gaz émis, une baisse de température mondiale a pu être enregistrée, cette baisse a dû être énorme avec un tel volume de gaz émis. Cette forte baisse de la température a donc dû provoquer des changements considérables dans les conditions de vie des organismes alors présents, provoquant ainsi une brutale disparition d'un grand nombre d'entre eux. Cela est renforcé par la baisse de la photosynthèse, du fait de l'obscurcissement de l'atmosphère, des variations du niveau des océans, du fait d'un piégeage plus important de glaces aux pôles (période plus froide) et d'autres perturbations telles que pluies acides...

Parmi les causes des crises écologiques, outre le volcanisme, nous pouvons citer les impacts météoritiques, les grandes régressions ou les grandes transgressions marines, l'action anthropique...

.....■ **CORRIGE DES CONTROLES** ■.....

Exercice 1

Attention, le sujet ne porte pas sur la crise crétacé-Tertiaire en tant que telle, mais sur les liens qui existent entre événements géologiques et biologiques au cours des temps. La problématique n'est pas « y a-t-il eu une crise majeure à la limite K/T ? », ni « les crises entraînent-elles un renouvellement des espèces ? », mais « quels liens existe-t-il entre événements géologiques et biologiques et en quoi la limite K/T permet-elle d'illustrer ces liens ? ». Il faut bien garder en vue cette problématique tout au long du devoir.

Proposition de plan

La disparition d'espèces et l'apparition d'espèces nouvelles est un phénomène courant dans l'histoire de la Vie sur Terre, participant à l'Evolution. Toutefois, si ces phénomènes se déroulent, la plupart du temps, de manière régulière et continue, on constate l'existence de ponctuations, c'est-à-dire de modifications brutales (à l'échelle des temps géologiques) des formes de vie sur terre : il s'agit de crises biologiques. Parallèlement à ces modifications des formes de vie, on constate des phénomènes géologiques plus ou moins brutaux et d'ampleur variable. Existe-t-il un lien entre ces phénomènes géologiques brutaux et les ponctuations constatées dans l'histoire de la Vie ? Nous allons montrer qu'à la limite Crétacé-Tertiaire (– 65 Ma), une crise biologique s'est produite, dont les origines pourraient être géologiques.

I) La limite Crétacé-Tertiaire est marquée par une crise biologique majeure. Caractère brutal, mondial, massif et diversifié.

Ne pas oublier de signaler qu'après la crise, il y a eu radiation adaptative, en particulier pour les mammifères.

Il y a donc un brutal renouvellement des espèces à la limite K/T.

II) La crise K/T a des causes géologiques.

Tectonique des plaques, variations du niveau des océans.

Variations climatiques.

Volcanisme du Deccan.

Impact météoritique.

Tous ces phénomènes ne sont pas de même durée, mais le volcanisme et l'impact sont relativement brefs.

En donner les conséquences prévisibles sur l'environnement et la Vie.

Il y a donc eu, à la limite K/T, une conjonction de divers phénomènes géologiques de plus ou moins grande amplitude. Leurs conséquences ont pu être désastreuses.

En conclusion : il y a bien un couplage possible entre phénomène géologiques et évolution biologique. Cela s'est déjà produit à plusieurs

reprises et a bouleversé le déroulement de l'évolution. L'action anthropique mènera-t-elle à une nouvelle crise ?

Exercice 2

La crise s'accompagne-t-elle d'un renouvellement dans la biosphère ?

Nous pouvons constater que les dinosaures, très abondants et diversifiés avant la limite Crétacé-Tertiaire disparaissent au passage à l'ère tertiaire (en tout cas on n'en retrouve plus de trace fossile).

En revanche, les mammifères voient leur diversité augmenter considérablement : de 316 espèces au total avant la crise, on en trouve 695 après la crise K/T.

En Europe et en Asie, leur diversité est multipliée par 6, en Amérique du Nord, par 3 et en Amérique du Sud par 2. Enfin, les mammifères colonisent l'Afrique après la crise (on n'en trouve aucune trace fossile avant).

Cette crise écologique s'accompagne donc d'un important renouvellement de la faune, par disparition d'un grand nombre d'espèces et radiation adaptative des espèces qui survivent.

Exercice 3

Il n'est pas demandé ici de démontrer qu'il s'est produit une crise à la limite K/T, mais de voir en quoi le document est en accord avec cette hypothèse.

Ce document nous montre tout d'abord un changement de régime sédimentaire brutal à la limite K/T. On passe brusquement à de l'argile ou des charbons (ceux-ci pourraient témoigner d'incendies importants).

Il y a disparition d'espèces (les dinosaures, de manière définitive et, transitoirement les foraminifères). Ces espèces sont continentales ou marines, certaines de grande taille, d'autres microscopiques.

L'événement touche le milieu marin (site en Espagne) et le domaine continental (Dakota).

Il se retrouve sur deux continents différents : Europe et Amérique du nord.

Brutalité, diversité des espèces touchées, caractère non local : toutes ces caractéristiques sont bien celles d'une crise écologique majeure.

Exercice 4

Une crise écologique, pour pouvoir être ainsi baptisée, doit présenter diverses caractéristiques, et nous allons montrer que les documents proposés permettent de les mettre en évidence.

Un événement brutal est survenu à la limite Crétacé-tertiaire : la brutalité est montrée par la chute brusque de la sédimentation carbonatée (de 40 % à 0 % en moins d'un centimètre, soit un temps très bref, doc. 1a), liée à la disparition des organismes qui en sont responsables (Foraminifères, extinction nette, cf. docs. 1b et 3 ; et Coccolithophoridés). Le document 2 montre également l'arrêt brutal de la présence de certains pollens, les

documents 2 et 3 permettant de voir l'extinction brutale d'espèces telles que les dinosaures.

Cet événement est planétaire : on trouve des indices de cet événement en Afrique du Nord (Tunisie, site d'El Kef, doc. 1) et en Amérique du Nord (Hell Creek, Montana). Cet événement a eu suffisamment d'impact pour laisser des traces sur des continents qui, même à l'époque, étaient déjà séparés.

Cet événement est massif : il existe une très forte chute du taux de carbonates dans les sédiments (de 40 % à 0 %, doc. 1a), lié à des extinctions nombreuses parmi les foraminifères (doc. 1b, disparition totale de nombreuses espèces, moitié supérieure du graphique). On note également la disparition de tous les dinosaures (docs. 2 et 3), ainsi que de divers mammifères (docs. 2 et 3).

Une grande variété d'organismes est touchée par cet événement : des microorganismes sont touchés (doc. 1a et 1b), ainsi que des organismes de grande taille (dinosaures et mammifères, docs 2 et 3). L'événement touche des animaux en milieu continental (doc. 2, série sédimentaire continentale) et en milieu marin (doc. 1, série sédimentaire marine). Des végétaux sont affectés (pollens du document 2), ainsi que des animaux (tous les documents).

Toutes ces caractéristiques étant présentes, on peut donc parler de crise écologique majeure.

Lors de cet événement, il y a extinction totale de certains groupes (dinosaures, doc. 2 et 3), d'autres étant fortement affectés (foraminifères, doc. 1). Il se produit ensuite un remplacement de cette faune disparue par d'autres espèces, certains groupes subissant une radiation adaptative (mammifères, docs. 2 et 3 ; certains foraminifères, docs. 1 et 3). Ce changement affectant de manière brutale à la fois la faune et la flore mondiales a profondément marqué l'évolution biologique de la planète.

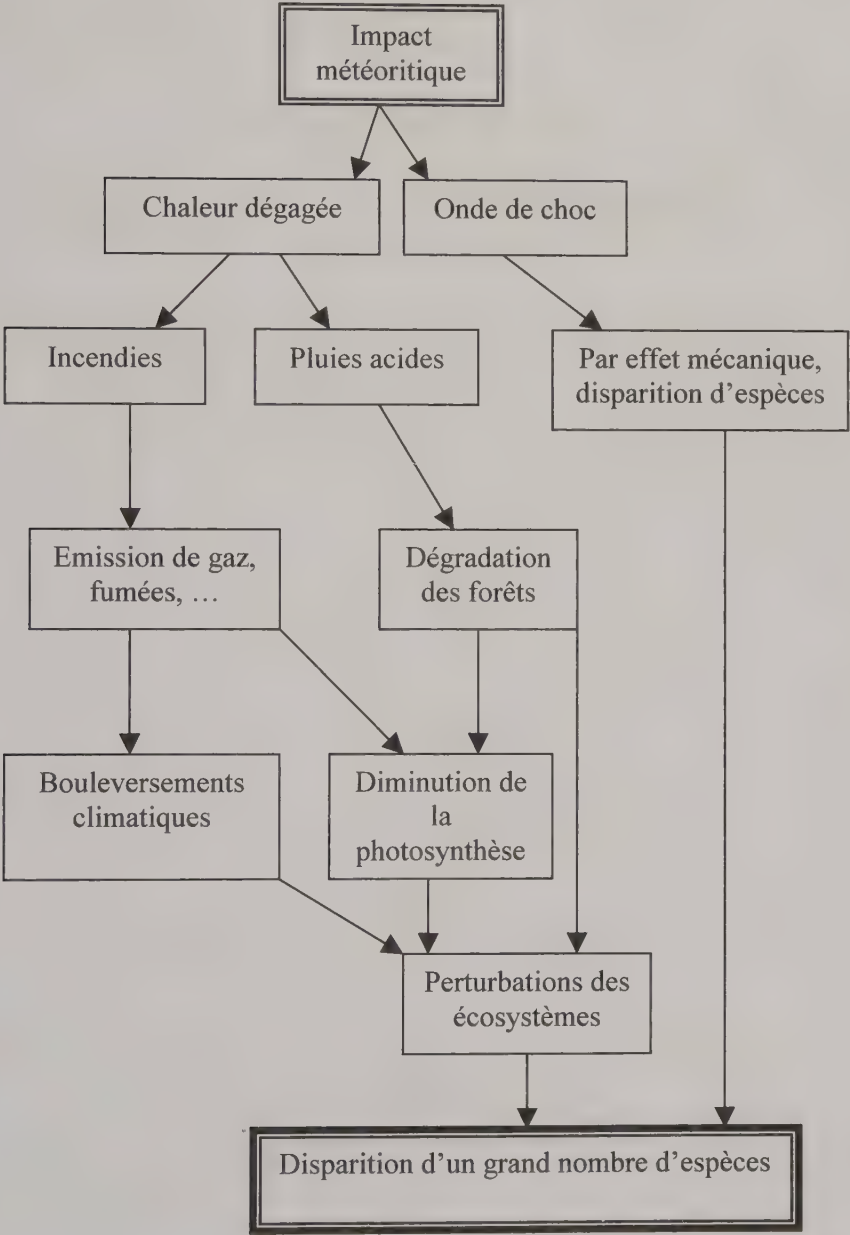
Exercice 5

Nous allons présenter les éléments qui argumentent en faveur des deux hypothèses (volcanisme et météorite) dans un tableau, puis nous apporterons une conclusion d'ensemble.

	Volcan	Météorite
Doc. 1a et 1b : Teneur en iridium s'élevant lentement et atteignant 0,1 parties par milliard. Teneur en iridium des basaltes terrestres de 0,1. Brutale élévation de la teneur en iridium, à des valeurs non compatibles avec une origine terrestre, mais en accord avec celle des météorites.	X	X
Doc. 2 : Présence de quartz choqués et de sphérules dans l'argile de la limite K/T, indice d'un choc. Présence de minéraux déformés dans les éjections du volcan Toba. Ces minéraux déformés ne correspondent pas à ceux trouvés dans la couche d'argile de la limite K/T. En revanche ceux-ci correspondent aux minéraux trouvés dans les cratères d'impact. Présence de magnétites nickélicifères n'ayant pu se former sur Terre.	X	X X X
Doc. 3 : Présence de suie, indiquant des incendies importants. Embrasement soudain.	X	X X

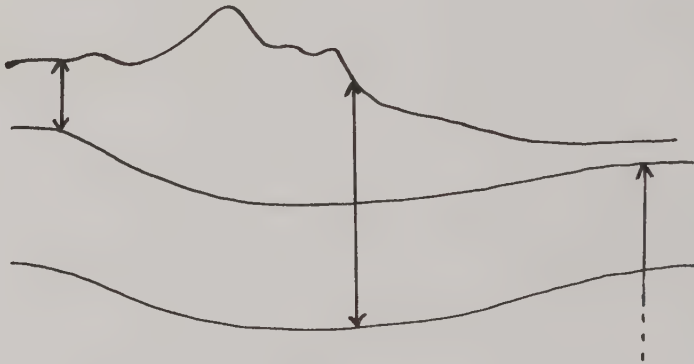
C'est donc l'hypothèse météoritique qui est ici privilégiée par les documents.

Un scénario possible ayant conduit à une extinction massive, dans le cadre de cette hypothèse peut être schématisée comme suit : (voir page suivante).



La convergence lithosphérique et ses effets

Vous avez étudié, en classe de première, la structure interne de la Terre. Vous avez également découvert que la lithosphère (formée par la croûte et par la partie supérieure du manteau) est découpée en plusieurs plaques, dont la mobilité est assurée par des mouvements de convection au sein du manteau.

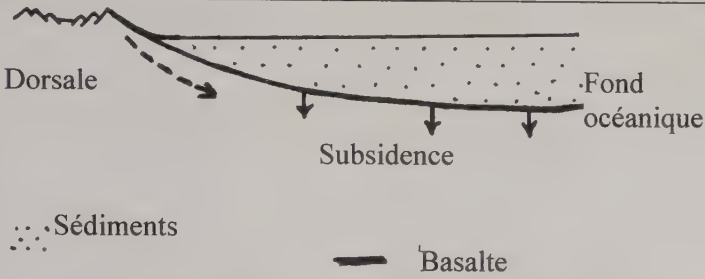


Structure de la périphérie du globe terrestre

RAPPEL : LA DIVERGENCE LITHOSPHERIQUE ET LA FORMATION DES OCEANS

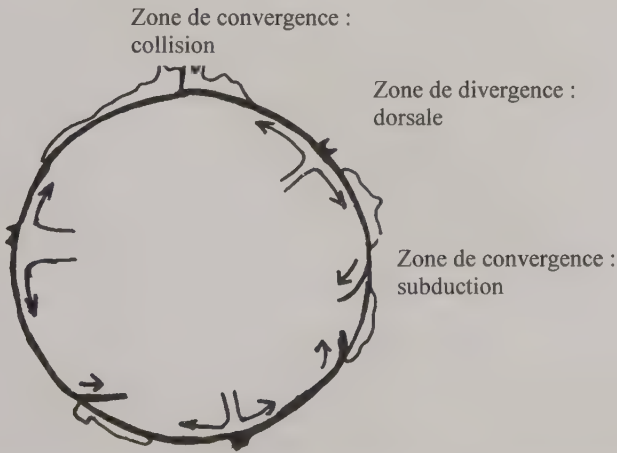
C'est au niveau des dorsales médio-océaniques qu'est créé en permanence le plancher océanique. Une montée de basalte à la surface se produit au niveau de ces dorsales, donnant naissance à des laves en coussins, surmontant des gabbros et des péridotites.

En étant perpétuellement repoussé sur les côtés, le plancher océanique s'éloigne de la dorsale. Il se refroidit, s'hydrate, s'épaissit, se transforme (phénomène de serpentinitisation, lié entre autres aux échanges eau-plancher océanique). La densité de la lithosphère océanique augmente au fur et à mesure de son refroidissement, c'est-à-dire au fur et à mesure de son éloignement de la dorsale. De plus, il est recouvert par des sédiments dont l'épaisseur accumulée augmente avec l'âge.



Vieillessement du plancher océanique en fonction de son éloignement de la dorsale. Le plancher se refroidit, s'épaissit, et devient plus dense.

Sachant d'une part que la formation (accrétion) de plancher océanique est permanente au niveau des dorsales et que, d'autre part, la surface terrestre n'est pas extensible, on en déduit qu'il doit exister des zones de convergence lithosphérique, compensant la divergence existant au niveau des dorsales.



La convergence lithosphérique : conséquence de la divergence au niveau des dorsales.

Les frontières entre les plaques lithosphériques peuvent donc être de nature différente :

- Frontières divergente, au niveau des dorsales océaniques, création de plancher océanique.

- Frontières coulissantes, où les plaques glissent les unes contre les autres (failles transformantes).

- Frontières convergentes, où les plaques s'affrontent. En fonction des densités des plaques s'affrontant, deux situations se présentent :

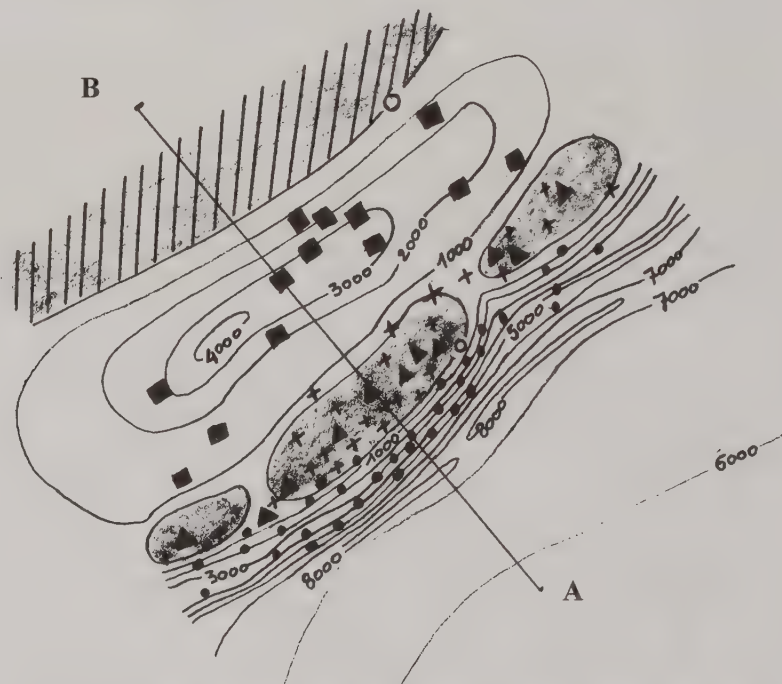
- * zone de subduction : disparition de plancher océanique qui plonge sous une autre plaque (exemple : Japon, Amérique du Sud, Antilles,...)

- * zone de collision où des masses continentales s'affrontent (exemple : Alpes, Himalaya...).

CONVERGENCE LITHOSPHERIQUE ET SUBDUCTION

► Les caractéristiques d'une zone de subduction

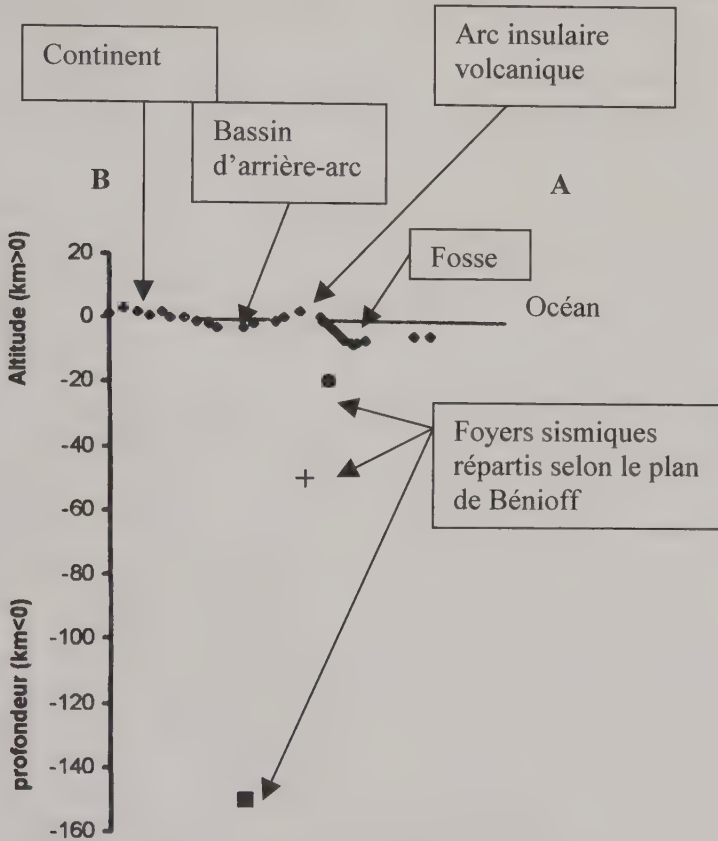
Si nous étudions une zone de subduction (exemple théorique, mais qui pourrait correspondre aux fosses du Japon, ou aux Antilles), nous pouvons définir quelques caractéristiques :



Carte géologique théorique d'une zone de subduction : en grisé : arc insulaire volcanique ; grisé et hachures : continent ; — 1000 — : isobathes (lignes d'égales profondeurs) ; ▲ : volcans ; ● : foyers sismiques de faible profondeur (20 km) ; + : foyers sismiques de moyenne profondeur (50 km) ; ■ : foyers sismiques de grande profondeur (150 km).

Il existe, au niveau d'une telle zone de subduction :

- De **forts reliefs négatifs** (fosse de profondeur avoisinant les 8000 m).
- De **forts reliefs positifs** (ici représentés par l'arc volcanique insulaire = alignement d'îles volcaniques).
- Présence d'un **bassin d'arrière-arc** (entre l'arc volcanique et le continent).
- Existence d'un **prisme d'accrétion sédimentaire**, en avant de l'arc insulaire (et en arrière de la fosse).
- Présence d'un **volcanisme de type explosif** (volcanisme andésitique), qui est à l'origine de l'arc insulaire.
- Existence d'une **sismicité** répartie selon une ligne oblique = plan de Bénéioff-Wadati (**plan de Bénéioff**).



Coupe correspondant à la carte précédente, selon A-B.

– On note également la présence, au niveau d'une telle zone, **d'anomalies géothermiques positives** (au niveau de l'arc volcanique, qui indiquent la présence de matériel chaud proche de la surface) **et négatives** (au niveau de la fosse et suivant le plan de Bénéioff, indiquant la plongée d'un matériel froid).

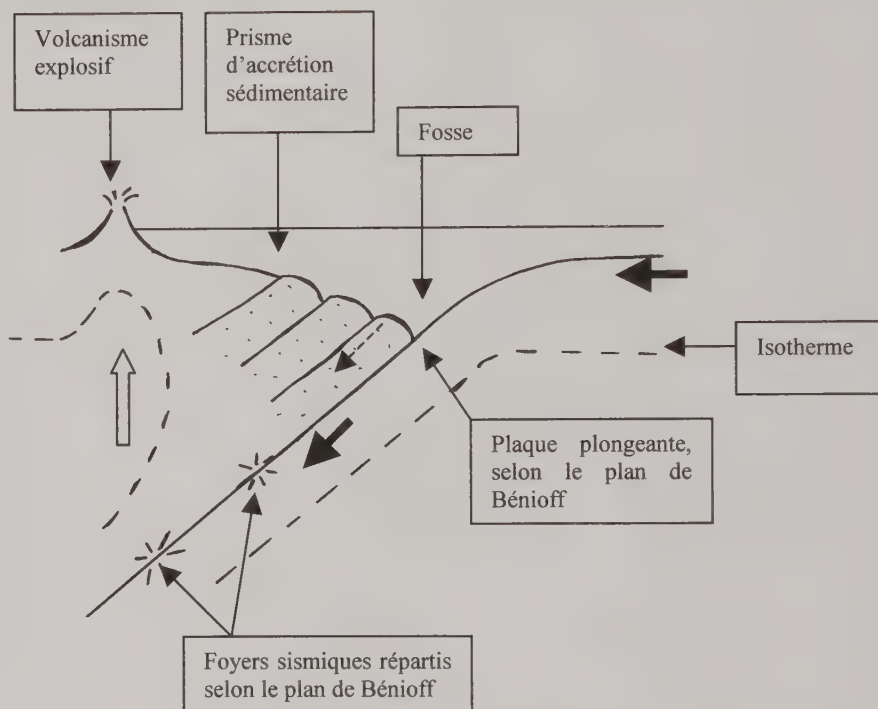
Cet ensemble correspond à la subduction d'une plaque océanique sous un pan de plaque océanique.

Le plan de Bénéioff correspond à la surface de contact entre la plaque plongeante froide (d'où l'anomalie thermique négative) sous la plaque sus-jacente. Les importantes contraintes liées à ce glissement de la plaque plongeante expliquent la sismicité. L'angle d'inclinaison de ce plan de Bénéioff varie selon la zone considérée.

Le prisme d'accrétion correspond aux sédiments accumulés sur la plaque plongeante, « rabotés » par la plaque sus-jacente. Il s'agit d'une zone de compression, où les sédiments s'accumulent « en écailles ».

La fosse océanique est la zone de rencontre de la plaque plongeante et de la plaque sus-jacente.

Les anomalies géothermiques positives et le volcanisme (et donc l'arc volcanique) correspondent à une remontée de magmas chauds, pouvant atteindre la surface.



Coupe simplifiée d'une zone de subduction. Flèches noires : mouvement de la plaque ; flèche blanche : remontée de matériel chaud. L'isotherme présente une anomalie négative suivant le plan de Bénéioff (plongée de matériel froid) et une anomalie positive au niveau de l'arc volcanique (remontée de matériel chaud).

Il est à noter que les zones de subduction ne présentent pas toutes ces structures. Lorsque la plaque océanique plonge sous une plaque continentale (exemple de la plongée de la plaque Pacifique sous la plaque continentale sud-américaine), il n'y a pas d'arc insulaire, ni de bassin d'arrière-arc. Néanmoins on retrouve un relief négatif fort (fosse), des reliefs positifs marqués (cordillère, présentant une importante activité volcanique), un plan de Bénéioff, etc.

Contrairement aux marges océaniques situées de part et d'autre d'une dorsale, dite marges passives, les marges des zones de subduction sont des marges actives (comme en témoigne la forte activité sismique et volcanique).

► Pourquoi la plaque plongeante s'enfonce-t-elle ?

Nous avons rappelé que, lorsque la plaque océanique s'éloigne de la dorsale, elle subit des modifications physico-chimiques. La lithosphère océanique s'hydrate, se refroidit, s'épaissit. En se refroidissant, elle voit sa densité augmenter. La densité initiale de la croûte est voisine de 2,9, celle du manteau lithosphérique de 3,3. L'épaisseur de ces deux composants de la lithosphère étant alors comparable, la densité moyenne de la lithosphère est voisine de 3,1 [moyenne $(3,3 + 2,9)/2$]. En vieillissant, l'épaisseur du manteau lithosphérique augmente, et la densité de l'ensemble de la lithosphère augmente. Lorsque cette densité devient supérieure à celle du manteau asthénosphérique (3,25), soit après environ 30 Ma, la lithosphère peut, en théorie, s'enfoncer dans celui-ci. Dans la réalité la lithosphère peut encore flotter sur ce manteau durant plusieurs dizaines de millions d'années. Elle ne s'enfonce que lorsque des contraintes tectoniques vont l'y contraindre (rencontre avec une plaque moins dense en particulier).

► Métamorphisme et magmatisme des zones de subduction

Le métamorphisme est l'ensemble des transformations (changements dans la structure cristalline) que peut subir une roche, à l'état solide, sous l'influence de variations de pression, de température...

Le magmatisme est lié à la remontée de magmas provenant du manteau. Ces magmas peuvent donner naissance à des roches dites magmatiques, qui sont de deux types :

- * Roches volcaniques, qui sont expulsées à la surface et qui subissent un refroidissement rapide. C'est le cas des laves. Leur structure est microlithique (quelques minéraux, noyés dans une pâte vitreuse).

- * Roches plutoniques, qui subissent un refroidissement lent sous la surface terrestre. Du fait de ce refroidissement plus lent, les cristaux ont le temps de se former et ces roches présentent des structures où ces cristaux sont bien visibles (structure grenue, granite par exemple).

– La plaque plongeante subit un important métamorphisme

Lors de son vieillissement, la lithosphère océanique subit un phénomène de serpentinisation, déjà décrit en classe de seconde. Les basaltes et gabbros originels vont être transformés en metabasaltes et métagabbros. Des minéraux typiques, tels que (dans l'ordre) : hornblende (amphibole), chlorite, actinote (amphibole) vont, suite à l'hydratation (hydrothermalisme des fonds océaniques), remplacer une partie des plagioclases et pyroxènes initialement présents (une partie des minéraux d'origine subsiste = minéraux résiduels). Ces transformations se font à basse pression, lors du vieillissement de la lithosphère océanique.

Les réactions qui en sont responsables sont du type :

Plagioclase + pyroxène + eau $\longrightarrow$ amphibole (hornblende)

Plagioclase + hornblende + eau $\longrightarrow$ chlorite + amphibole (actinote)

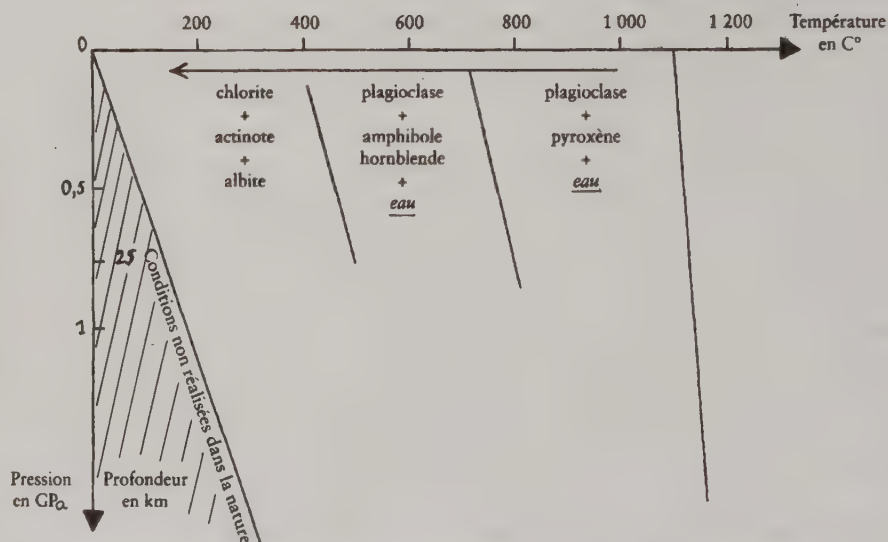
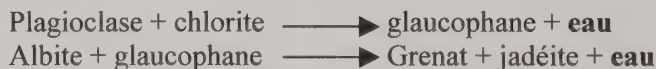


Diagramme Pression/Température simplifié présentant (flèche) les transformations subies par la croûte océanique lors de son refroidissement et éloignement de la dorsale.

Au niveau de la zone de subduction, cette plaque va subir un enfoncement et, lors de celui-ci, elle va être soumise à des pressions élevées, alors que la température ne va pas énormément augmenter (à l'échelle des phénomènes géologiques).

Elle subit donc un métamorphisme dit HP-BT, c'est-à-dire Haute Pression-Basse Température, tout à fait caractéristique. De plus, en s'enfonçant, la plaque plongeante va subir un phénomène de déshydratation.

Parmi les réactions caractéristiques qui se déroulent alors, nous pouvons citer :



Il y a formation de minéraux caractéristiques de ce métamorphisme HP-BT, tels que glaucophane, jadéite, grenat, et la plaque plongeante subit une déshydratation (alors que son vieillissement l'avait hydratée). Elle passe par les stades schistes verts (tout début de la subduction) puis schistes bleus (contenant du glaucophane en particulier) puis par le stade éclogite (avec une association glaucophane, grenat, jadéite).

Le diagramme ci-après indique les zones de stabilité de ces associations minérales. Il est à associer au diagramme P,T précédent pour reconstituer les transformations successives que subit la plaque océanique, de sa formation à sa subduction.

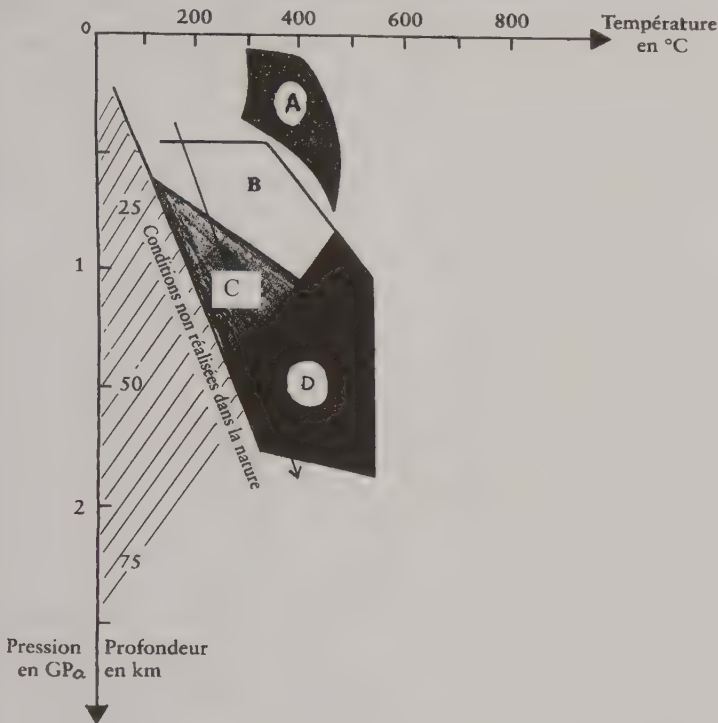


Diagramme Pression/Température simplifié présentant les domaines de stabilité de diverses associations minérales. La flèche indique le trajet suivi par la plaque océanique plongeante.

A : domaine de stabilité de l'association chlorite + actinote + plagioclase

B : domaine de stabilité de l'association glaucophane + plagioclase

C : domaine de stabilité de l'association glaucophane + jadéite

D : domaine de stabilité de l'association grenat + jadéite +/- glaucophane

– Le volcanisme des zones de subduction

Les zones de subduction se caractérisent par un volcanisme de type explosif (type péleén, du nom de la Montagne Pelée, en Martinique, dont l'explosion en 1902 rase la ville de Saint-Pierre, causant la mort de 30000 personnes).

Les explosions volcaniques de ce type sont provoquées par une forte augmentation de la pression à l'intérieur de la cheminée volcanique, obstruée par un bouchon de lave très visqueuse (formant souvent un dôme ou une aiguille de lave dépassant du cratère). Lorsque la pression devient trop forte, le volcan explose littéralement, libérant une importante quantité de gaz portés à haute température (dépassant fréquemment les 700 degrés), de poussières, de matériaux brûlants, de cendres, de pierre ponce... Cet ensemble très destructeur (les volcans explosifs sont les plus meurtriers) porte le nom de nuée ardente.

L'une des caractéristiques des laves typiques de ces volcans est leur nature andésitique : ce sont des laves riches en silice et, de ce fait, très visqueuses,

desquelles les gaz ont du mal à s'échapper (ce qui se manifeste par la présence de bulles dans ces laves, pensez, par exemple à la pierre ponce). C'est cette viscosité qui rend ce volcanisme explosif. Parmi ces laves, nous pouvons citer l'andésite (près de 60 % de silice) ou la rhyolite (plus de 70 % de silice). A titre de rappel, une lave type basalte de dorsale contient 45 à 50 % de silice. Il reste donc à expliquer l'origine de ces laves andésitiques.

– Le plutonisme des zones de subduction

Au niveau des zones de subduction, il existe des remontées de magmas riches en silice, qui expliquent le volcanisme andésitique. Toutefois, ces magmas donnent naissance à des laves s'ils remontent rapidement à la surface. Or, ces magmas peuvent également remonter plus lentement et peuvent cristalliser en profondeur. Ces bulles de magma qui remontent lentement sont nommés diapirs. La lenteur de la cristallisation profonde conduit à des roches grenues, c'est-à-dire dans lesquelles on trouve des cristaux bien formés. De plus, leur nature, riche en silice conduit à la formation de roches granitiques (le granite est l'équivalent grenu de la rhyolite) ou de roches voisines : diorites (équivalent grenu de l'andésite), et granodiorites (ensemble des granitoïdes). Ces plutons granitiques formés en profondeur peuvent affleurer à la surface après un lent phénomène d'érosion. Il est à noter que ces plutons participent de manière importante à la création de croûte continentale nouvelle.

Encore une fois, l'origine de ces magmas riches en silice donnant naissance à ces plutons est à expliquer.

* L'origine des magmas des zones de subduction

Les magmas qui donnent naissance aux laves andésitiques et aux plutons granodioritiques des zones de subduction proviennent d'une fusion des péridotites du manteau.

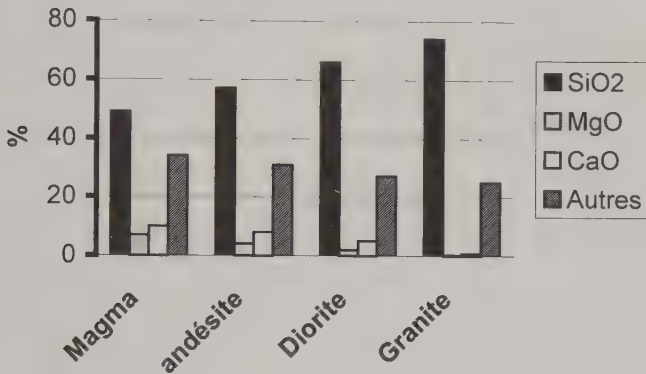
Premier problème : la fusion de ces péridotites s'effectue, dans les zones de subduction, à une profondeur (et donc une température et une pression) qui est a priori insuffisante pour expliquer cette fusion. Celle-ci ne s'explique que si l'on tient compte des modifications qui affectent la plaque plongeante et, en particulier sa déshydratation. En effet, l'eau libérée lors du métamorphisme subi par la plaque plongeante permet de diminuer la température de fusion des péridotites du manteau. C'est donc l'hydratation de ces roches silicatées qui autorise la fusion. Il y a alors production d'un magma silicaté et hydraté qui, moins dense que les roches encaissantes, va remonter vers la surface où il va être piégé. Sa remontée s'accompagne d'une modification, liée à la chaleur dégagée, des roches encaissantes (métamorphisme de contact, avec formation d'auréole de métamorphisme).

Ainsi, alors qu'il faut une température voisine de 1500°C pour entraîner la fusion d'une péridotite anhydre (sans eau) à une profondeur de 50 km, il

suffit d'une température de 900°C pour provoquer la fusion d'une péridotite hydratée à cette même profondeur de 50 km.

Second problème : la composition des magmas formés (et donc des roches qui en découlent) est différente de la composition des péridotites qui en sont à l'origine (comme l'indique le graphique ci-après).

Composition de diverses roches



Quelques éléments de la composition centésimale en masse de diverses roches. Magma = magma issu de la fusion des péridotites du manteau.

Les roches (volcaniques ou plutoniques) des zones de subduction sont plus riches en silice (SiO₂) que le magma dont elles sont issues. Elles sont en revanche moins riches pour de nombreux autres éléments (MgO, CaO, par exemple). Comment expliquer ces modifications ?

Il se produit en fait deux phénomènes qui peuvent expliquer cela :

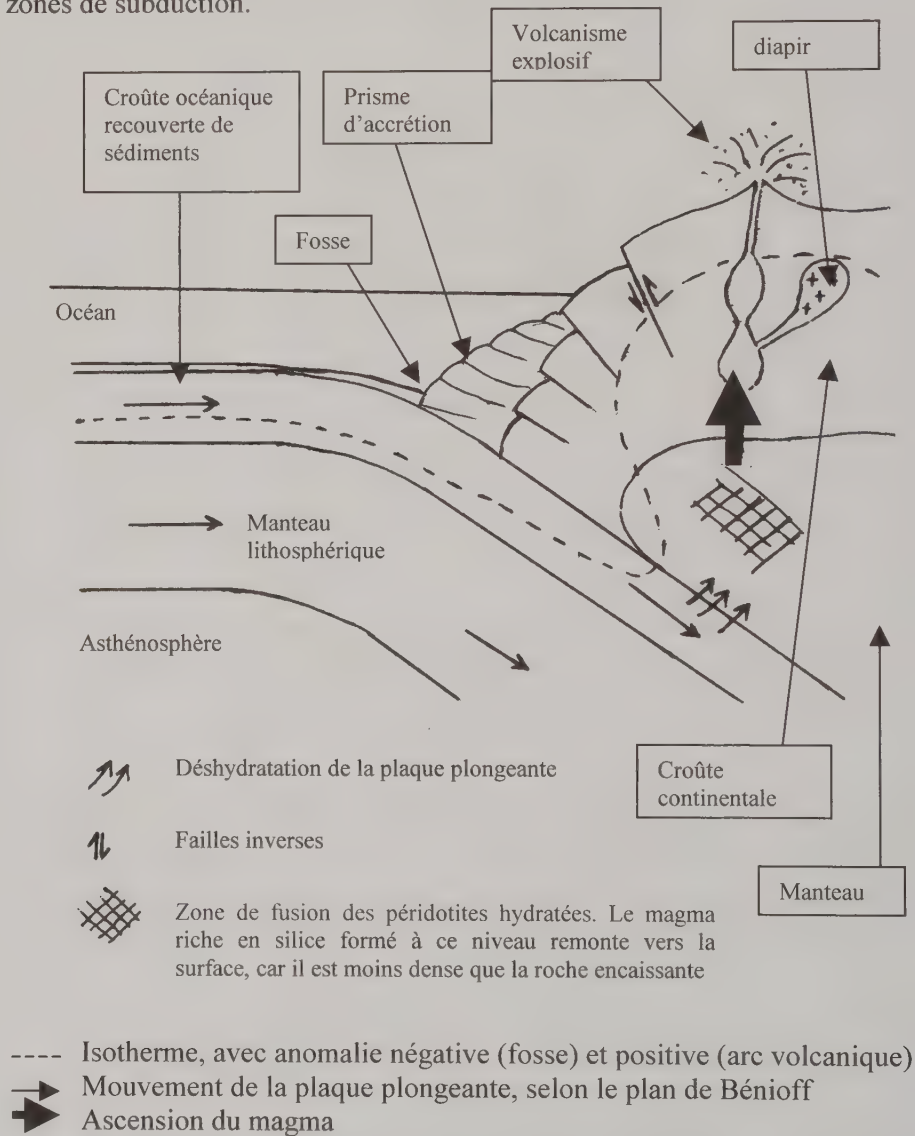
Suite à la fusion de péridotites hydratées de la plaque chevauchante, le magma hydraté formé subit très vite des phénomènes de cristallisation. Des cristaux se reforment aussitôt après que la fusion se soit produite. Or, les premiers minéraux à recristalliser sont des minéraux relativement pauvres en silice (amphiboles par exemple). La phase liquide du magma formé s'enrichit alors relativement en silice.

De plus, il se produit une contamination crustale (de la croûte) du magma par la roche encaissante. Cela se produit par fusion d'une partie de la paroi des chambres magmatiques dans lesquelles le magma peut séjourner. La croûte continentale qui font alors, est riche en silice (formée de roches granitiques), et l'enrichissement en silice du magma se poursuit jusqu'à atteindre les valeurs trouvées dans les roches magmatiques caractéristiques des zones de subduction.

C'est donc par une hydratation des péridotites du manteau que s'explique la fusion de ces péridotites. La différenciation magmatique qui conduit à la constitution de magmas riche en silice s'explique, elle, par une fusion

partielle et une contamination crustale. Les magmas formés, riches en silice et donc visqueux, montent dans la roche encaissante. Selon leur vitesse de refroidissement, ils donneront naissance à des laves andésitiques (volcanisme explosif), ou à des plutons granodioritiques.

Le schéma suivant résume les principaux points à connaître, concernant les zones de subduction.



Représentation schématique des caractéristiques d'une zone de subduction

CONVERGENCE LITHOSPHERIQUE ET COLLISION CONTINENTALE

(Exemple des Alpes)

Lorsque deux plaques lithosphériques convergent l'une vers l'autre, il y a subduction si l'une des plaques est plus dense que l'autre. Elle subit alors une flexion et plonge dans le manteau sous-jacent.

Ces conditions ne sont pas réunies lorsque deux plaques continentales, de densité voisine s'affrontent. Il se produit alors un phénomène de collision. C'est ce qui se passe, par exemple, dans les Alpes, ou encore dans l'Himalaya.

Les Alpes forment une chaîne de montagnes jeunes (apparues à l'ère tertiaire, leur surrection se poursuit). Leur point culminant, le Mont-Blanc (4810 m) est localisé en France. La chaîne alpine dessine un arc au sud de l'Europe, s'étendant sur près de 1000 km de long (de la France à l'ex-Yougoslavie) et 150 km de large environ.

Cette chaîne de montagne résulte de la collision de deux continents (Afrique et Europe). Nous allons voir quels sont les indices qui permettent de reconstituer l'histoire et le mode de formation de cette chaîne de montagne.

► Les marqueurs géologiques de l'histoire des Alpes

– **Marqueurs d'une compression** : parmi les éléments qui témoignent de l'action de forces compressives, nous pouvons citer :

* L'existence de failles inverses, témoins d'une tectonique cassante compressive.

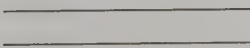
* Existence de plis, succession d'anticlinaux et de synclinaux. La géométrie initiale des couches sédimentaires est modifiée et des terrains anciens peuvent affleurer à la surface.

* Présence de nappes de charriage qui sont des superpositions discordantes de couches de terrains géologiques, à une échelle de plusieurs dizaines de kilomètres. Il existe par exemple dans les Alpes, des chevauchements importants de terrains du Primaire sur des terrains du Tertiaire.

* Existence de mouvements verticaux, se manifestant par d'importants reliefs positifs (la chaîne de montagne elle-même). Le simple fait qu'il s'agisse d'une chaîne montagneuse, et non d'une montagne isolée, suggère que nous sommes en présence d'une limite de plaques (voir cours de première S). Il existe également un épaissement crustal (de la croûte), avec de profondes racines crustales pour ces chaînes montagneuses.

Croûte normale

Racine crustale épaisse d'une montagne



* Existence d'un métamorphisme producteur de schistes et de gneiss. Les phénomènes de compression se retrouvent alors au niveau même des minéraux de ces roches.

Les Alpes ont donc subi une compression forte, les mouvements horizontaux ayant généré des mouvements verticaux de surrection.

– Marqueurs de l'existence d'un ancien océan

* Présence de fossiles marins dans diverses régions alpines (ammonites, bélemnites, flysch à helminthoïdes (traces fossiles de vers marins),...).

* Radiolarites : roche très riches en silice, se formant à partir de boues contenant des squelettes de microorganismes, les radiolaires. Ces boues se déposent habituellement dans des milieux marins profonds (en dessous de la limite de compensation des carbonates, limite en dessous de laquelle les carbonates sont dissous).

* Existence d'ophiolites : les complexes ophiolitiques sont de nature identique à la croûte océanique. On y trouve de bas en haut : basaltes en coussins, gabbros et péridotite. De tels complexes sont, par exemple, identifiés dans le massif du Chenaillet.

– Marqueurs de l'existence d'une ancienne fracturation continentale

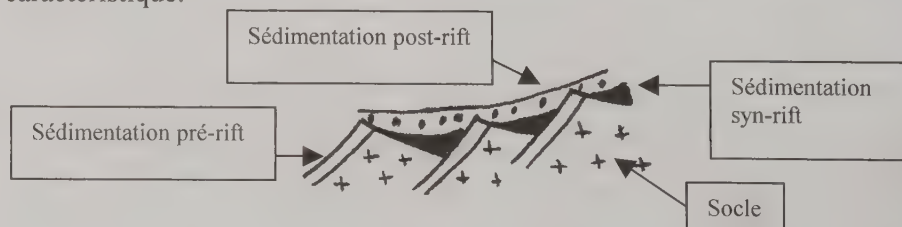
* Failles normales (ayant jadis fonctionné. Actuellement, ce sont les failles inverses qui fonctionnent). Ces failles engendrent la formation de fossés d'effondrement = grabbens.



*Un fossé d'effondrement, ou grabben, affecté de failles normales.
L'ensemble fonctionne en extension (flèches).*

* Existence de zones présentant un amincissement ancien de la croûte continentale.

* Existence de structures de type ancienne marge continentale, avec présence de blocs basculés, accompagnés d'une sédimentation caractéristique.



Structure de type marge continentale passive (telle qu'elle existe sur les marges atlantiques actuelles), avec présence de blocs basculés.

– Marqueurs d'une subduction ancienne

Ce sont principalement des marqueurs pétrologiques et minéralogiques.

* On trouve dans les Alpes des complexes ophiolitiques fortement métamorphisés. C'est le cas, par exemple, au Mont Viso, où l'on trouve des éclogites, contenant grenat et jadéite. Ces minéraux, de métamorphisme Haute Pression-Basse à Moyenne Température, sont des indicateurs de la subduction.

* On trouve également des gabbros métamorphisés, contenant de la chlorite et du glaucophane.

On en déduit qu'il y a eu une subduction au niveau des Alpes.

En résumé, la zone où se trouvent actuellement les Alpes a jadis été un océan (océan alpin). La plaque océanique a subi une subduction et, au terme de celle-ci, la convergence se poursuivant, il s'est produit une collision des deux masses continentales (au Nord : continent eurasiatique et au Sud : continent adriatique, ou Apulie, correspondant à la plaque africaine). Une partie de la plaque océanique s'est retrouvée coincée, prise en étau entre les deux masses continentales et des lambeaux de cette plaque ont été remontés à la surface (elle chevauche la plaque eurasiatique et est elle-même chevauchée par des éléments provenant du continent adriatique).

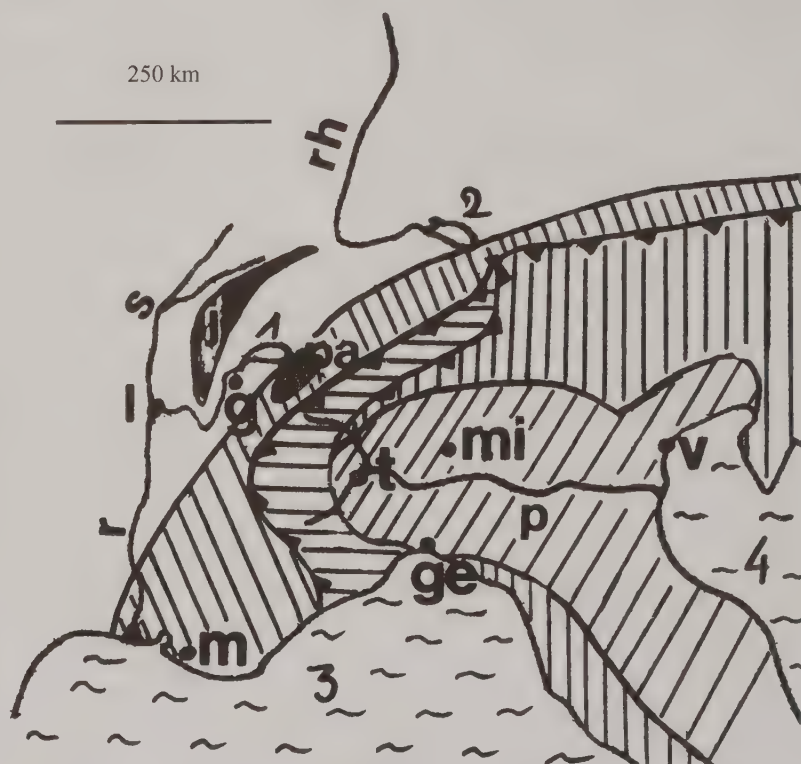
La carte de la page suivante, extrêmement simplifiée, présente les diverses zones géologiques décrites dans les Alpes. On y trouve, de l'Est vers l'Ouest :

– La zone interne, ou apulienne (en hachures verticales) : elle est issue du continent adriatique. On y trouve des traces d'ancienne marge océanique. Sur ces terrains reposent des couches sédimentaires plus récentes : les sédiments de la plaine du Pô (p sur la carte). Le massif de la dent Blanche, avec le mont Cervin, plus à l'Ouest, est formé par une nappe de charriage provenant de ce même ancien continent adriatique.

– La zone médiane, regroupant les zones briançonnaise et piémontaise (en hachures horizontales). On y trouve les complexes ophiolitiques plus ou moins métamorphisés (Mont Viso, massif du Chenaillet). Les Préalpes sont également un lambeau de ce plancher océanique ancien.

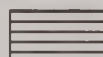
– La zone externe ou zone dauphinoise (zone à hachures obliques, à l'Ouest de la carte), correspond à l'ancienne marge européenne. On y trouve des structures de type blocs basculés (Taillefer, Rochail). C'est également dans cette zone que se trouve le Mont-Blanc, point culminant de la chaîne alpine.

Les chevauchements sont matérialisés par les lignes avec triangles. Ceux-ci sont orientés en direction de la structure chevauchante.



Carte géologique très simplifiée de la portion occidentale de la chaîne alpine.

 Zone externe, reste de la marge européenne

 Zone médiane, reste de croûte océanique

 Zone interne, reste de la marge adriatique

 Plaine du Pô, sédiments récents

 Mer : 3 = méditerranée ; 4 = adriatique

 Fleuves : s = Saône ; p = Pô ; r = Rhône ; rh = Rhin.

 Lacs : 1 = lac Léman ; 2 = lac de Constance

 J = Jura ; pa = Préalpes

• Villes : g = Gênes ; ge = Genève ; l = Lyon ; m = Marseille ; mi = Milan ; t = Turin ; v = Venise.

► De l'ouverture océanique à la collision continentale : l'histoire des Alpes

Les divers indices récoltés sur le terrain montrent qu'au niveau des Alpes, il y a eu un océan. De son ouverture à sa fermeture et à la collision continentale qui a donné naissance aux Alpes, quelles sont les époques marquantes de cette histoire ? Les datations, pratiquées sur des échantillons de roches prélevées dans les Alpes, permettent de retracer les grandes étapes et de donner des dates pour ces événements.

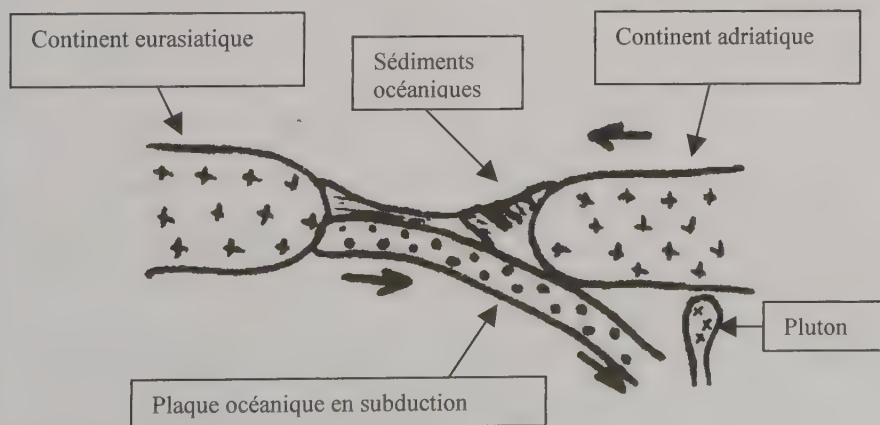
À la limite entre les ères primaire et secondaire, il y a 250 Ma, tous les continents sont réunis et forment une Pangée.

Il y a environ 190 Ma, se produit un phénomène de rifting, qui entraîne une dislocation de la Pangée. On note un amincissement de la croûte continentale, apparition de failles normales et de blocs basculés.

Vers -150 Ma, un océan alpin se forme (accrétion de croûte océanique au niveau d'une dorsale). Il sépare un bloc eurasiatique d'un bloc adriatique.

La phase océanique (expansion océanique par le fonctionnement de la dorsale) se poursuit jusqu'à environ -80 Ma. Pendant ce temps, des sédiments océaniques (radiolarites par exemple) se déposent sur le fond de l'océan.

Il y a 70 Ma, à la fin du Crétacé, le mouvement va s'inverser, du fait de l'ouverture de l'Atlantique Sud, qui va entraîner l'Afrique à la rencontre de l'Europe. La phase de fermeture de l'océan alpin débute. La plaque océanique reliée au continent eurasiatique va plonger sous la plaque du continent adriatique. C'est alors la phase de subduction, au cours de laquelle les éclogites vont apparaître (en profondeur).



-60 Ma : phase de fermeture de l'océan alpin et subduction

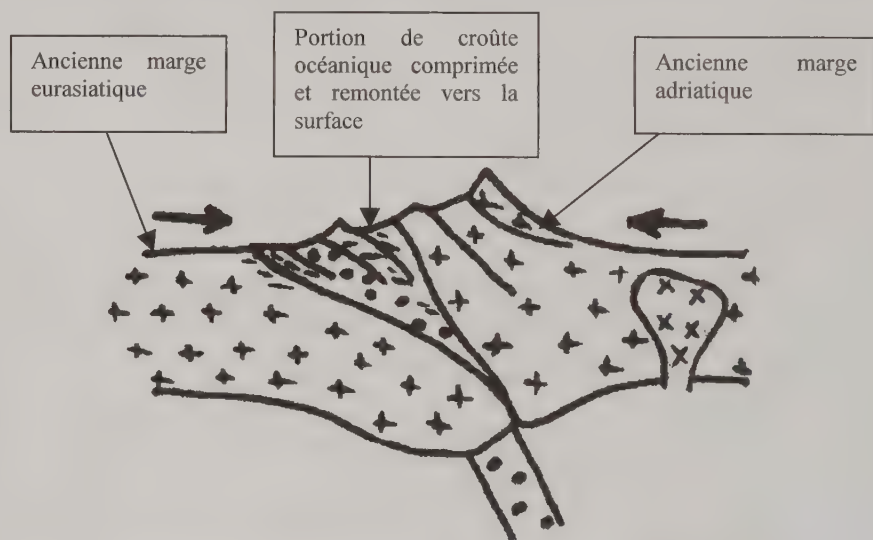
La phase de subduction dure assez peu. Une phase de collision va lui faire suite (précédée d'une courte subduction de la plaque continentale européenne qui « suit » la plaque océanique plongeante).

Lors de la collision continentale (initée il y a 40 Ma), une compression énorme s'exerce sur les terrains. Selon leur nature, deux comportements peuvent alors apparaître :

* En profondeur, la température relativement élevée permet aux roches d'avoir une certaine plasticité. Ce comportement plastique se traduit par des phénomènes de plissement, de raccourcissement et d'épaississement de la croûte.

* En surface, la température est plus faible et les roches ont un comportement plus cassant. Il y a alors apparition de failles inverses et de chevauchements (charriages).

Au cours de ces phénomènes compressifs, des lambeaux de croûte océanique, plus ou moins métamorphisés sont remontés vers la surface. L'ensemble des terrains comprimés va alors former une chaîne de montagne (surrection). En plus de l'apparition des reliefs positifs, la racine crustale est de plus en plus profonde.



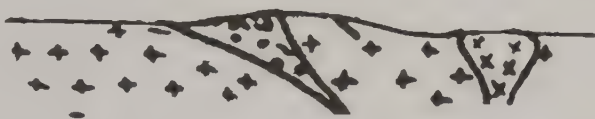
-20 Ma : phase de collision continentale et surrection alpine

Actuellement, ce mouvement se poursuit et le soulèvement alpin s'effectue encore. Toutefois ce phénomène est contrecarré par l'érosion. Les particules détritiques résultant de cette érosion se déposent dans des bassins détritiques péri-alpins (cas de la plaine du Pô).

A terme, le mouvement de convergence cessera, ainsi que le soulèvement alpin.

L'érosion finira, au bout de quelques dizaines de millions d'années, par user totalement la chaîne alpine. Avec l'allègement des reliefs, la racine crustale va remonter (phénomène d'isostasie) et elle subira une érosion au fur et à mesure de sa remontée.

L'ensemble de ces phénomènes érosifs conduit à une suppression des reliefs ou pénéplaiation.



Après érosion, la chaîne alpine, démantelée, tend à disparaître
Il n'est pas impossible qu'un autre phénomène de rifting se produise alors, et le cycle peut reprendre...

■ Enoncés des exercices ▲

■ Exercice 1 (15 min)

Indiquez si les affirmations suivantes sont exactes ou non. Si vous les jugez inexactes, indiquez brièvement pour quelle raison.

1. A la verticale d'une fosse de subduction on trouve une anomalie thermique positive.
2. En s'éloignant de la dorsale, la plaque océanique tend à se refroidir et à s'épaissir. Sa densité diminue.
3. L'andésite est une roche plutonique caractéristique des zones de subduction.
4. C'est la déshydratation thermique de la plaque plongeante qui facilite la fusion des péridotites du manteau sus-jacent.
5. Une zone de collision continentale est caractérisée par des marqueurs tels que failles normales, charriages et chevauchements.
6. Les métagabbros contenant glaucophane et jadéite ont subi un métamorphisme Basse Pression-Haute Température.
7. Les ophiolites métamorphisées du mont Viso témoignent de la subduction ancienne d'un plancher océanique.
8. L'angle d'inclinaison du plan de Bénéioff varie de manière importante selon la zone de subduction considérée.

■ Exercice 2 (15 min)

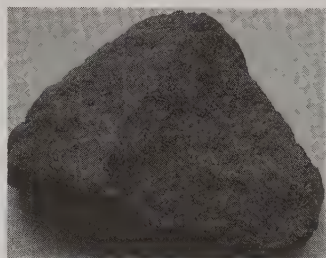
Complétez le texte suivant, résumant l'essentiel à connaître à propos des zones de subduction. Essayez dans un premier temps de compléter seuls ce texte, puis aidez-vous de la liste qui suit le texte et qui contient les différents termes à replacer.

En s'éloignant de la dorsale, la (1) se refroidit, s'épaissit, devient plus (2), tandis que les roches la constituant (basaltes et (3) principalement) subissent un (4). La plaque subit alors un phénomène de (5) et s'enfonce dans le (6), passant en force sous une plaque chevauchante (continentale ou océanique). A la zone de contact des plaques, des (7) pouvant être profonds, s'alignent sur le plan de (8). La (9) thermique (avec formation d'(10)) de la plaque plongeante libère de l'(11) qui (12) le manteau situé entre les deux plaques, provoquant la fusion des (13) et la production de (14) qui s'enrichissent en (15) par (16) et (17) : c'est la (18) magmatique. Ces magmas, moins denses, remontent à la surface, en donnant naissance à un volcanisme (19), les laves produites étant très (20), localisé sur un (21) ou une (22) récente. En profondeur, un refroidissement plus lent des magmas peut donner naissance à des (23) de roches grenues (24), ce plutonisme s'accompagnant d'un métamorphisme de contact dans la roche encaissante, l'ensemble participant à la formation de (25).

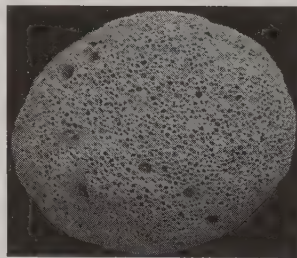
Termes à utiliser : arc insulaire, chaîne montagneuse, lithosphère océanique, manteau, croûte continentale, magmas primaires, gabbros, périclites, éclogites, silice, andésitique et explosif, flexion, déshydratation, différenciation, fusion partielle, contamination crustale, dense, visqueuses, métamorphisme, séismes, plutons, granitoïdes, hydrate, Bénéioff, eau.

■ ■ Exercice 3..... (20 min)

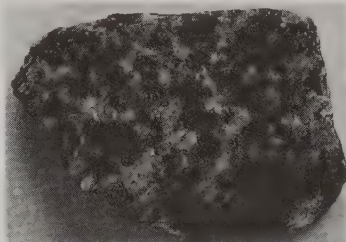
Les photographies suivantes présentent quatre roches provenant de zones de subduction : andésite, pierre ponce rhyolitique, diorite et granite.



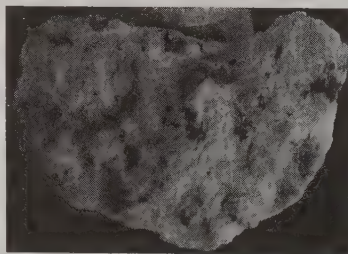
Andésite



Rhyolite



Diorite



Granite

La composition simplifiée de ces roches est fournie ci-dessous.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	Autres
Andésite	59,7	16,3	3,5	6,3	4,1	10,1
Granite	74,1	13,1	0,3	0,8	3,4	8,3
Rhyolite	74	12,8	0,4	1	3,6	8,2
Diorite	62	15,7	2,8	5,7	3,9	9,9

Après une rapide description de ces roches, vous proposerez des explications à leur ressemblances ou différences éventuelles et indiquerez le mode probable de formation qui permet d'expliquer une partie au moins des faits relevés.

■ ■ Exercice 4..... (20 min)

A partir de quel âge une plaque océanique peut-elle s'enfoncer dans le manteau sous-jacent ?

C'est ce que vous allez tenter de déterminer dans cet exercice.

La densité de la lithosphère océanique se calcule en tenant compte de l'épaisseur et de la densité des éléments qui la composent, à savoir, la croûte océanique ($d = 2,9$) et le manteau lithosphérique ($d = 3,3$).

En vieillissant, le manteau lithosphérique va s'épaissir et donc la lithosphère océanique s'épaissit, selon une loi :

$$e = 9,2 \cdot \sqrt{t}$$

e est l'épaisseur en km de la lithosphère et t est le temps en million d'années.

L'épaisseur de la croûte océanique sera considérée constante, égale à 6 km.

Le manteau lithosphérique étant plus dense que la croûte, la densité de l'ensemble (croûte + manteau lithosphérique) va augmenter.

Si l'on considère par exemple que, au moment de la formation de la lithosphère océanique, la croûte a une épaisseur de 6 km, ainsi que le manteau lithosphérique, la densité globale de l'ensemble est :

$$[(6 \times 2,9) + (6 \times 3,3)]/12 = 3,1.$$

La densité du manteau asthénosphérique sous-jacent étant 3,25, la lithosphère flotte sur l'asthénosphère. A quel âge la densité globale de la lithosphère sera-t-elle égale à 3,25 (et donc à partir de quel âge la plaque océanique peut-elle, en théorie s'enfoncer) ?

■ ■ Exercice 5..... (45 min)

Pyroxènes et plagioclases sont des minéraux constitutifs des gabbros, roches magmatiques ; ils sont des constituants de la croûte océanique et se forment

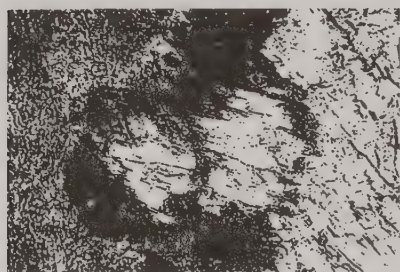
au niveau des dorsales à 5 km environ de profondeur et à une température d'environ 600°C.

Dans les Alpes, on trouve des métagabbros, c'est-à-dire des gabbros métamorphisés.

Les photographies suivantes représentent des lames minces réalisées dans un même échantillon de métagabbro et observées en lumière naturelle. Chaque photo est accompagnée d'un dessin d'observation annoté.

En reliant par un raisonnement logique les informations apportées par l'étude des documents, justifiez les étapes du trajet thermodynamique (doc. 2) du gabbro océanique devenu métagabbro.

Document 1 : Microphotographies de lames minces en lumière naturelle d'un métagabbro.



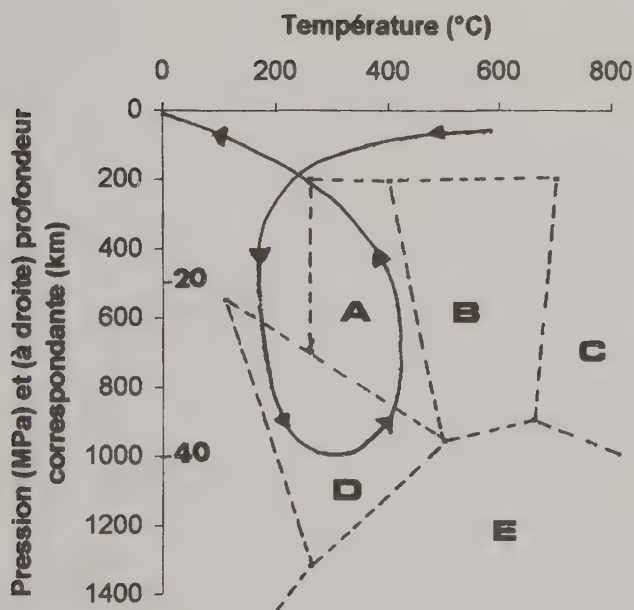
1a
Pl : plagioclase
Gl : glaucophane
Chl : chlorite



1b
Pl : plagioclase
Gl : glaucophane
Px : pyroxène

Document 2 : Trajet thermodynamique et champ de stabilité de quelques minéraux du métamorphisme.

Les termes associés aux lettres désignent les faciès de métamorphisme ; ils correspondent à des domaines particuliers de température et de pression pour lesquels les minéraux indiqués sont stables.



- A : schistes verts à chlorite
 B : amphibolites
 C : granulites
 D : schistes bleus à glaucophane
 E : éclogites

(D'après baccalauréat, septembre 97)

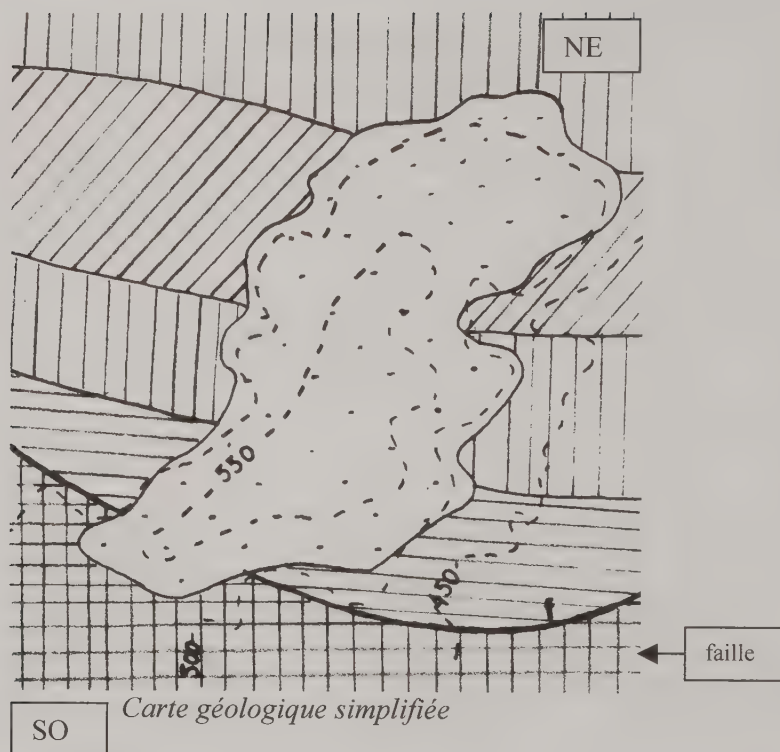
■ ■ Exercice 6..... (45 min)

La carte suivante représente, de manière très simplifiée, la géologie d'une région des Pyrénées. Le haut de cette carte correspond au Nord.

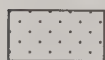
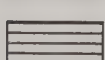
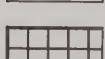
Il vous est également fourni un profil très simple correspondant à une coupe théorique effectuée selon un axe Sud-Ouest/Nord-Est (SO/NE, du coin inférieur gauche au coin supérieur droit de la carte).

A partir de l'étude de cette carte, complétez de manière simple le profil géologique en faisant apparaître les diverses couches de terrain.

Vous tirerez alors de ce profil des arguments en faveur du fait que cette région a subi une forte compression par le passé.

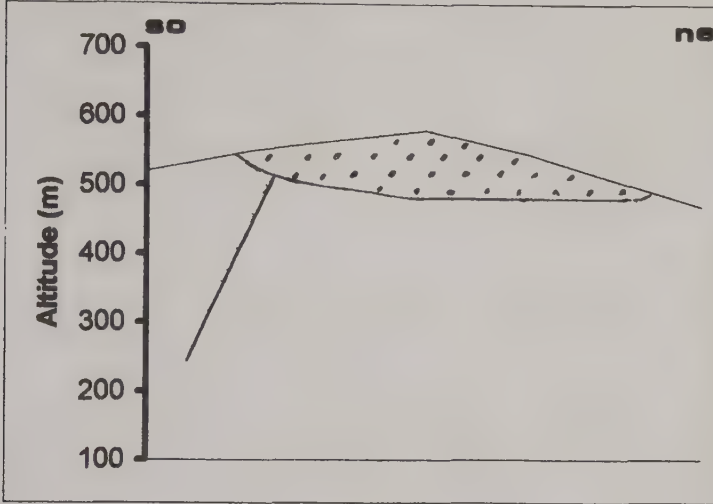


Colonne stratigraphique. Les terrains sont placés dans leur ordre chronologique, les plus anciens en bas, les plus récents en haut.

-  Argile du Miocène
-  Calcaire du Paléocène supérieur
-  Marnes et calcaires du Paléocène inférieur
-  Marnes de la fin du Crétacé supérieur
-  Schistes du début du Crétacé supérieur

Il est précisé que les argiles du Miocène sont posées en discordance avec les terrains sous-jacents.

Coupe géologique simplifiée à compléter.



.....■ CONTROLES ■.....

Exercice 1 (100 min ; 10 pts) Exercice type I

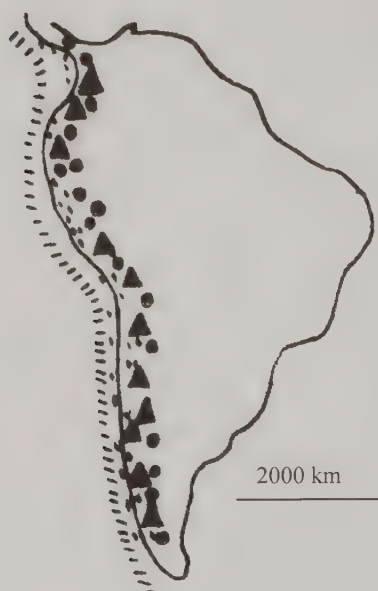
Au niveau des zones de subduction, existe un volcanisme de type explosif. Il y a également formation de plutons granodioritiques.

A partir de vos connaissances, vous décrirez et expliquerez les mécanismes en œuvre lors dans ces phénomènes, de la formation des magmas à leur arrivée en surface.

Exercice 2 (40 min ; 4 pts) Exercice type II1

La carte très simplifiée ci-dessous présente diverses caractéristiques de la marge Pacifique de l'Amérique du Sud.

Question : Montrez, en réalisant une coupe très simplifiée que vous situerez au centre du continent sud-américain, d'orientation Ouest-Est, que divers éléments sont en accord avec l'existence d'une zone de subduction à ce niveau et concourent à préciser le sens d'enfoncement de la plaque plongeante.



- Fosse
- Séismes peu profonds
- Séismes profonds
- ▲ Volcans

Exercice 3 (60 min ; 6 pts) Exercice type II2

On veut confronter des objets géologiques identifiés dans les régions du Chenaillet et du Queyras (Alpes françaises) à un modèle de l'histoire des Alpes. On dispose pour cela de données pétrographiques (document 1a), d'une grille pétrogénétique (document 1b) et des premières étapes d'un modèle actuel de l'histoire géologique des Alpes (document 2).

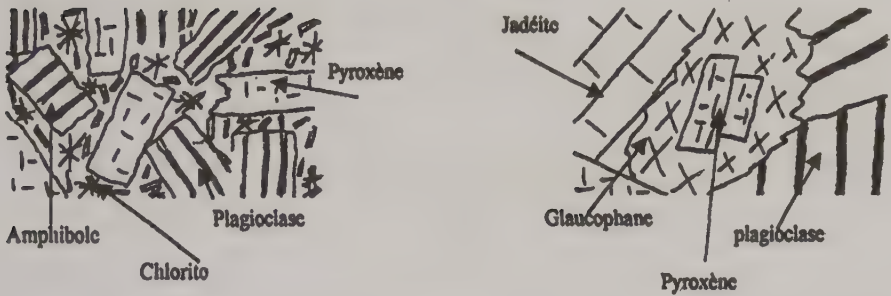
Question : A partir de la mise en relation des informations tirées de l'analyse des documents 1a et 1b, montrez que les roches G1 et G2 témoignent de certaines des étapes du modèle actuel et simplifié de l'histoire des Alpes présenté dans le document 2.

Positionnez G1 et G2 sur la grille 1b et sur les schémas du document 2, que vous rendrez avec la copie.

Le document 1a correspond à l'examen de lames minces de gabbros ophiolitiques G1 et G2 échantillonnés aujourd'hui dans la chaîne alpine franco-italienne :

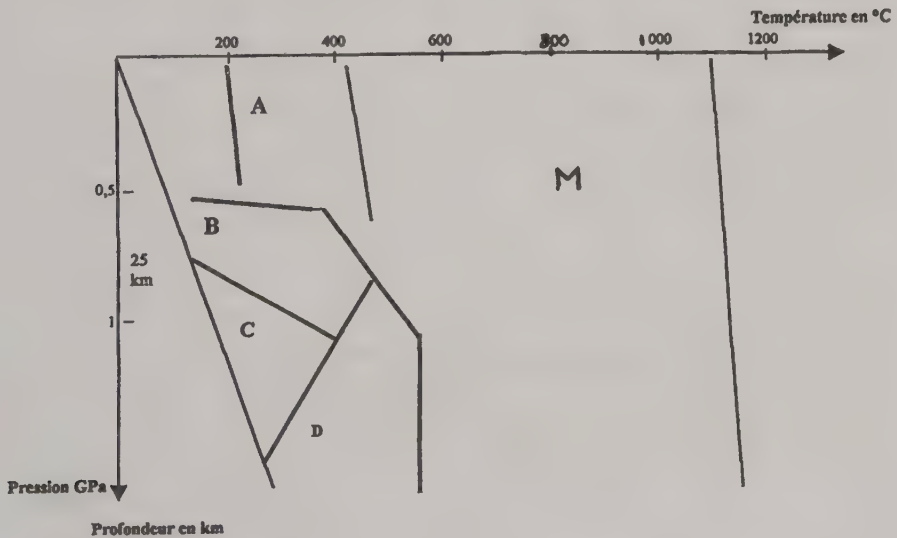
G1 massif du Chenaillet à 2600 m

G2 massif du Queyras à 2900 m



On précise que les minéraux de plagioclase et de pyroxène des roches G1 et G2 sont des minéraux reliques d'un gabbro originel.

Le **document 1b** est une grille pétrogénétique simplifiée et obtenue expérimentalement à partir des assemblages minéralogiques des roches de la croûte océanique (type basaltes, gabbros) soumis à des conditions de températures et de pression nouvelles.



- M = domaine de stabilité de l'association à plagioclase + pyroxène
- A = domaine de stabilité de l'association à chlorite + amphibole + plagioclase
- B = domaine de stabilité de l'association à glaucophane + plagioclase
- C = domaine de stabilité de l'association à glaucophane + jadeite
- D = domaine de stabilité de l'association à grenat + jadeite + glaucophane

Le document 2 ci-dessous présente un modèle géologique simplifié des étapes initiales de l'histoire des Alpes.

Schéma (a) –200 Ma



Schéma (b) –155 Ma

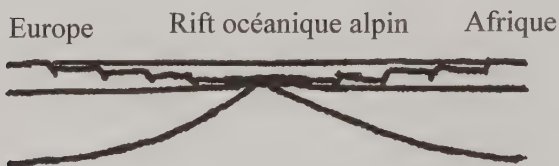


Schéma (c) –100 Ma



Schéma (d) –80 Ma



(Baccalauréat 2003, Sujet 0)

► Corrigé des exercices ▼

Corrigé 1

1. Faux. A la verticale d'une fosse se trouve une anomalie géothermique négative, liée au plongement de la plaque froide. En revanche une anomalie positive existe bien, mais au niveau de l'arc magmatique, liée à la remontée de magma chaud.

2. Faux. La densité de la plaque augmente avec son éloignement de la dorsale.

3. **Faux.** L'andésite est une roche volcanique.

4. **Vrai.**

5. **Faux.** Une zone de collision est caractérisée par les charriages et par des failles inverses qui traduisent un raccourcissement de la zone.

6. **Faux.** Les gabbros contenant glaucophane et jadéite ont subi un métamorphisme Haute Pression-Basse Température. Là encore, il s'agit d'une des caractéristiques de la subduction.

7. **Vrai.**

8. **Vrai.**

Corrigé 2

En s'éloignant de la dorsale, la **lithosphère océanique** se refroidit, s'épaissit, devient plus **dense**, tandis que les roches la constituant (basaltes et **gabbros** principalement) subissent un **métamorphisme**. La plaque subit alors un phénomène de **flexion** et s'enfonce dans le **manteau**, passant en force sous une plaque chevauchante (continentale ou océanique). A la zone de contact des plaques, des **séismes** pouvant être profonds, s'alignent sur le plan de **Bénioff**. La **déshydratation** thermique (avec formation d'**éclogites**) de la plaque plongeante libère de l'**eau** qui **hydrate** le manteau situé entre les deux plaques, provoquant la fusion des **péridotites** et la production de **magmas primaires** qui s'enrichissent en **silice** par **fusion partielle** et **contamination crustale** : c'est la **différenciation** magmatique. Ces magmas, moins denses, remontent à la surface, en donnant naissance à un volcanisme **andésitique et explosif**, les laves produites étant très **visqueuses**, localisé sur un **arc insulaire** ou une **chaîne montagneuse** récente. En profondeur, un refroidissement plus lent des magmas peut donner naissance à des **plutons** de roches grenues (**granitoïdes**), ce plutonisme s'accompagnant d'un métamorphisme de contact dans la roche encaissante, l'ensemble participant à la formation de **croûte continentale**.

Corrigé 3

Etude et description des échantillons de roche : nous pouvons constater tout d'abord que ces roches sont de deux types :

Andésite et rhyolite sont assez claires, dépourvues de cristaux apparent et elles contiennent des bulles (c'est particulièrement visible pour la rhyolite).

Granite et diorite sont au contraire des roches grenues, présentant des cristaux bien visibles à l'œil nu.

A propos de leur composition : là encore, deux groupes peuvent être distingués, mais ils diffèrent des deux groupes précédents :

Andésite et diorite sont assez riches en silice (autour de 60 %), contiennent environ 16 % d' Al_2O_3 , 3 % de MgO , 6 % de CaO et 4 % de Na_2O .

Granite et rhyolite sont très riches en silice (environ 75 %), mais plus pauvres en MgO (environ 0,4 %) et en CaO (environ 1 %). Pour l' Al_2O_3 et

Na_2O , les valeurs sont un peu plus faibles que pour le groupe précédent, mais restent comparables.

Finalement, deux groupes se distinguent, en fonction de la composition, mais dans chaque groupe il y a une roche grenue et une roche non grenue (structure microlithique, invisible sur les photos).

Composition Structure	Riche en silice (60 %)	Très riche en silice (75 %)
Grenue	Diorite	Granite
Non grenue	Andésite	Rhyolite

La similitude des compositions de ces roches prises deux à deux peut s'expliquer par une origine magmatique commune. Granite et rhyolite proviendraient d'un même magma ; andésite et diorite proviendraient d'un même magma, moins riche en silice que le précédent.

La structure des roches peut s'expliquer par leur temps de refroidissement. Andésite et rhyolite, non grenues doivent être des laves ayant subi un refroidissement rapide (les cristaux n'ont pas eu le temps de se former). Granite et diorite ont dû, au contraire, refroidir lentement et avoir tout le temps de bien cristalliser.

Notre tableau devient alors :

Composition Formation	Magma riche en silice (60 %)	Magma très riche en silice (75 %)
Roche plutonique	Diorite	Granite
Roche volcanique	Andésite	Rhyolite

Corrigé 4

A partir de quel âge une plaque océanique peut-elle, en théorie, plonger dans l'asthénosphère ?

Lorsque sa densité atteint celle de l'asthénosphère, c'est-à-dire 3,25.

La densité (d) de la lithosphère océanique dépend de l'épaisseur (e') du manteau lithosphérique (densité 3,3).

Elle est : $d = [(6 \times 2,9) + (e' \times 3,3)] / (6 + e')$, si l'on considère la croûte océanique (densité 2,9) d'épaisseur constante, égale à 6 km.

Pour que $d = 3,25$, d'après l'équation précédente, qu'il faut résoudre, nous avons : $e' = 42$ km environ.

L'épaisseur totale de la lithosphère est $e = e' + 6 = 48$ km.

A quel âge la lithosphère a-t-elle une telle épaisseur ?

Nous le déterminons grâce à l'équation : $e = 9,2 \cdot \sqrt{t}$, où e est l'épaisseur totale de la lithosphère et t l'âge de cette lithosphère.

Nous avons alors : $t = (48/9,2)^2 = 27,2 \text{ Ma}$.

C'est donc vers 27 Ma qu'en théorie, la lithosphère océanique peut commencer à s'enfoncer dans l'asthénosphère.

Corrigé 5

Justifions le trajet thermodynamique qui nous est proposé pour ce métagabbro.

Les conditions initiales nous sont données dans le texte de l'énoncé : le gabbro se forme initialement au niveau de la dorsale océanique, à 5 km de profondeur, à une température de 600 °C environ. Le point de départ du trajet thermodynamique (en haut à droite du graphique) est donc validé.

Les conditions finales sont également fournies dans l'énoncé, puisqu'il nous est indiqué que ce métagabbro a été trouvé dans les Alpes. Le point d'arrivée du trajet thermodynamique est donc également validé (point en haut à gauche du graphique).

Reste donc à confirmer les passages par les faciès schistes bleus et schistes verts, dans cet ordre.

Le faciès schiste bleu se caractérise par la présence de glaucophane. Or, les photos 1a et 1b présentent ce minéral. Le gabbro est bien passé par une phase schiste bleu.

Le faciès schiste vert se caractérise par la présence de chlorite. Ce minéral est bien présent dans le métagabbro (photo 1a).

Mais comment savoir si le métagabbro est passé dans l'ordre par les faciès schistes bleus-schistes verts, et non l'inverse (ce qui serait possible).

Il faut s'intéresser de plus près à la géométrie des minéraux au sein de la roche. Cela revient, en quelque sorte, à faire une datation relative de la formation des minéraux dans ce métagabbro.

Sur la photo 1b, on constate qu'il y a présence de glaucophane, mais pas de chlorite. On voit surtout que le glaucophane forme une auréole autour d'un cristal de pyroxène. Le pyroxène s'est tout d'abord formé, puis, lorsque les conditions sont devenues adéquates, le glaucophane s'est formé, à la marge du pyroxène. Ce dernier est inclus dans le glaucophane, il lui est antérieur.

Reprenons un raisonnement similaire avec la photo 1a qui nous montre simultanément glaucophane et chlorite. Nous pouvons constater que la chlorite forme une auréole autour du glaucophane. De même que précédemment, parce qu'il est inclus dans la chlorite, nous pouvons dire que le glaucophane lui est antérieur.

Il y a donc eu formation de glaucophane puis de chlorite.

Le trajet thermodynamique est donc confirmé. Lors de sa subduction, le gabbro s'est transformé et du glaucophane est apparu.

Au cours de la remontée du métagabbro vers la surface, la température a augmenté et il y a eu apparition de chlorite.

Ainsi cette roche est passée successivement par les stades gabbro, métagabbro faciès schistes bleus, métagabbro faciès schistes verts et enfin métagabbro à l'affleurement.

Il est bien question ici, de retrouver des arguments permettant de **confirmer** le trajet P, T, t (Pression, Température, temps) de ce métagabbro, et non de le déduire des données.

Corrigé 6

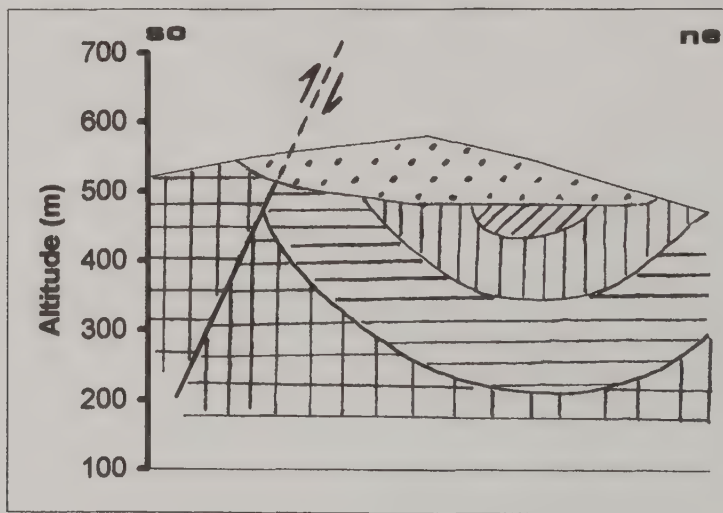
Il nous faut tout d'abord comprendre la géométrie des couches sédimentaires pour pouvoir compléter le profil qui nous est fourni.

Les terrains les plus récents (Miocène) reposent en discordance sur les autres terrains. Ceux-ci ont subi une érosion antérieure au dépôt des terrains du Miocène.

De plus, dans les deux tiers supérieurs de la carte, nous pouvons constater que les terrains présentent une symétrie, l'axe de cette symétrie étant localisé au niveau des terrains du paléocène supérieur. Il y a donc présence d'un pli et, les terrains plissés les plus récents étant au centre, on en déduit qu'il s'agit d'un synclinal.

En dessous de la faille, ce sont des terrains plus anciens qui affleurent.

Le profil peut être complété (légendes identiques à celles de la carte, cf. énoncé).



Cherchons alors des éléments argumentant en faveur de l'hypothèse d'une compression subie par cette région.

Premier argument : Une plissement s'est produit. Un tel mouvement résulte de formes compressives, qui se sont ici globalement exercées dans un axe Nord-Sud.

Second argument : La faille visible sur la carte est en fait une faille inverse (voir coupe ci-dessus). Une telle faille inverse est le produit d'une activité tectonique compressive.

La région a donc bien subi une compression (le résultat de cette compression est la formation des Pyrénées, de manière contemporaine à la formation des Alpes).

.....■ CORRIGE DES CONTROLES ■.....

Exercice 1

Attention à bien délimiter le sujet. Il ne s'agit pas ici de décrire dans le détail tout ce que l'on sait des zones de subduction, mais de s'intéresser à la genèse et à la différenciation des magmas qui engendrent plutonisme et volcanisme. Il faut, rapidement, redéfinir la notion de subduction. Une première partie, accompagnée d'un schéma peut permettre cela, ce schéma étant ensuite réutilisé. L'introduction doit, comme d'habitude, situer le problème dans son contexte scientifique et annoncer le plan.

Proposition de plan

Les dorsales océaniques assurent en permanence la création de plancher océanique. Ce plancher est résorbé au niveau de zones de subduction, où la plaque océanique plonge sous une autre plaque, et retourne dans le manteau. Les zones de subduction présentent diverses caractéristiques morphologiques (reliefs) et sismiques. On y trouve, en outre un volcanisme particulier, de type explosif. Il s'y forme également d'autres roches magmatiques telles que granite ou diorite, dont la particularité est d'être beaucoup plus riche en silice que les basaltes océaniques.

Par quel processus les magmas à l'origine de ces roches se forment-ils, et comment expliquer leurs caractéristiques ?

Après avoir rappelé la localisation de ces phénomènes, nous décrirons la genèse et la différenciation de ces magmas.

I) Localisation des phénomènes.

Coupe très schématique d'une zone de subduction, présentant la plaque plongeante, la remontée magmatique, le volcanisme et les plutons.

II) La genèse des magmas des zones de subduction.

Bien associer la déshydratation thermique de la plaque plongeante, éventuellement en donnant une réaction de cette déshydratation, et l'abaissement du point de fusion des péridotites du manteau sus-jacent.

Les magmas hydratés entrent en fusion et peuvent commencer leur ascension.

III) La différenciation magmatique.

Décrire la cristallisation fractionnée et la contamination crustale. La conséquence majeure de ces phénomènes est l'enrichissement en silice des magmas formés.

Le devenir de ces magmas est alors :

- Remontée rapide, volcanisme, mais les laves étant ici visqueuses et riches en gaz, il se produit un volcanisme andésitique explosif.
- Remontée lente et piégeage du magma qui va alors cristalliser en profondeur, lentement, donnant naissance aux plutons granodioritiques.

En conclusion : le mode de formation très particulier des magmas des zones de subduction explique les caractéristiques du volcanisme et des plutons (richesse en silice en particulier). Au niveau des zones de subduction, il y a disparition de plancher océanique, mais il y a également création de croûte continentale.

Exercice 2

Quels éléments argumentent en faveur de l'existence d'une zone de subduction ?

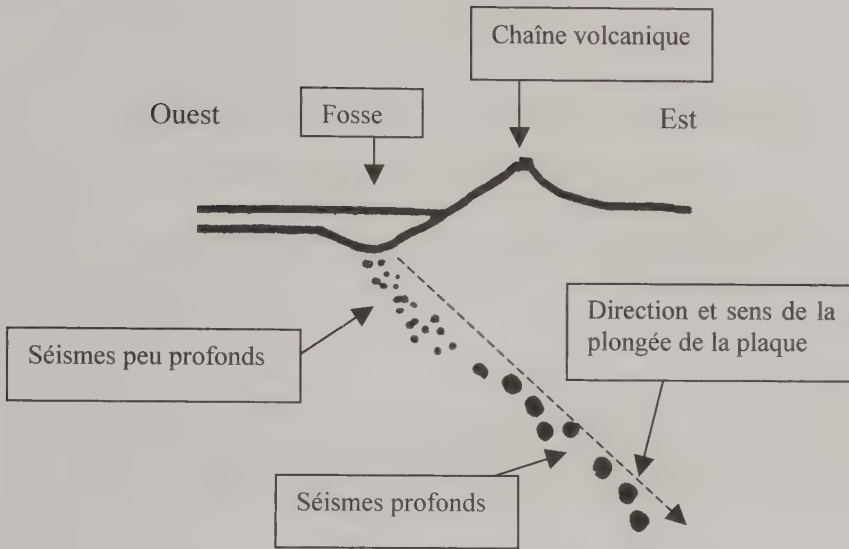
Il s'agit essentiellement de marqueurs structuraux : fosse (relief négatif important) et arc volcanique (attention, il ne s'agit pas ici d'un arc insulaire, ces volcans ne constituent pas un chapelet d'îles, mais ils sont présents sur un continent). Il existe également des marqueurs sismiques : séismes nombreux, parallèles à la fosse, et d'autant plus profonds que l'on s'éloigne de la fosse.

Ce qui permet d'orienter le sens de plongement de la plaque : position des volcans par rapport à la fosse : la plaque plonge sous le continent.

La détermination du sens du plan de Bénioff est évidemment un argument important. Plus on s'éloigne de la fosse vers l'Est et plus les foyers sismiques sont profonds. Le plan de Bénioff plonge donc vers l'Est.

Il s'agit donc d'une subduction au niveau de laquelle la plaque océanique Pacifique plonge vers l'est, sous le continent sud-américain.

Le schéma de la page suivante permet de valider et d'illustrer ces conclusions.



Exercice 3

Document 1a : Les deux roches présentées sont d'anciens gabbros océaniques (présence de minéraux reliques : pyroxènes et plagioclases) qui ont subi un métamorphisme (présence de minéraux caractéristiques : chlorite et amphibole dans le cas de G1 ; glaucophane et jadéite dans le cas de G2).

Document 1b : Ce document permet de constater que les minéraux de métamorphisme cités précédemment résultent de deux types de métamorphisme. Chlorite et amphibole, présents dans la roche G1, se forment dans le domaine A de la grille pétrogénétique (Basse Pression et Basse Température). Glaucophane et jadéite, présents dans la roche G2 se forment dans des conditions différentes : domaine C, correspondant à un métamorphisme de Haute Pression et Basse Température. Les conditions auxquelles la roche G2 a été soumise diffèrent donc des conditions auxquelles la roche G1 fut exposée.

La roche G1 est le témoin d'une croûte océanique au cours de son vieillissement, en s'éloignant de la dorsale (moins de 25 km de profondeur). La roche G2 témoigne d'une subduction subie par la croûte océanique (à plus de 25 km de profondeur).

Document 2 : Il ne reste plus qu'à positionner les roches sur les schémas fournis.

La roche G1 est positionnée au niveau de la croûte océanique non subduite des schémas b, c et d.

La roche G2 est positionnée sur le schéma d, au niveau de la croûte océanique en subduction.

Parenté entre êtres vivants actuels et fossiles – Phylogénèse – Evolution

LA RECHERCHE DE PARENTE CHEZ LES VERTEBRES– L'ETABLISSEMENT DE PHYLOGENIES

► Tous les êtres vivants ont un ancêtre commun

Vous avez appris, en classe de seconde, qu'en dépit de sa diversité, le règne vivant présente une grande unité. En effet, de prime abord, une bactérie, un pissenlit, un oiseau, un chat, ne semblent pas avoir grand-chose en commun, si ce n'est d'être vivants. Et pourtant, tous ces êtres sont composés d'une unité de base qui est la cellule. Ils peuvent avoir des voies métaboliques communes (la respiration par exemple). Ils sont les détenteurs d'une information génétique dont le support universel est la molécule d'ADN (Acide DésoxyriboNucléique). A chaque caractère correspond un gène au moins, l'expression de ce gène étant assurée par des mécanismes identiques chez tous les êtres vivants (transcription puis traduction, selon un code génétique universel).

De telles ressemblances suggèrent fortement une origine commune à tous les êtres vivants. Ces caractères qu'ils partagent tous sont hérités du ou des ancêtres communs qu'ils partagent. Des caractères spécifiques, propres à chaque branche du monde vivant, sont apparus plus tardivement, permettant d'expliquer la diversité du vivant.

Des caractères communs à plusieurs groupes d'êtres vivants, hérités d'un ancêtre commun sont dits caractères ancestraux (ou primitifs). En revanche, un caractère qui n'est spécifique qu'à un groupe précis d'êtres vivants est un caractère dérivé.

Les vertébrés (dont l'Homme fait partie) n'échappent pas à cette règle. Produits d'une histoire évolutive longue et complexe, ils témoignent, par certains caractères de leur ascendance commune, tandis que par d'autres caractères, ils se différencient les uns des autres.

Comment établir les liens de parenté entre les divers groupes de vertébrés ?

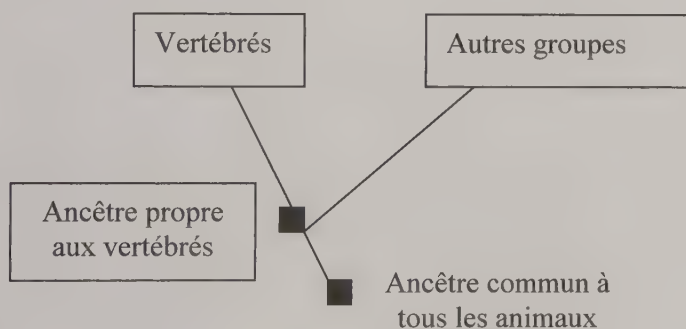
► La phylogénie : établissement de parentés

Les vertébrés partagent divers points communs. Ce sont tous des eucaryotes pluricellulaires animaux. Leur plan d'organisation (sous la dépendance d'un programme génétique de développement) est le même, en dépit d'apparentes différences.

Ils partagent donc des points communs à tous les êtres vivants (caractères ancestraux, issus de leur ancêtre commun). Mais ils ont également des caractères qui leur sont propres (caractères dérivés), qu'ils ont hérité de leur ancêtre commun exclusif.

Mais attention, un caractère peut être ancestral ou dérivé selon le groupe de référence que l'on choisit.

Par exemple, le fait de posséder des poils est ancestral pour le groupe des rongeurs, puisqu'il est partagé par d'autres mammifères. En revanche, ce même caractère de présence des poils est un caractère dérivé propre à l'ensemble des mammifères qui ne le partagent avec aucun autre groupe de vertébrés.



On nomme groupe monophylétique un groupe qui rassemble un ancêtre commun et tous ses descendants. Les vertébrés forment un groupe monophylétique.

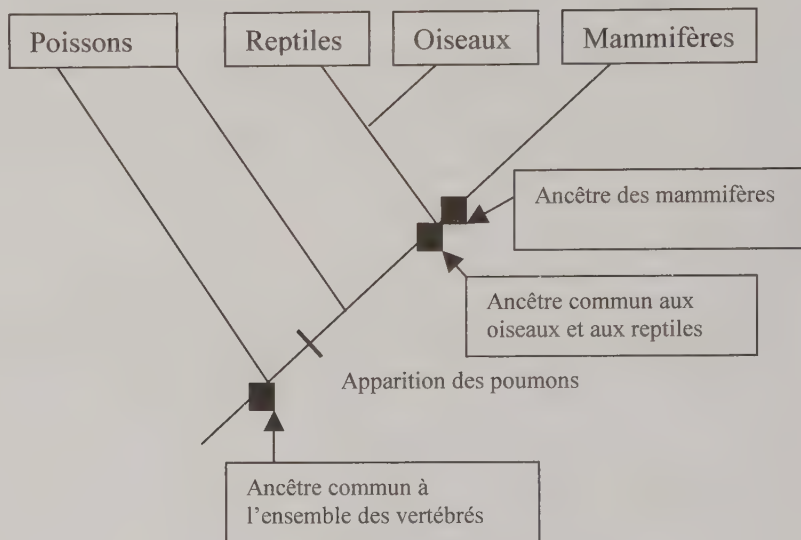
Mais tous les groupes animaux ne sont pas monophylétiques. Chez les vertébrés, il existe plusieurs groupes, ces groupes étant basés sur des ressemblances morphologiques, de mode de vie, etc.

Le groupe des mammifères est bien monophylétique. Il regroupe tous les descendants d'un ancêtre unique.

Le groupe des reptiles n'est, en revanche, pas monophylétique puisque, parmi les descendants de l'ancêtre commun à tous les reptiles, se trouvent également les oiseaux (descendants directs des dinosaures). Les reptiles forment un groupe paraphylétique. L'ensemble reptiles + oiseaux forme un groupe monophylétique.

Les poissons : On regroupe dans cet ensemble tout un ensemble d'animaux vivant en milieu aquatique. Mais ils sont, en réalité les descendants de plusieurs ancêtres distincts. Les poissons constituent un groupe polyphylétique.

Sur le plan évolutif et sur le plan de la phylogénie (classification basée sur les liens de parentés entre les espèces), ce groupe des poissons n'est pas pertinent.



La construction des arbres phylogénétiques : l'étude des phylogénies se fait en travaillant sur des groupes monophylétiques. On représente les liens évolutifs existant entre les espèces étudiées en les faisant apparaître sur un arbre. Le choix d'un groupe extérieur, qui tient en quelque sorte lieu de référence permet de bien faire apparaître le groupe monophylétique étudié. Le groupe extérieur ne doit posséder aucun des caractères dérivés propres au groupe étudié.

Sur l'arbre phylogénétique, on place des ancêtres communs, qui restent hypothétiques et théoriques, et ne correspondent pas à des fossiles identifiés. On fait apparaître sur cet arbre, l'apparition de caractères. La parenté entre deux groupes est d'autant plus forte qu'ils partagent un nombre important de caractères dérivés. On parle alors de groupes frères, partageant un même ancêtre commun exclusif.

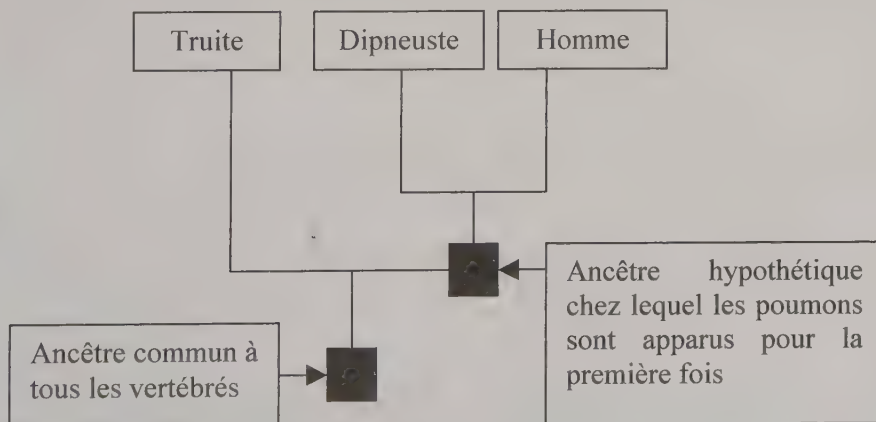
Pour établir les liens de parenté entre espèces, on s'appuie sur la comparaison de caractères homologues, dont on établit la polarité, c'est-à-dire que l'on détermine si le caractère observé chez une espèce est ancestral ou dérivé. Dire que les caractères sont homologues signifie qu'ils ont une même origine évolutive. Dans le cas d'un organe, par exemple, l'homologie est attestée par une même place dans le plan d'organisation, la même origine embryologique, les mêmes rapports avec les autres organes. Le membre supérieur humain, l'aile de l'oiseau, l'aile de la chauve-souris, la nageoire du dauphin sont des organes homologues.

En dépit de fonctions différentes ces membres ont le même plan d'organisation (membre dit chiridien) et sont hérités d'un ancêtre commun.

En revanche, l'aile d'un oiseau et l'aile d'un papillon ne sont pas homologues. Ce sont des structures dites analogues, qui ne sont pas héritées d'un ancêtre commun et qui se sont développées dans deux groupes distincts, par un phénomène de convergence adaptative. D'autres caractères, non morphologiques sont utilisés (caractères moléculaires par exemple).

Dans la pratique, il s'agit donc de travailler sur des groupes monophylétiques chez lesquels est définie la polarité de caractères homologues (caractère ancestral ou dérivé). L'arbre est alors construit, en imaginant d'hypothétiques ancêtres communs chez lesquels le caractère est apparu sous sa forme dérivée la première fois. Si deux arbres peuvent être construits à partir de la comparaison de différents caractères, le principe de parcimonie doit être appliqué. C'est-à-dire que l'on doit conserver l'arbre le plus économique en termes de modifications survenues.

Au terme de la construction de l'arbre phylogénétique, les liens de parenté évolutive entre espèces apparaissent. Les arbres phylogénétiques révèlent alors des faits qui peuvent parfois surprendre. Un exemple simple peut illustrer cela : le Dipneuste est un poisson, il vit dans l'eau, nage (ses nageoires diffèrent toutefois des nageoires à rayons des poissons plus traditionnels). Il est donc en apparence beaucoup plus proche d'un poisson classique tel que la Truite que d'un être humain. Mais ce poisson possède des poumons, ce que la Truite évidemment ne possède pas. Il a hérité ce caractère d'un ancêtre qui est également l'ancêtre commun de tous les vertébrés à poumons. Il a donc un ancêtre commun avec l'Homme, cet ancêtre n'étant pas partagé par la Truite. En dépit des apparences, le Dipneuste est donc plus étroitement apparenté à l'Homme qu'à la Truite.



Arbre phylogénétique très simplifié montrant la parenté de l'Homme et du Dipneuste

Un tel arbre souligne l'importance que revêt le fait de tenir compte des relations de parenté évolutive et non des simples ressemblances.

LA LIGNEE HUMAINE

L'Homme actuel (*Homo sapiens*) résulte d'une évolution débutée il y a 3,8 milliards d'années avec l'apparition de la vie. Si l'on veut pouvoir reconstituer cette histoire évolutive, il faut tout d'abord bien connaître les caractéristiques de l'Homme, dont on va alors chercher les plus proches parents évolutifs. Il faut également dater approximativement les innovations évolutives qui ont conduit, par toute une succession de phénomènes (dont beaucoup sont aléatoires comme nous l'avons déjà vu), à l'apparition de l'Homme.

► La place de l'Homme dans le règne vivant

L'étude et la datation des fossiles permettent de situer dans le temps l'apparition des principaux groupes auxquels l'Homme appartient.

L'Homme est un eucaryote, ses cellules contiennent un noyau et des organites intracellulaires tels que mitochondries. Les eucaryotes sont apparus il y a approximativement 1,5 Ga.

L'Homme est un vertébré, il possède un squelette. Les premiers vertébrés sont apparus il y a 500 Ma environ.

L'Homme est un tétrapode, pourvu de quatre membres chiridiens. Les tétrapodes sont apparus il y a environ 390 Ma.

Le développement embryonnaire de l'Homme se fait au sein d'un amnios. L'Homme fait partie des amniotes (avec l'ensemble des mammifères, des oiseaux et des reptiles), groupe apparu il y a environ 340 Ma.

L'Homme présente des poils, il allaite ses jeunes. Il fait partie des mammifères, présents sur Terre depuis 220 Ma environ.

Avec un pouce opposable aux autres doigts, et un cerveau important relativement à la taille corporelle, l'Homme fait partie des primates, apparus il y a environ 65 Ma, suite à la radiation adaptative des mammifères à l'issue de la crise Crétacé-Tertiaire.

Parmi les primates, l'Homme fait partie d'un groupe d'êtres ne possédant pas de queue : les hominoïdes, apparus il y a environ 25 Ma.

Avec le Gorille et le Chimpanzé, l'Homme est un hominidé, groupe apparu il y a environ 10 Ma.

Enfin l'Homme est un homininé, groupe apparu il y a 4 Ma. L'Homme est actuellement le seul représentant de ce groupe qui fut autrefois beaucoup plus diversifié et florissant.

Divers arguments (morphologiques, moléculaires, anatomiques, comportementaux) permettent d'affirmer que les plus proches parents évolutifs actuels de l'Homme sont les grands singes africains (Gorille, Chimpanzé et Bonobo). L'Homme partage un ancêtre commun récent avec ces grands singes. Il reste à savoir quelles sont les caractéristiques qui distinguent l'Homme de ses plus proches parents évolutifs.

► Les critères d'appartenance à la lignée humaine

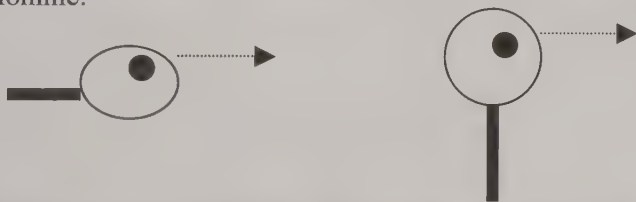
Quelles sont les caractéristiques qui nous distinguent de nos proches cousins ? Quelles spécificité doit présenter une espèce fossile pour pouvoir être considérée comme faisant partie de la lignée humaine ?

Critères liés à la bipédie

Contrairement au Chimpanzé (capable de se tenir debout pendant de courtes périodes), l'Homme est un bipède permanent. Cette aptitude s'accompagne de particularités morphologiques précises, que l'on peut identifier si l'on compare l'Homme au Chimpanzé.

- Courbures de la colonne vertébrale : alors que la colonne vertébrale ne présente qu'un courbure chez le Chimpanzé, il en existe quatre chez l'Homme.

- Position du trou occipital : ce trou (également nommé *foramen magnum*) qui permet l'insertion de la colonne vertébrale sur le crâne est situé en arrière du crâne chez le Chimpanzé, alors qu'il se trouve sous le crâne chez l'Homme.



Représentation simplifiée très schématique de l'insertion de la colonne vertébrale (trait épais) sur le crâne (cercle blanc) chez un non bipède (Chimpanzé, à gauche) et chez un bipède permanent (Homme, à droite). Le simple fait de devoir regarder (flèche, l'œil est le rond noir) au devant lors des déplacements impose que cette insertion soit située en dessous du crâne chez un bipède.

- Le bassin : celui du Chimpanzé est long et étroit. Chez l'Homme, il est en revanche court et évasé et sert de réceptacle aux organes de l'abdomen.

- L'angle d'inclinaison du fémur : le fémur est vertical chez le Chimpanzé, alors qu'il est tourné vers l'intérieur chez l'Homme.

- Le pied : non spécialisé dans la locomotion chez le Chimpanzé, il garde un pouce opposable et peut donc servir à saisir des objets. Chez l'Homme, le pied perd cette faculté (pouce non opposable) et ne sert plus qu'à la locomotion. Une voûte plantaire est également présente.

- L'articulation du genou, le col du fémur, un rapport (longueur du membre supérieur)/(longueur du membre inférieur) plus réduits que les grands singes...

Critères liés au crâne

Outre la position du trou occipital, dont nous venons de parler, il existe de nombreuses différences entre les crânes d'un Homme et d'un singe anthropomorphe tel un Chimpanzé.

- Volume crânien : il est réduit chez le Chimpanzé (environ 400 cm³) et beaucoup plus élevé chez l'Homme (1400 cm³ environ).
- Présence d'un bourrelet sus-orbitaire (au-dessus de l'orbite) chez le Chimpanzé, absent chez l'Homme.
- Partie arrière du crâne en ogive chez le Chimpanzé (chignon occipital), alors que l'occiput chez l'Homme est beaucoup plus arrondi.
- Mâchoire en U chez le Chimpanzé, avec des dents fortes (en particulier les canines). Chez l'Homme la mâchoire, moins puissante, est parabolique, les dents sont moins fortes. Ces formes différentes de mâchoires sont à mettre en lien avec un régime alimentaire, lui aussi, différent.
- Prognathisme (projection en avant de la face) prononcé chez le Chimpanzé (adulte surtout, c'est en effet beaucoup moins marqué chez le jeune). Chez l'Homme la face est verticale, il n'y a pas prognathisme.
- Présence chez l'Homme, d'un front, d'un menton, absents chez le Chimpanzé.

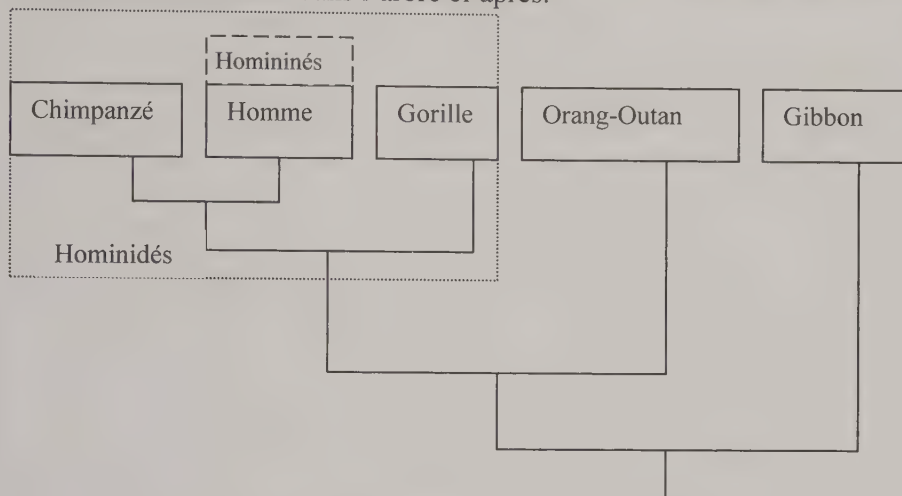
Critères génétiques et moléculaires

- L'Homme présente seulement 1 % environ de gènes qui le distinguent du Chimpanzé. Autrement dit, nous sommes, sur le plan génétique, identiques à un Chimpanzé à 99 % environ.
- Le caryotype de l'Homme présente $2n = 46$ chromosomes. Chez le Chimpanzé, il existe $2n = 48$ chromosome (comme chez le Gorille). Dans le détail, on constate toutefois de grandes ressemblances. Les différences peuvent, pour la plupart, s'expliquer par des phénomènes de fusion chromosomique (les chromosomes 2p et 2q du Chimpanzé correspondent au chromosome 2 de l'Homme), d'inversion,... L'ancêtre commun à ces diverses espèces devait posséder 48 chromosomes, le passage à 46 chromosome apparaît alors comme étant un caractère dérivé, propre à la lignée humaine.
- La comparaison de protéines et de gènes homologues permet de retrouver des ressemblances, qui témoignent d'une origine commune récente aux différents singes anthropomorphes et à l'Homme. Les différences s'expliquent par les mutations accumulées dans chaque groupe après leur séparation.

Critères sociaux, culturels, comportementaux

L'Homme est caractérisé par une culture complexe transmissible par le biais d'une éducation apportée aux jeunes, par sa capacité à concevoir, fabriquer, utiliser des outils qu'il conserve et peut améliorer. Il possède une pensée réflexive, une conscience de sa propre mortalité, qui se traduit par des rites funéraires, des religions. Il pratique l'art sous diverses formes, et possède un langage articulé complexe. Des moulages endocrâniens permettent de mettre en évidence une vascularisation cérébrale importante, chez l'Homme au niveau de zones correspondant au langage, ce qui n'est pas le cas chez le Chimpanzé, ni aucun des autres anthropomorphes.

Les divers critères de parenté retenus permettent d'établir les proximités évolutives schématisées dans l'arbre ci-après.



Arbre phylogénétique simplifié des hominoïdes

► L'Hominisation : une évolution buissonnante

La recherche d'ancêtres fossiles possibles de l'Homme passe par la recherche de l'apparition de caractères dérivés, propres à la lignée humaine :

- * Développement de la bipédie
- * Réduction de la face
- * Augmentation du volume crânien
- * Acquisition d'une culture, d'art, d'outils réutilisables.

Les découvertes faites en paléanthropologie ne cessent de venir bouleverser les arbres phylogénétiques qui sont établis et, même si les grandes lignes semblent maîtrisées, le détail de l'histoire évolutive de l'Homme reste encore à préciser.

L'essentiel, dans ses débuts, de l'histoire évolutive de la lignée humaine, se situe en Afrique de l'Est. La localisation majoritaire des fossiles humains et préhumains en Afrique de l'Est a conduit Y. Coppens à émettre la théorie de l'East Side Story, aujourd'hui remise en cause par la découverte de fossiles d'hominidés au Tchad. Cette théorie suppose que l'hominisation résulte de bouleversements écologiques survenus il y a 8 millions d'années environ, avec la réactivation du rift est-africain. Les mouvements tectoniques importants auraient provoqué des variations climatiques durables : d'une forêt de type équatorial étendue de l'Est à l'Ouest de l'Afrique, des modifications seraient intervenues, conduisant à l'apparition d'une savane à l'Est du rift. Ce changement environnemental aurait pu favoriser l'apparition de la bipédie, à l'Est du rift et donc conduire à l'émergence de la lignée humaine.

Quelles grandes étapes de l'histoire de la lignée humaine peuvent être identifiées ?

* -6 Ma : apparition d'*Orrorin tugenensis*. Cet individu est bipède et, à ce titre, fait bien partie de la lignée humaine.

* Entre -4,5 et -1 Ma, présence des Australopithèques. Ils sont bipèdes comme en témoignent les restes fossiles qui ont été découverts, ainsi que des traces de pas fossiles découverts en Tanzanie, à Laetoli, datées d'approximativement 3,5 Ma. Ce groupe présente des caractères dérivés propres à la lignée humaine (bipédie avec un bassin qui s'élargit, début de réduction de la face, fémur oblique), mais conserve encore des caractères ancestraux : volume crânien réduit (environ 450 cm³), mode de vie encore partiellement arboricole. De ses plus anciens représentants (*Australopithecus ramidus*, -4,5 Ma et *A. anamensis*, -4,2 Ma) jusqu'aux plus récents (*Paranthropus robustus*, jusqu'à -1 Ma), ce groupe s'est considérablement diversifié, plus d'une dizaine d'espèces ayant été décrites. Ils ont cohabité pendant environ 1,5 Ma avec des représentants du genre *Homo*.

* Les premiers représentants du genre *Homo* apparaissent il y a environ 2,5 Ma, avec *Homo habilis*. Ces individus présentent une capacité crânienne plus élevée que les Australopithèques (550 à 680 cm³). Des outils leur sont associés avec certitude : il s'agit de galets aménagés. Ils vivent en milieu plus ouverts (savanes) que les Australopithèques. Le prognathisme est moins marqué que chez les australopithèques.

* Vers -1,5 Ma apparaît *Homo erectus* (jusqu'à -0,3 Ma). Le volume crânien de ces individus est compris entre 800 et 1200 cm³. Leur face est plus réduite que chez *H. habilis*. Ils utilisent des bifaces, maîtrisent le feu vers -500000 ans et partent à la conquête du monde (Proche-Orient, Asie, Europe, avec par exemple, l'Homme de Tautavel découvert dans le Sud de la France). Ils devaient être capables d'un langage articulé.

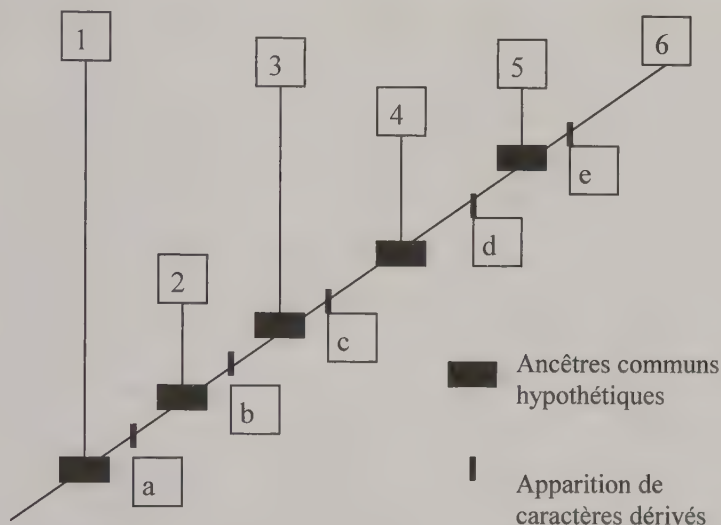
* Descendants vraisemblables de ces *Homo erectus* ayant colonisé l'Europe (mais ils peuvent également être les descendants d'*Homo ergaster*), les Néandertaliens (*Homo neanderthalensis*) apparaissent il y a 120000 ans, pour s'éteindre il y a 35000 ans environ. Ils présentent une capacité crânienne élevée (1600 cm³), mais leur face reste assez archaïque (bourrelets sus-orbitaires présents par exemple). Leur outillage est diversifié et ils pratiquent des rites funéraires.

* *Homo sapiens* apparaît vers -100000 ans. Le volume crânien de cette espèce est de l'ordre de 1400 cm³. Leur morphologie est celle de l'Homme actuel. L'outillage se diversifie considérablement et l'art se développe. L'ensemble de la planète est colonisé. De chasseurs-cueilleurs nomades, ils vont se sédentariser et devenir agriculteurs-éleveurs.

L'établissement des relations de parenté au sein de la lignée humaine est difficile à faire. Tout d'abord, parce que les fossiles trouvés ne sont généralement que fragmentaires. La remise en cause des phylogénies admises est très fréquente. La grande diversité des espèces d'Australopithèques et d'*Homo* (*H. rudolfensis*, *heidelbergensis*, *antecessor*, *ergaster*...) ne facilite pas la tâche. Outre son caractère buissonnant, cette évolution de la lignée humaine est de plus non continue et régulière. Des

ruptures et des discontinuités existent, dont les arbres phylogénétiques ont du mal à rendre compte.

Sur la base de ce qui a été évoqué ici, nous pouvons néanmoins proposer un arbre phylogénétique simplifié.



Arbre phylogénétique simplifié (et hypothétique) de la lignée humaine (à laquelle le Chimpanzé, groupe extérieur, n'appartient pas).

1 : Chimpanzé ; 2 : *Orrorin tugenensis* ; 3 : Australopithèques ; 4 : *Homo habilis* ; 5 : *Homo erectus* ; 6 : *Homo sapiens*.

a : apparition de la bipédie ; b : début de réduction de la face ;

c : augmentation du volume crânien, apparition de l'outillage ;

d : bifaces, apparition du langage articulé ; e : développement de l'art.

► L'origine des hommes modernes

L'Homme moderne (*Homo sapiens*) a vraisemblablement une origine unique, africaine ou proche-orientale (Palestine). L'étude des différentes populations humaines actuelles montrent qu'elles partagent toutes les mêmes gènes et les mêmes allèles

Les différences entre ces diverses populations tiennent aux fréquences alléliques que l'on peut y trouver. Les différences de fréquences alléliques sont d'autant plus élevées que les populations sont éloignées. A partir d'une même population africaine, il y aurait donc eu des migrations qui expliqueraient le peuplement de la planète, mais aussi l'unité et la diversité des populations humaines.

▀ Enoncés des exercices ▀

■ Exercice 1 (15 min)

Indiquez si les affirmations suivantes sont ou non exactes. Si vous les estimez inexactes, rectifiez-les de manière à les rendre exactes. Ces modifications devront être les plus simples possibles.

1. Etablir la polarité d'un caractère, c'est déterminer si ce caractère est, pour un groupe donné, ancestral (et dans ce cas le caractère peut se retrouver dans d'autres groupes) ou dérivé (et il est alors spécifique du groupe considéré).
2. Il existe une homologie entre deux caractères s'ils ont une origine commune, héritée d'un ancêtre commun.
3. Un groupe monophylétique regroupe des espèces ayant des ancêtres communs bien distincts.
4. Une phylogénie est une classification basée sur des ressemblances morphologiques entre des espèces différentes.
5. Le trou occipital est le point d'insertion de la colonne vertébrale sur le crâne. Il est plus avancé chez le Chimpanzé que chez l'Homme.
6. Les Australopithèques sont caractérisés par leur bipédie et leur volume cérébral élevé, voisin de 800 cm^3 .
7. Ce sont les Homo erectus qui maîtrisèrent le feu il y a 500000 ans environ. Les Homo sapiens, eux, inventèrent l'art.
8. Les diverses populations humaines diffèrent les unes des autres par des gènes spécifiques.

■ Exercice 2..... (20 min)

Nous allons chercher à établir l'arbre phylogénétique regroupant diverses espèces de vertébrés : la truite, la mésange, la rainette, le crocodile et la souris.

1. A quelles classes de vertébrés (dans la classification traditionnelle) appartiennent ces espèces ? Constituent-elles un groupe monophylétique ?
2. Voici différents caractères étudiés chez ces espèces. Leur polarité (état ancestral ou dérivé) est indiqué ci-après.

Polarités des caractères étudiés :

Caractère	Etat ancestral	Etat dérivé
Membre chiridien à doigts	Absent	Présent
Gésier	Absent	Présent
Plumes	Absentes	Présentes
Poils	Absent	Présent

Mamelles	Absent	Présent
Amnios	Absent	Présent

Polarité des caractères chez les espèces étudiées (0 : état ancestral ; 1 : état dérivé).

Caractère	Truite	Crocodile	Mésange	Souris	Rainette
Membre chiridien à doigts	0	1	1	1	1
Gésier	0	1	1	0	0
Aile	0	0	1	0	0
Poils	0	0	0	1	0
Mamelles	0	0	0	1	0
Amnios	0	1	1	1	0

A partir de ces informations, construisez l'arbre phylogénétique simplifié correspondant à ces espèces.

■■■ Exercice 3 (45 min)

On cherche à expliquer un arbre phylogénétique comportant l'Otarie (mammifère), groupe extérieur et à y placer deux fossiles.

- le Compsognathus (petit dinosaure)
- l'Archéoptéryx, présent dans des calcaires datés de 150 millions d'années.

Document 1 : tableau des états ancestraux et dérivés des caractères étudiés

Caractère	Etat ancestral	Etat dérivé
Fosse temporale	une	Deux
Fenêtre mandibulaire	absente	Présente
Nombre de doigts d'appui du pied	cinq	Trois et le quatrième vers l'arrière
Plumes	absentes	Présentes
Queue	longue	Courte, vertèbres fusionnées
Dents	présentes	Absentes
Bréchet	absent	Présent

Document 2 : les états des caractères chez les espèces fossiles et actuelles
0 : état ancestral 1 : état dérivé

Caractère	Otarie	Lézard	Crocodile	Poule	Compsognathus	Archéoptéryx
Fosse temporale	0	1	1	1	1	1
Fenêtre mandibulaire	0	0	1	1	1	1

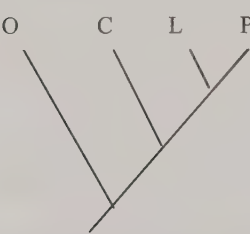
Nombre de doigts d'appui du pied	0	0	0	1	1	1
Plumes	0	0	0	1	0	1
Queue	0	0	0	1	0	0
Dents	0	0	0	1	0	0
Bréchet	0	0	0	1	0	0

Remarque : l'atrophie du doigt 3 est un caractère propre au compsoognathus.

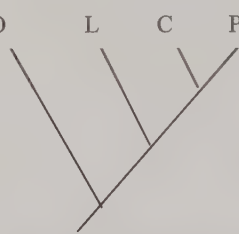
Document 3 : propositions d'arbres phylogénétiques

O = Otarie C = Crocodile L = Lézard P = Poule

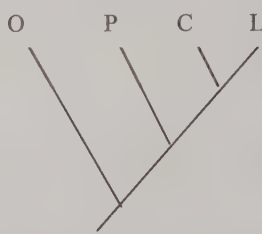
Arbre n° 1



Arbre n° 2



Arbre n° 3



Les intersections de deux lignes correspondent à un nœud où se situe l'ancêtre commun hypothétique.

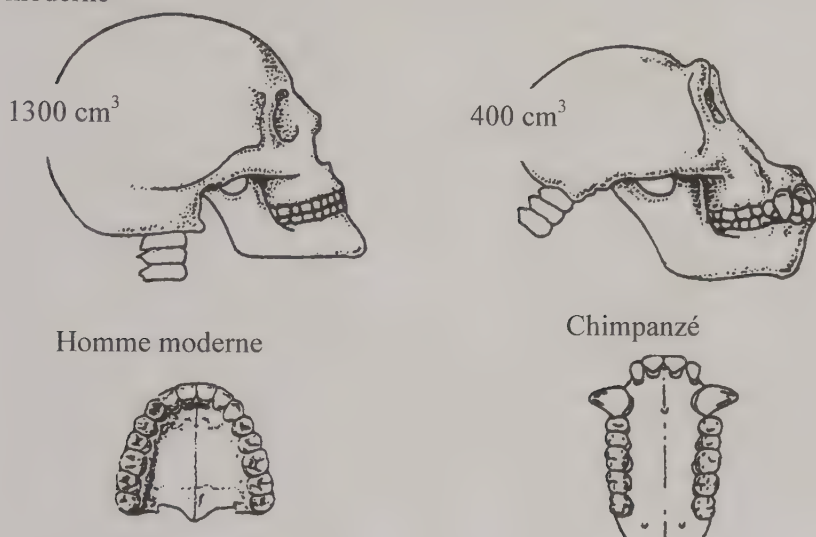
1. Définir l'état dérivé d'un caractère.
2. Justifier le choix de l'Otarie comme groupe extérieur (témoin).
3. Après avoir recopié les trois arbres phylogénétique (document 3), placer sur chacun les transformations évolutives des caractères proposés. Quel est l'arbre le plus probable et pourquoi ?
4. Placer sur l'arbre phylogénétique que vous avez retenu, la branche du Compsognathus et celle de l'Archéoptéryx. Justifier votre réponse.
5. En ne considérant que l'Archéoptéryx et la Poule, identifier les caractères propres à leur ancêtre commun hypothétique et définir ce que l'on appelle un groupe monophylétique.
6. Quelle information supplémentaire apporte la situation d'un fossile tel que l'Archéoptéryx dans un arbre phylogénétique. Illustrer votre propos à partir de l'arbre retenu à la question 4.

(Concours d'entrée Ecoles des Services de Santé des Armées, 2003)

■■■ **Exercice 4** (40 min)

Les documents 1, 2 et 3 présentent certaines des caractéristiques de l'Homme et de singes anthropomorphes. Montrez quels parentés et différences entre ces espèces ces documents permettent de mettre en évidence.

Document 1 : Crânes et arcades dentaires de Chimpanzé et d'Homme moderne

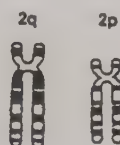


Document 2 : Comparaison des caryotypes de l'Homme et du Chimpanzé. L'analyse comparée des caryotypes a montré que le Chimpanzé et l'Homme ont respectivement 48 et 46 chromosomes. On considère généralement que l'Homme et le Chimpanzé auraient eu un ancêtre commun à 48 chromosomes. On a représenté ici un seul chromosome de chaque paire.

Chromosome 2 humain



Chromosomes 2 du Chimpanzé. Il en existe deux types, notés 2p et 2q



Chromosome 4 humain



Chromosome 4 du Chimpanzé



Document 3 : Les ADN qui codent pour une protéine, ont été séquencés chez trois Primates. Les séquences polypeptidiques correspondantes ont été établies.

Homme :	10	20	30	40	50
	ATA ACC ATG CAC ACT ACT ATA ACC ACC CTA ACC CTG ACT TCC CTA ATT CCC				
	Met Thr Met His Thr Thr Met Thr Thr Leu Thr Leu Thr Ser Leu Ile Pro				

Chimpanzé :

ATA ACC ATG TAT ACT ACT ATA ACC ACC TTA ACC CTA ACT CCC TTA ATT CTC
 Met Thr Met Tyr Thr Thr Met Thr Thr Leu Thr Leu Thr Pro Leu Ile Leu

Gorille :

ATA ACT ATG TAC GCT ACC ATA ACC ACC TTA GCC CTA ACT TCC TTA ATT CCC
 Met Thr Met Tyr Ala Thr Met Thr Thr Leu Ala Leu Thr Ser Leu Ile Pro
(Légèrement modifié, d'après bac. 95 et concours)

■ Exercice 5..... (40 min)

Les documents suivants concernent des fossiles ou des traces d'activité d'individus appartenant à la lignée humaine. Montrez en quoi ces documents permettent d'illustrer les principales caractéristiques de l'évolution de la lignée humaine. Citez d'autres caractéristiques des espèces fossiles présentés.

Document 1 : Empreintes d'Hominidés du genre Australopithèque laissées dans des cendres volcaniques à Laetoli (Afrique de l'Est).
 (Entre -3,8 et -3,6 Ma).



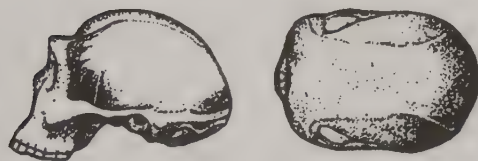
Document 2 : Outils associés à divers représentants de la lignée humaine (de gauche à droite, Homo habilis, Homo erectus et Homo sapiens).



Document 3 : Crânes caractéristiques de trois étapes de la lignée humaine. De haut en bas : Australopithecus africanus (volume cérébral moyen 440 cm^3), Homo erectus (volume cérébral moyen : 940 cm^3) et homo sapiens (volume cérébral moyen 1230 cm^3).



Australopithecus africanus



Homo erectus



Homo sapiens

(Partiellement inspiré de bac. Asie, 98)

.....■ CONTROLES ■.....

Exercice 1 (100 min ; 10 pts) type I

Les Homininés (exemple l'Homme) et d'autres Hominidés (ex : Gorille, Chimpanzé) appartiennent à l'ordre des Primates.

Question : Après avoir exposé de façon structurée les comparaisons anatomiques et chromosomiques montrant les différences entre ces deux groupes, donnez les critères d'appartenance à la lignée humaine. Vous apporterez des précisions sur les espèces (que vous daterez) chez qui certaines de ces caractéristiques sont apparues.

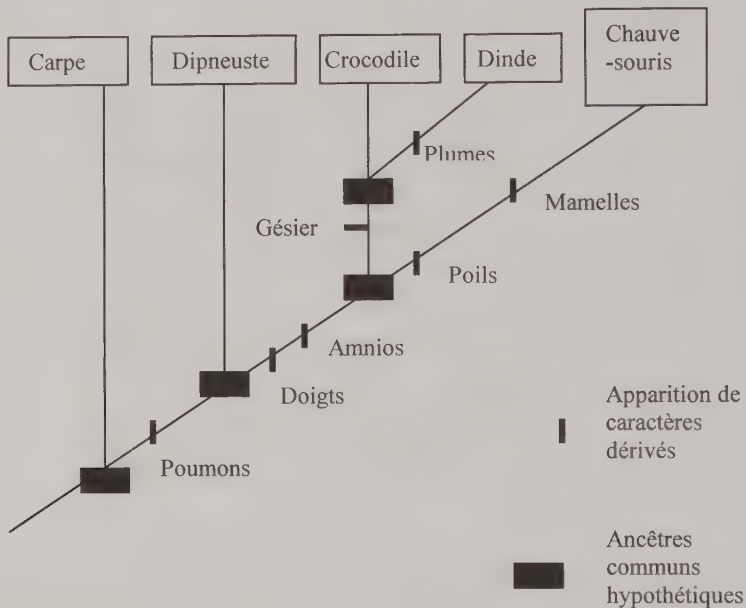
(Inspiré de bac. 2000)

Exercice 2 (40 min ; 4 pts) type II1

L'arbre phylogénétique suivant présente les relations évolutives entre divers vertébrés : deux poissons (Carpe et Dipneuste), un reptile (Crocodile), un oiseau (Dinde) et un mammifère (Chauve-souris).

Question : A partir de l'étude de cet arbre, indiquez :

- Pourquoi les poissons et les reptiles ne constituent pas des groupes monophylétiques (regroupant un ancêtre et tous ses descendants).
- Si le Dipneuste est plus apparenté à la Carpe qu'à la Chauve-souris.
- Quel est le portrait-robot de l'ancêtre commun au Crocodile, à la Dinde et à la Chauve-souris.



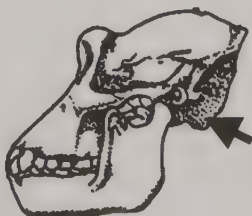
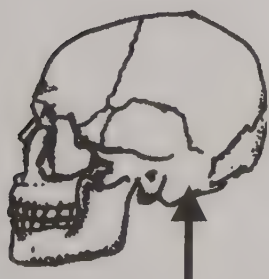
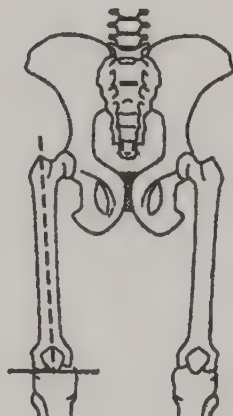
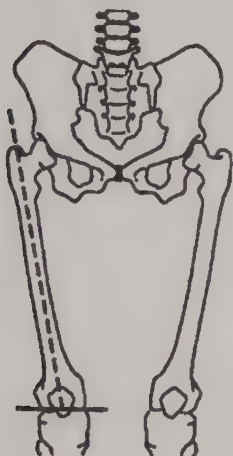
Exercice 3 (40 min ; 4 pts) Exercice type II1

Le document de la page suivante présente quelques caractéristiques osseuses de l'Homme (Hominidé et Homininé) et de grands singes (Hominidés non Homininés). Des restes osseux d'une espèce A, découverts en Afrique de l'Est vous sont également présentés.

Question : Montrez, en utilisant les conclusions tirées de l'analyse du document fourni, que les restes osseux A appartiennent à une espèce d'Homininé. A partir d'arguments tirés du même document, vous tenterez de situer cette espèce dans la lignée humaine.

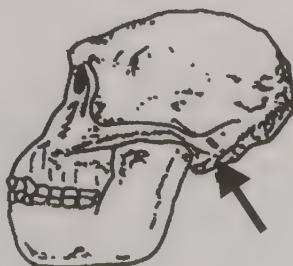
Homme : volume crânien : 1300 à 1500 cm³, arcade dentaire parabolique, bipède.

Grand singe : volume crânien : 350 à 450 cm³, arcade dentaire en U, non bipède



(La flèche indique la position du trou occipital)

Espèce A : Volume cérébral voisin de 430 cm³, arcade dentaire parabolique.



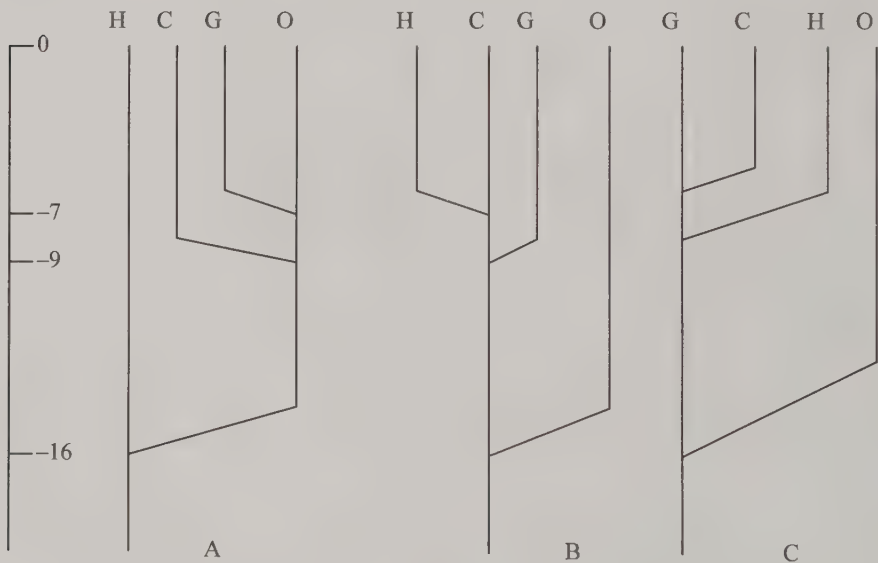
Exercice 4 (60 min ; 6 pts) Exercice type II2

Les apports de nombreuses disciplines (paléontologie, biologie moléculaire...) ont permis de formuler des hypothèses sur la manière dont a pu s'opérer, au cours de l'évolution, la séparation entre la lignée humaine et celle des singes anthropomorphes (Chimpanzé, Gorille, Orang-Outan). Mais les résultats diffèrent selon les méthodes employées (hypothèses A, B ou C du document 1). On se propose de rechercher des arguments en faveur de ces filiations possibles.

Question : Grâce aux documents 2 et 3 proposés, présentez les arguments permettant d'effectuer un choix parmi les filiations hypothétiques proposées dans le document 1.

Document 1 : Trois hypothèses (A, B et C) de filiation entre l'Homme et les singes anthropomorphes (Chimpanzé, Gorille, Orang-Outan).

Ma



H = Homme, C = Chimpanzé, G = Gorille, O = Orang-Outan

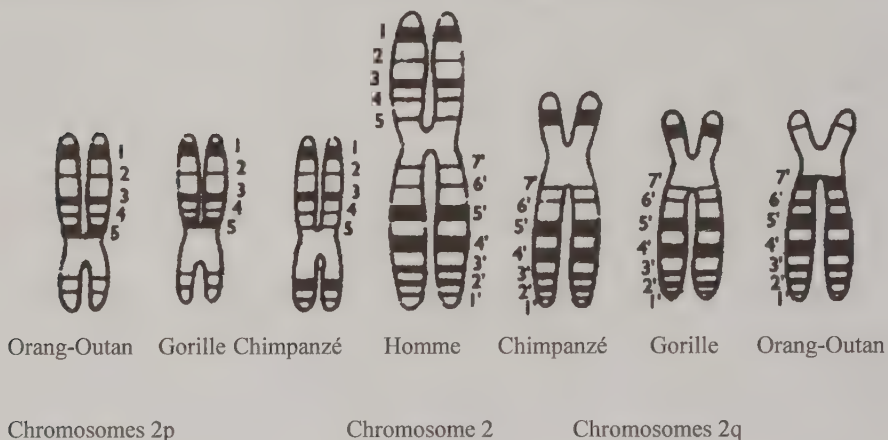
Document 2 : Comparaison des séquences de nucléotides (A, T, C, G) du brin non transcrit du gène codant pour une enzyme, la NAD-déshydrogénase, chez l'Homme et les singes anthropomorphes.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Homme	ATA	ACC	ATG	CAC	ACT	ACT	ATA	ACC	ACC	CTA	ACC	CTG	ACT
Chimpanzé	***	***	***	T*T	***	**C	***	***	***	T**	***	**A	***
Gorille	***	**T	***	T**	G**	**C	***	***	***	T**	G**	**A	***
Orang-Outan	*C*	G**	***	TTT	**T	**C	***	**T	G**	**C	***	T*A	***
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Homme	TCC	CTA	ATT	CCC	CCC	ATC	CTT	ACC	ACC	CTC	GTT	AAC	CCT
Chimpanzé	C**	T**	***	*T*	***	***	**C	***	***	***	A**	***	***
Gorille	***	T**	***	***	**T	***	***	***	***	T**	A*C	**T	***
Orang-Outan	*T*	***	**C	***	***	**T	ACC	G*T	***	***	A**	***	**C
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Homme	AAC	AAA	AAA	AAC	TCA	TAC	CCC	CAT	TAT	GTA	AAA	TCC	ATT
Chimpanzé	***	***	***	***	***	**T	***	***	***	**G	***	***	***
Gorille	***	***	***	*G*	***	***	***	***	**C	***	***	**T	**C
Orang-Outan	***	***	***	***	C**	***	***	**C	***	***	***	A*G	GCC
	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Homme	GTC	GCA	TCC	ACC	TTT	ATT	ATC	AGT	CTC	TTC	CCA	ACA	ACA
Chimpanzé	A**	**G	***	***	***	**C	**T	**C	**T	***	***	***	***
Gorille	***	***	*T*	***	***	**C	***	**C	***	***	***	***	***
Orang-Outan	A**	***	***	G**	***	*C*	***	**C	**T	A**	***	***	***
	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
Homme	ATA	TTC	ATG	TGC	CTA	GAC	CAA	GAA	GTT	ATT	ATC	TCG	AAC
Chimpanzé	***	***	**A	***	***	***	***	***	*C*	***	***	**A	***
Gorille	***	**T	C*A	***	***	***	***	***	*C*	***	***	**A	*G*
Orang-Outan	***	**T	**C	***	***	*GA	***	***	ACC	**C	G**	A*A	***
	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
Homme	TGA	CAC	TGA	GCC	ACA	ACC	CAA	ACA	ACC	CAG	CTC	TCC	CTA
Chimpanzé	**G	***	***	**A	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Gorille	***	***	***	**A	***	***	***	***	*TT	**A	***	***	***
Orang-Outan	***	TG*	***	A*A	**C	***	**G	***	CTA	**A	***	**A	***
	79												
Homme	AGC												
Chimpanzé	***												
Gorille	***												
Orang-Outan	***												

Chaque numéro correspond à un triplet de nucléotides donc à un acide aminé de la protéine enzymatique, chaque astérisque (*) indique une identité de nucléotide avec la séquence du gène de l'Homme.

Document 3 : Informations concernant quelques chromosomes de l'Homme et des singes anthropomorphes

3a : Disposition des bandes sombres et des bandes claires au niveau des chromosomes 2p, 2q et 2 de l'Homme et des singes anthropomorphes.



3b : Tableau des remaniements chromosomiques entre les chromosomes 2p, 2q et 2 de l'Homme et des singes anthropomorphes.

On précise que le Gorille et l'Orang-Outan ont, comme le Chimpanzé, un caryotype à 48 chromosomes, alors que le caryotype de l'Homme est à 46 chromosomes.

	Homme	Chimpanzé	Gorille	Orang-Outan
Homme	0			
Chimpanzé	1 fusion	0		
Gorille	1 fusion 1 inversion	1 inversion	0	
Orang-Outan	1 fusion 2 inversions	2 inversions	1 inversion	0

► Corrigé des exercices ▼

Corrigé 1

1. Vrai

2. Vrai

3. Faux. Un groupe monophylétique regroupe **un ancêtre et tous ses descendants évolutifs**.

4. Faux. Une phylogénie est une classification basée sur des **liens de parenté évolutive** entre des espèces différentes.

Corrigé 3

1. Un caractère dérivé est issu de la modification d'un caractère ancestral (ces deux caractères sont homologues). Il est spécifiquement trouvé au sein d'un groupe donné, hérité de l'ancêtre commun exclusif aux membres de ce groupe.

2. Utiliser un groupe extérieur en tant que témoin permet de bien mettre en évidence les caractéristiques dérivées propres au groupe étudié (ici Poulet, Lézard et Crocodile). Ce groupe extérieur ne possède aucun des caractères dérivés propres aux autres espèces présentées dans l'arbre.

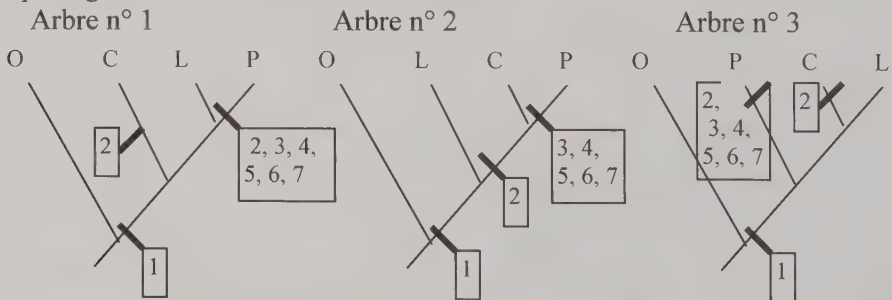
3. L'Otarie est la seule espèce à ne pas posséder le caractère dérivé « deux fosses temporales », alors que toutes les autres espèces le possèdent. C'est donc le premier caractère apparu après le dernier ancêtre commun à l'Otarie et aux autres espèces.

Les cinq derniers caractères dont il est fait mention dans l'énoncé (nombre de doigts d'appui, plumes, queue, dents, bréchet) ne sont présents à l'état dérivé que chez la Poule. Ces caractères dérivés ne sont donc apparus que dans la branche spécifique menant à cette espèce (mais on ne peut savoir dans quel ordre avec les informations dont nous disposons).

Le caractère Fenêtre mandibulaire n'est présent à l'état dérivé que chez le Crocodile et la Poule. On peut imaginer qu'il soit apparu sous cette forme dérivée chez un ancêtre commun à la Poule et au Crocodile (mais pas au Lézard), comme dans l'arbre n° 2. On peut aussi imaginer qu'il soit apparu indépendamment dans les deux branches menant pour l'une au Crocodile, pour l'autre à la Poule (arbres n° 1 et 3).

O = Otarie C = Crocodile L = Lézard P = Poule

Nous prendrons, pour éviter de trop surcharger les schémas : caractères : 1 = fosse temporale ; 2 = fenêtre mandibulaire ; 3 = nombre de doigts en appui ; 4 = plumes ; 5 = queue ; 6 = dents ; 7 = bréchet. Les traits indiquent le passage de ces caractères à l'état dérivé.

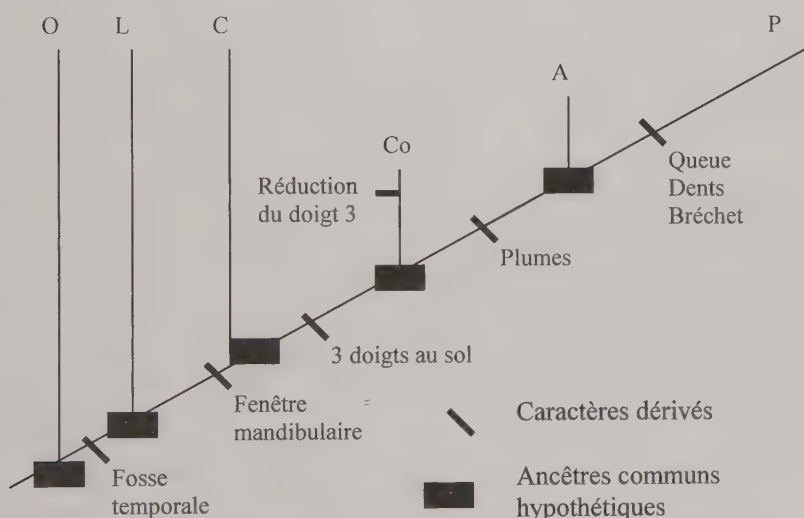


Si l'on applique le principe de parcimonie, l'arbre n° 2 est le plus probable, qui ne fait intervenir qu'une seule fois le passage du caractère 2 (fenêtre mandibulaire) de l'état ancestral à l'état dérivé.

4. Compsognathus a hérité d'un ancêtre commun avec la Poule d'avoir trois doigts en appui au sol. Il apparaît donc après l'acquisition de ce caractère dérivé. Il a par la suite acquis un autre caractère dérivé : la réduction du doigt n° 3. En revanche, il ne possède aucun autre des caractères dérivés de la Poule et est donc apparu avant leur passage à l'état dérivé.

Le même raisonnement est appliqué dans le cas des doigts, pour l'Archéoptéryx. Mais celui-ci possède un autre caractère dérivé en commun avec la Poule : la présence de plumes. Il est donc apparu après le passage de ce caractère à l'état dérivé. En revanche il n'a pas les autres caractères dérivés de la Poule et est donc apparu avant leur passage à l'état dérivé.

O = Otarie C = Crocodile L = Lézard P = Poule Co = Compsognathus
A = Archéoptéryx, ces deux dernières étant des espèces fossiles.



Arbre phylogénétique synthétisant les liens de parenté évolutive entre diverses espèces actuelles et fossiles

5. L'ancêtre commun à l'Archéoptéryx et la Poule présentait les caractères suivants : deux fosses temporales, fenêtre mandibulaire, trois doigts en appui au sol, plumes (caractères dérivés partagés par la Poule et Archéoptéryx), présence d'une longue queue, de dents, mais absence de bréchet (caractères qui ne sont dérivés que pour la Poule).

Un groupe monophylétique rassemble un ancêtre et tous ses descendants évolutifs.

6. L'étude de fossiles tels que l'Archéoptéryx apporte des informations sur l'ordre de passage de certains caractères à l'état dérivé. A l'issue de la question 3 nous ne pouvions déterminer dans quel ordre les caractères dérivés propres à la Poule étaient apparus. L'étude de l'Archéoptéryx nous

indique que l'apparition des plumes s'est opérée avant la disparition des dents et de la queue, et avant l'apparition du bréchet.

Corrigé 4

La comparaison qui nous est proposée peut être présentée sous forme d'un tableau :

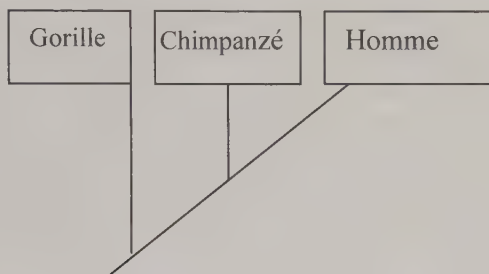
	Ressemblances	Différences																
Document 1 : Crânes et mâchoires	Les yeux sont en avant du crâne (existence d'une face)	Volume crânien plus élevé pour l'Homme, trou occipital plus en avant, mâchoire parabolique moins puissante que chez le Chimpanzé (qui a lui une mâchoire en U), pas d'écart entre canines et incisives chez l'Homme, pas de prognathisme, présence d'un front et d'un menton, pas de bourrelet sus-orbitaire chez l'Homme																
Document 2 : Comparaison des chromosomes 2 et 2p, 2q, d'une part, 4 d'autre part	Des bandes identiques sont retrouvées, avec des emplacements identiques	46 chromosomes chez l'Homme contre 48 chez le Chimpanzé Le chromosome 2 humain correspond aux chromosomes 2p et 2q du Chimpanzé Pour le chromosome n°4, on constate qu'une zone autour du centromère distingue l'Homme du Chimpanzé Les portions autour de ce centromères se correspondent si l'on effectue une inversion																
Document 3 : Comparaison de séquences nucléotidiques et de séquences d'acides aminés, homologues chez l'Homme, le Chimpanzé et le Gorille	Il existe de nombreux nucléotides identiques, ayant la même position dans le gène. Cette remarque peut être étendue à de nombreux acides aminés	Des différences apparaissent, présentées dans le tableau suivant (en italiques : nucléotides différents, entre parenthèses, acides aminés différents) <table><tr><td></td><td>Homme</td><td>Chimpanzé</td><td>Gorille</td></tr><tr><td>Homme</td><td>0</td><td></td><td></td></tr><tr><td>Chimpanzé</td><td>7 (3)</td><td>0</td><td></td></tr><tr><td>Gorille</td><td>8 (3)</td><td>7 (4)</td><td>0</td></tr></table>		Homme	Chimpanzé	Gorille	Homme	0			Chimpanzé	7 (3)	0		Gorille	8 (3)	7 (4)	0
	Homme	Chimpanzé	Gorille															
Homme	0																	
Chimpanzé	7 (3)	0																
Gorille	8 (3)	7 (4)	0															

Les ressemblances témoignent d'une origine commune à l'Homme et aux singes anthropomorphes.

Les différences tiennent aux caractères dérivés qui sont apparus dans la lignée humaine au cours de son évolution.

Le passage de 48 à 46 chromosomes s'expliquerait par la fusion des chromosomes 2p et 2q en chromosomes 2 chez un ancêtre de l'Homme.

De plus, le document 3 nous indique que le Chimpanzé est plus proche de l'Homme que ne l'est le Gorille. Un arbre extrêmement simplifié pourrait donc être :



Corrigé 5

Tirons des documents proposés des informations concernant les principales caractéristiques de l'évolution de la lignée humaine.

Le document 1 nous permet de dire que les australopithèques, il y a 3,6 ou 3,8 millions d'années, étaient bipèdes, comme l'attestent les traces de pas découvertes à Laetoli. A ce titre, ils font partie de la lignée humaine (ce sont des hominins).

Le document 2 nous montre que certains représentants de la lignée humaine utilisent des outils, ceux-ci étant de plus en plus perfectionnés au fur et à mesure que le temps passe : galets aménagés chez *Homo habilis*, bifaces chez *H. erectus*, pointes de flèches chez *H. sapiens*.

Le document 3 présente quelques tendances évolutives concernant le crâne des représentants de la lignée humaine, des Australopithèques jusqu'à l'Homme actuel :

- Augmentation du volume crânien, pratiquement multiplié par 3 depuis les Australopithèques
- Réduction de la face, apparition du front, disparition des bourrelets sus-orbitaires.

Les grandes caractéristiques de l'évolution de la lignée humaine sont donc l'apparition de la bipédie, l'augmentation du volume cérébral, la modification de la forme du crâne et le développement de l'outillage. Toutes ces modifications ne se sont pas produites de manière toujours graduelle et pas forcément parallèle.

Il existe encore d'autres caractéristiques, que les documents ne permettent pas d'aborder : maîtrise du feu, développement du langage articulé, migrations, pour *Homo erectus*. Pour *Homo sapiens*, nous pouvons citer le développement de l'art, les rites funéraires, l'agriculture et l'élevage.

.....■ CORRIGE DU CONTROLE ■.....

Exercice 1

Sujet ne comportant pas de grande difficulté, mais qui suppose une bonne maîtrise du cours. Comme c'est fréquemment le cas, le plan est suggéré dans l'énoncé. L'identification des différentes étapes évolutives peut être incluse dans la partie exposé des caractéristiques de la lignée humaine, ou faire l'objet d'un paragraphe indépendant. La présentation d'un arbre phylogénétique simplifié peut alors s'avérer intéressante. La présentation des différences entre Homme et autres hominidés peut se faire grâce à un tableau comparatif.

Proposition de plan :

Appartenant aux Primates (cerveau important par rapport à la taille du corps, pouce opposable, yeux en avant de la face), aux Hominoïdes (primates sans queue), les Hominidés (Homme, Gorille, Chimpanzé) partagent divers caractères ancestraux hérités d'ancêtres communs relativement récents (de l'ordre de 10 Ma). L'Homme est cependant un Homininé, et il présente des caractères dérivés qui sont propres à sa lignée. Quelles différences majeures existe-t-il entre l'Homme et les autres Hominidés, quelles sont les caractéristiques de la lignée humaine et chez quelles espèces (et quand) ces caractéristiques sont-elles apparues ?

I) Comparaison anatomique et chromosomique

* Caractères liés au mode de locomotion (les Homininés sont bipèdes) :

Colonne vertébrale, bassin, fémur, trou occipital, pouce non opposable aux pieds pour l'Homme,...

* Caractères du crâne :

Prognathisme ou non (angle facial plus aigu chez les Gorilles et Chimpanzés), capacité crânienne, mâchoire et dents, bourrelets sus-orbitaires, menton, front,...

* Caractères Chromosomiques : 13 chromosomes identiques entre Homme et Chimpanzé, les différences tiennent au nombre (46 et 48), à des fusions (chromosome 2 humain), des inversions,...

II) Les critères d'appartenance à la lignée humaine

Les spécificités citées ci-avant (bipédie, réduction de la face, 46 chromosomes,...), mais également le développement d'une culture, des arts, d'un langage articulé, de rites funéraires, la conception, la réalisation et l'utilisation d'outils variés,...

III) Les étapes clés de l'évolution de la lignée humaine

Peut-être fait sous forme d'un arbre : bipédie acquise chez *Orrorin* (– 6Ma), réduction de la face s'amorçant chez les *Australopithèques* (–4,5 à – 1 Ma), augmentation du volume crânien initiée chez *H. habilis* (–2,5 à – 1,5 Ma),

avec la réalisation et l'utilisation d'outils rudimentaires (galets aménagés), langage articulé chez *H. erectus* (– 1,5 à 0,3 Ma environ), ainsi que maîtrise du feu et migrations. L'Homme moderne proviendrait des *H. erectus* d'Afrique ou du Proche-Orient. Avec *H. sapiens* (apparaît il y a 100 000 ans environ), on voit le développement de l'art, des rites funéraires,...

L'évolution humaine s'est principalement effectuée en Afrique de l'Est (peut-être sous l'influence de modifications climatiques liées au fonctionnement du rift est-africain) et cette évolution fut très buissonnante, de nombreux Homininés cohabitèrent en Afrique de l'Est pendant des temps plus ou moins longs. Les caractéristiques de la lignée humaine n'ont pas été acquises d'emblée, elles sont apparues de manières progressive (ce qui ne signifie pas graduelle et régulière). On peut alors s'interroger sur les mécanismes évolutifs mis en œuvre au cours de cette évolution.

Exercice 2

– Pourquoi Poissons et reptiles ne constituent pas des groupes monophylétiques ?

L'énoncé nous indique qu'un tel groupe rassemble un ancêtre et tous ses descendants. Pour les Poissons, ce n'est pas le cas, les Poissons ont plusieurs ancêtres. Dans le cas des Reptiles, il n'y a bien qu'un ancêtre, mais il manque alors des descendants : les Oiseaux.

– Le Dipneuste est-il plus étroitement apparenté à la Carpe qu'à la Chauve-souris ? Si l'on s'en tient aux apparences et à la classification traditionnelle, la réponse est oui (Dipneuste et Carpe sont des Poissons). Mais si l'on tient compte de la phylogénie (liens de parenté évolutive entre espèces) les choses sont différentes. En effet, le Dipneuste partage avec la Chauve-souris un ancêtre commun exclusif (que ne partage pas la Carpe). Cet ancêtre est le premier vertébré à poumons.

– Portrait-robot de l'ancêtre commun au Crocodile, à la Dinde et à la Chauve-souris : vertébré ayant des poumons, des membres pourvus de doigts. C'est, de plus un amniote. Il ne possède pas encore les caractères dérivés spécifiques de ces espèces : poils, mamelles, gésier, plumes.

Exercice 3

Définissons, dans un premier temps, à partir du document fourni, les caractéristiques de l'Homme (homininé) comparativement au Chimpanzé (non homininé). Ces caractères dérivés étant définis, nous chercherons alors si l'espèce A les présente (au moins un).

L'Homme se distingue du Chimpanzé par :

– sa bipédie, associée à la position avancée du trou occipital, à l'inclinaison du fémur et à la largeur du bassin ;

– la réduction de la face, l’absence de bourrelet sus-orbitaire, la présence d’un menton, son fort volume crânien, la forme de sa mâchoire.

Chez l’espèce A, nous pouvons noter :

- la présence d’une mâchoire parabolique
- un bassin assez court et large, un fémur légèrement incliné vers l’intérieur, un trou occipital moins en arrière du crâne que chez le Chimpanzé. Même si ces caractères ne sont pas aussi marqués que chez l’Homme, ils attestent de la bipédie de l’espèce A. Il s’agit donc bien d’une espèce d’Homininé.

Place de cette espèce A dans la lignée humaine : divers caractères restent proches des caractères ancestraux : mâchoire encore puissante, faible capacité crânienne, prognathisme encore marqué, bourrelet sus-orbitaire encore présent. Cette espèce est donc bipède, mais elle représente un stade précoce de la lignée humaine.

Il s’agit, bien sûr, d’un Australopithèque, mais cette connaissance n’est pas exigible.

Exercice 4

Etudions les documents mis à notre disposition :

Document 1 : ce document nous présente trois hypothèses différentes concernant les liens de parenté évolutive des quatre primates :

Dans l’hypothèse A, le Chimpanzé et le Gorille sont plus proches de l’Orang-Outan que de l’Homme.

Dans les hypothèses B et C, le Chimpanzé et le Gorille sont plus proches de l’Homme que de l’Orang-Outan. De plus :

Dans l’hypothèse B le Chimpanzé est plus proche de l’Homme que du Gorille.

Dans l’hypothèse C le Chimpanzé est plus proche du Gorille que de l’Homme.

Document 2 : Il nous est demandé de comparer des séquences d’ADN homologues appartenant aux quatre espèces étudiées.

On y trouve des ressemblances, qui traduisent une origine commune à ces espèces. Des différences existent également, qui résultent de mutations plus ou moins nombreuses qui se sont accumulées depuis l’individualisation des diverses branches. Si l’on admet que ces mutations se font à rythme constant, alors le nombre de différences accumulées est d’autant plus grand que la séparation entre les lignées considérées est ancienne.

Récapitulons les différences concernant la succession de nucléotides du gène proposé, au sein d’un tableau :

	Homme	Chimpanzé	Gorille	Orang-Outan
Homme	0			
Chimpanzé	23	0		
Gorille	30	29	0	
Orang-Outan	57	53	58	0

Nous pouvons constater :

Que le Chimpanzé et le Gorille sont plus proches de l'Homme que de l'Orang-Outan.

Que le Chimpanzé est plus proche de l'Homme que du Gorille.

Document 3 : il nous est proposé de comparer des chromosomes chez les quatre espèces étudiées.

3a : Les chromosomes étudiés présentent manifestement des bandes en commun, mais également quelques différences :

Les bandes 1 à 5 de l'Homme ont plus de ressemblances avec les bandes 1 à 5 du Chimpanzé que des autres espèces (très net pour la bande 5).

Les bandes 1' à 7' de l'Homme ressemblent davantage aux bandes 1' à 7' du Chimpanzé et du Gorille qu'à celles de l'Orang-Outan.

De plus, ces bandes chez le Chimpanzé, ressemblent plus à celles du Gorille qu'à celles de l'Orang-Outan.

Le document 3b confirme ces données : l'Homme est, sur le plan des chromosomes étudiés, plus proche du Chimpanzé (1 modification) que du Gorille (2 modifications) et que de l'Orang-Outan (3 modifications).

Le Chimpanzé est plus proche du Gorille (1 modification) que de l'Orang-Outan (2 modifications).

En résumé, ces divers documents convergent tous vers des conclusions semblables :

Le plus proche parent évolutif (= groupe-frère) de l'Homme est le Chimpanzé, le plus proche parent du groupe (Homme-Chimpanzé) étant le Gorille.

L'Orang-Outan a donc un ancêtre commun avec les trois autres espèces, mais la branche menant à cette espèce s'est séparée des autres le plus précocement. Les branches qui se sont séparées le plus tardivement sont celles du Chimpanzé et de l'Homme.

C'est donc finalement l'hypothèse B du document qui donne la bonne représentation des liens phylogénétiques existant entre ces quatre espèces.

Procréation

La fonction de reproduction est une fonction fondamentale, non pour l'individu lui-même, mais pour l'espèce, de manière à assurer sa perpétuation. Ce chapitre va nous permettre de connaître la structure des appareils reproducteurs, ainsi que leur mise en place lors du développement. Nous nous intéresserons par la suite au fonctionnement de ces appareils et, principalement, à la régulation de leur activité.

DU SEXE GENETIQUE AU SEXE PHENOTYPIQUE

► Les appareils reproducteurs

Il existe deux grands modes de reproduction :

* La reproduction conforme, abordée en Première, grâce à laquelle, un individu peut donner naissance à deux individus identiques.

* La reproduction sexuée, ou biparentale, au cours de laquelle deux individus différents vont assurer la formation d'un troisième individu, différent lui-même de ses géniteurs. Pour cette reproduction biparentale, il faut produire des gamètes (spermatozoïdes et ovules chez les animaux). Cette production de gamètes s'effectue dans des organes spécialisés : les gonades (testicules et ovaires). Ces gonades sont associés à d'autres organes, l'ensemble constituant un appareil génital.

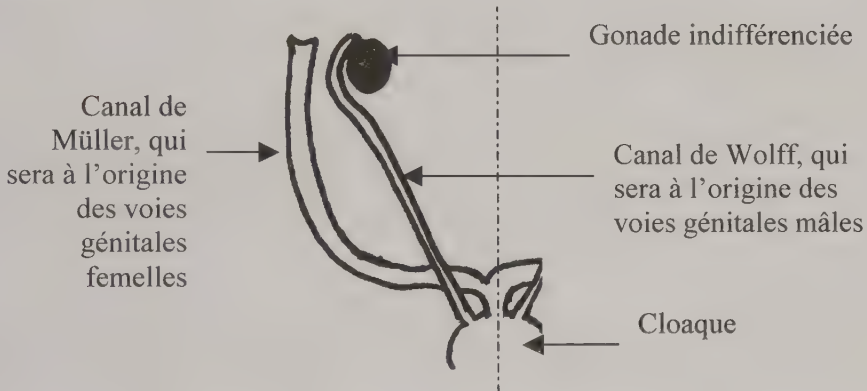
En dépit d'apparentes différences, les appareils génitaux des deux sexes ont une structure voisine. Des éléments similaires y sont retrouvés.

	Femelle	Mâle
Gonades	Ovaire	Testicule
Voies génitales, assurant la maturation et la rencontre des gamètes, ainsi que le développement	Oviductes, utérus	Epididyme, spermiducte
Appareil permettant la copulation	Vagin	Pénis, avec corps érectiles
Glandes associées	Cellules sécrétrices de la paroi de l'utérus et du vagin, glandes de Bartholin	Vésicules séminales, prostate

► La différenciation des appareils reproducteurs

On constate, lorsqu'on analyse le développement de ces appareils génitaux, qu'à l'origine mâles et femelles possèdent tous deux un même appareil indifférencié. Qu'il puisse subsister des ressemblances chez l'adulte n'est, dès lors, pas un fait étonnant.

La structure (schématique) de cet appareil indifférencié embryonnaire est la suivante :



Gonades et voies génitales fœtaux au stade indifférencié. L'ensemble présente une symétrie bilatérale (axe vertical), seul le côté droit (vu de face) a été représenté.

Comment, à partir de cet appareil indifférencié, se détermine le développement d'un appareil génital mâle ou femelle différencié et fonctionnel ?

Le sexe de l'embryon est déterminé par la combinaison de gonosomes qu'il possède. Dans le cas des mammifères si l'embryon possède deux chromosomes X, il est de sexe femelle ; si au contraire il possède un X et un Y, il est de sexe mâle. Dans le cas de l'embryon, il s'agit donc d'un sexe génétique (chromosomique) et non encore d'un sexe phénotypique.

La première différenciation à intervenir est la différenciation des gonades, à partir de la gonade indifférenciée (mais génétiquement déterminée, ses cellules contiennent XX ou XY). Si l'embryon possède l'assortiment chromosomique XY, il possède alors, à l'extrémité du chromosome Y, un gène SRY, qui n'est pas présent sur X. Ce gène est un gène architecte (cf. cours de Seconde), c'est-à-dire qu'il permet la production de protéines (protéine TDF = Facteur de Différenciation Testiculaire), qui vont agir sur d'autres gènes de manière à orienter le développement. En l'occurrence, lorsque le gène SRY est présent, les gonades indifférenciées se différencient en testicules. Dans le cas contraire (gonosomes XX), ce sont des ovaires qui se différencieront. Suite à ces phénomènes, c'est un sexe gonadique qui est alors mis en place.

La différenciation des voies génitales peut alors se dérouler.

Premier cas : en absence de chromosome Y, ce sont des ovaires qui se sont différenciés.

Il y a alors régression spontanée des canaux de Wolff, tandis que, de manière tout aussi spontanée, les canaux de Müller se développent et forment oviductes et utérus. L'appareil génital différencié est donc de type femelle. Cette féminisation de l'appareil initialement indifférencié se fait par défaut.

Second cas : en présence d'un chromosome Y et donc d'un gène SRY, ce sont des testicules qui se différencient.

Ils sécrètent alors deux hormones : la testostérone et l'AMH (Hormone Anti Müllérienne). La testostérone entraîne un développement des canaux de Wolff, qui deviennent épидидymes et spermiductes. L'AMH, comme son nom l'indique, entraîne une régression des canaux de Müller. L'appareil génital différencié est donc de type mâle. Il y a eu masculinisation de l'appareil génital indifférencié.

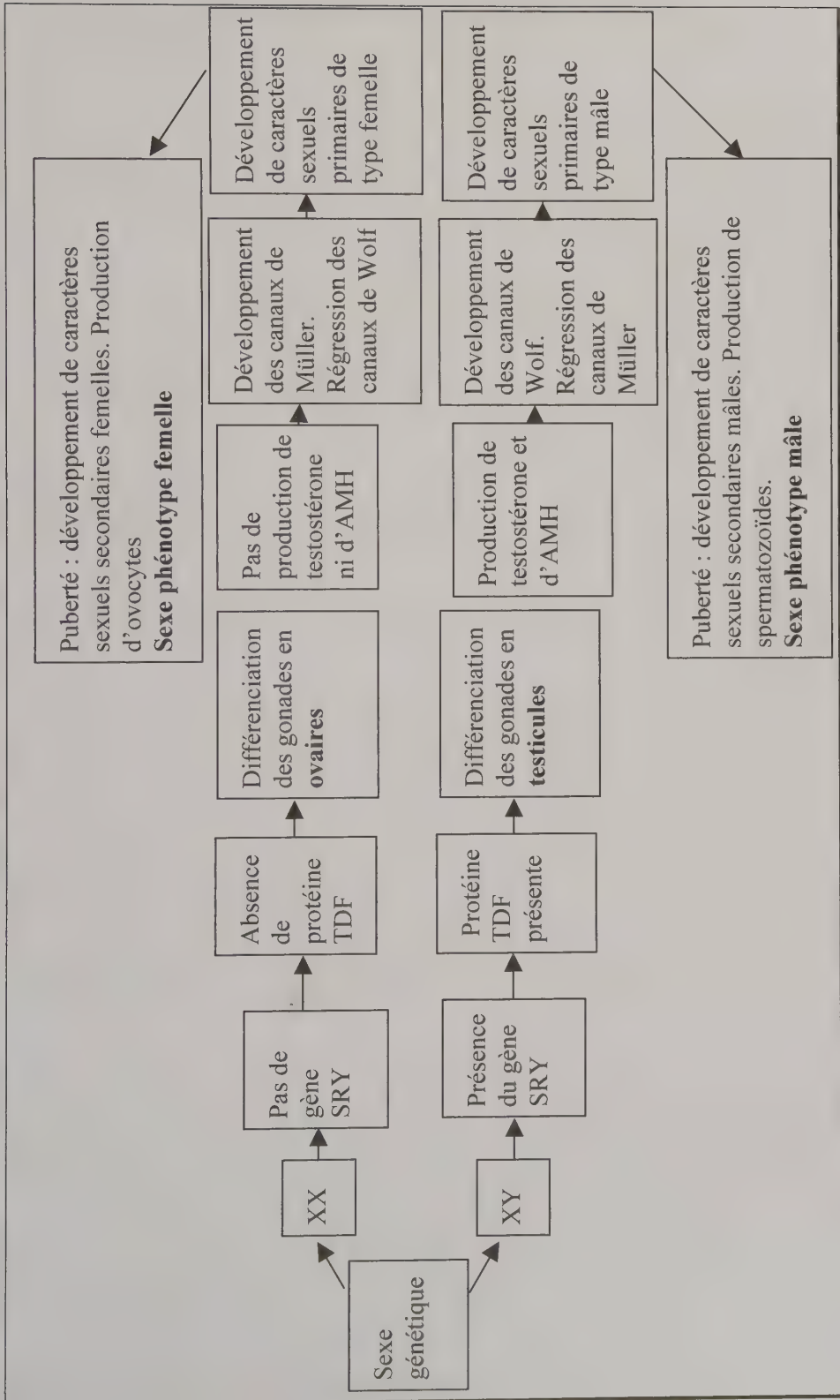
L'ensemble de ces phénomènes a permis la mise en place des caractères sexuels primaires. Cependant, le développement du sexe phénotypique n'est pas achevée.

Il se termine à la puberté, lors de la mise en activité des gonades et le début de la production des gamètes. Sous l'influence d'hormones sexuelles (testostérone pour le mâle, oestradiol pour la femelle) vont se développer les caractères sexuels secondaires (pilosité, développement et répartition de la musculature, de la graisse, mue de la voix, développement des seins...). Un individu mâle peut alors, en règle générale, être aisément distingué d'un individu femelle.

Le sexe phénotypique est mis en place. Les hormones sexuelles ovariennes, qui ne sont pas intervenues dans la mise en place des caractères sexuels primaires, sont ici indispensables pour la fonctionnalité de l'appareil génital femelle.

Enfin, il est à noter que les hormones sexuelles mâles et femelles participent également de manière prédominante à la détermination du comportement et, tout particulièrement du comportement reproducteur (rut, chaleurs, recherche du partenaire sexuel, parades nuptiales, acceptation du mâle,...).

L'ensemble de ces phénomènes est résumé dans le schéma de la page suivante.



LA REGULATION PHYSIOLOGIQUE DE L'AXE GONADOTROPE

Comme toutes les fonctions physiologiques, la fonction de reproduction est soumise à une régulation qui a pour but d'optimiser et d'harmoniser cette fonction selon les conditions auxquelles l'individu est soumis. Dans le cas de la fonction de reproduction, l'essentiel de cette régulation passe par un contrôle hormonal, qui constitue une boucle de régulation plus ou moins complexe selon le sexe.

Rappelons qu'une hormone est un messenger chimique émis par des cellules spécialisées, qu'elle agit à distance, par voie sanguine et à faible concentration sur des cellules-cibles spécifiques. Une cellule est cible d'une hormone lorsqu'elle possède des récepteurs protéiques sur lesquels l'hormone peut venir se fixer, selon une complémentarité tridimensionnelle précise (système clé-serrure).

Rappelons aussi qu'une boucle de régulation fait habituellement intervenir une variable contrôlée, une fonction réglée (ici la fonction de reproduction), un système réglant, et différents (comprenant capteurs, centres intégrateurs, messagers et effecteurs).

Dans le cas de la fonction de reproduction, la régulation hormonale est assurée par un système à trois niveaux : l'axe gonadotrope (qui agit sur les gonades).

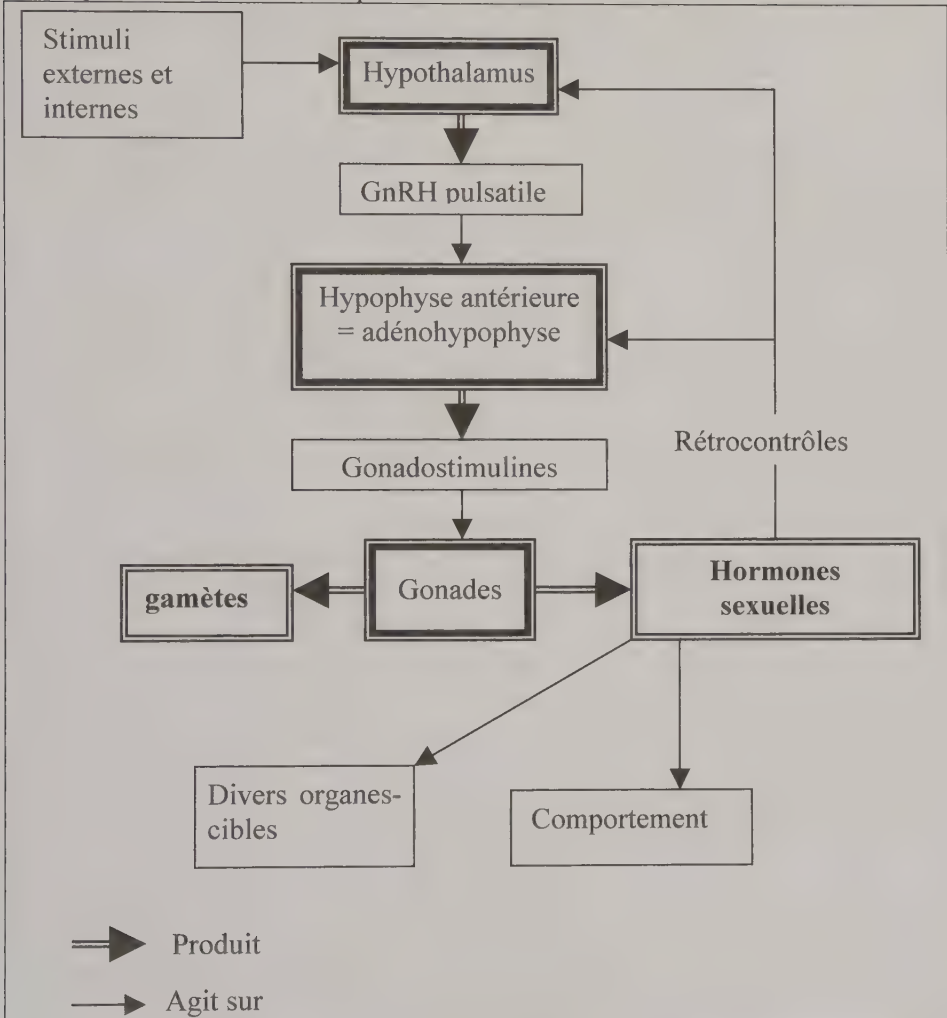
Premier niveau de contrôle l'Hypothalamus, structure nerveuse se trouvant sous le troisième ventricule cérébral. Il s'agit d'un important centre intégrateur, assurant la coordination des fonctions végétatives et comportementales (faim, soif, libido,...). Certains neurones hypothalamiques (neurones du noyau arqué) sécrètent de manière pulsatile une neurohormone (GnRH = gonadolibérine, sécrétée comme un neurotransmetteur, à l'extrémité d'axones, en réponses à des salves de potentiels d'action, mais agissant comme une hormone, par voie sanguine).

Cette gonadolibérine va alors agir sur une petite glande endocrine située sous l'hypothalamus : l'hypophyse (et plus précisément l'hypophyse antérieure). Celle-ci sécrète alors (de manière également pulsatile) des gonadostimulines.

Il s'agit là du deuxième niveau de contrôle.

Les gonadostimulines hypophysaires vont alors contrôler l'activité des gonades. Celles-ci vont produire des gamètes et des hormones sexuelles. C'est là qu'un troisième niveau de contrôle intervient : ces hormones sexuelles agissent sur des cibles appartenant à l'appareil génital, mais exercent également une rétroaction (= rétrocontrôle ou feed-back), c'est-à-dire une action en retour sur les organes qui contrôlent leur sécrétion. En d'autres termes, les hormones sexuelles ont une action (positive = excitatrice, ou négative = inhibitrice, selon les cas) sur le complexe hypothalamo-hypophysaire.

Ce triple niveau de contrôle peut se schématiser comme suit :



Représentation schématique de l'axe gonadotrope, montrant les trois niveaux de contrôle (hypothalamus, hypophyse et gonades). Schéma valable pour les deux sexes.

► Testostérone et régulation de la fonction génitale mâle

A partir de la puberté, la production de gamètes mâles (= spermatozoïdes) est assurée de manière régulière et continue par les testicules. A la puberté, on note une modification de la paroi des tubes séminifères, cette paroi s'épaississant et les cellules de la lignée germinale (cellules à l'origine des gamètes) se multipliant de manière importante et soutenue.

A la puberté, il se produit également une reprise de la sécrétion de testostérone (qui avait déjà été sécrétée par le testicule fœtal au cours du développement intra-utérin, et dont la sécrétion avait ensuite cessé). En revanche, il n'y a pas de reprise de sécrétion d'AMH.

La testostérone est sécrétée par les cellules interstitielles des testicules.

Ceux-ci ont donc une double fonction :

- * exocrine par la production de spermatozoïdes, acheminés à l'extérieur par les voies génitales (et y subissant une maturation)
- * endocrine, par la sécrétion de testostérone dans le milieu intérieur.

Le taux de testostérone (= testostéronémie) peut, globalement, être considéré comme constant (elle varie dans un intervalle de faible amplitude). La constance de ce taux résulte d'un équilibre entre production et dégradation de l'hormone mâle.

Le maintien de ce taux à une valeur stable, ainsi que la stabilité de la production des spermatozoïdes résulte d'une régulation, qui s'opère selon le même mode que la régulation de la glycémie (cf. programme de Première).

La testostérone exerce un rétrocontrôle négatif sur le complexe hypothalamo-hypophysaire qui, lui même stimule la production de testostérone (notamment par l'intermédiaire d'une gonadostimuline, la LH = Hormone Lutéinisante).

Outre le rétrocontrôle négatif qu'elle exerce sur le complexe hypothalamo-hypophysaire, la testostérone stimule le développement et le maintien des caractères sexuels secondaires, elle stimule, au niveau testiculaire, la production des spermatozoïdes (en se liant à des récepteurs localisés au niveau des cellules de Sertoli de la paroi des tubes séminifères). Elle participe également à l'expression du comportement de type mâle.

Si l'on considère que nous avons bien affaire à une boucle de régulation, les différents constituants caractéristiques sont :

- * Une variable contrôlée, la testostéronémie, maintenue à un point de consigne (taux sensiblement constant).

- * Une fonction contrôlée, la fonction de reproduction, avec formation de gamètes, comportement reproducteur,...

- * Un système réglant, comportant le complexe hypothalamo-hypophysaire et les cellules interstitielles du testicule. La communication entre ces organes est assurée par des hormones, principalement GnRH, LH et testostérone.

La neurosécrétion de GnRH peut être modulée en permanence, en fonction des informations reçues de l'extérieur comme de l'intérieur de l'organisme. Les neurones hypothalamiques intègrent ces diverses informations (nous retrouvons le pouvoir intégrateur du neurone abordé en Première) et, en fonction de ces informations, il y a modulation de la sécrétion pulsatile de GnRH. La période des pulses est habituellement de l'ordre de 60 à 90 minutes, la testostérone exerce un effet négatif sur cette neurosécrétion pulsatile.

Nous pouvons résumer l'ensemble par un schéma (les proportions ne sont pas respectées) :

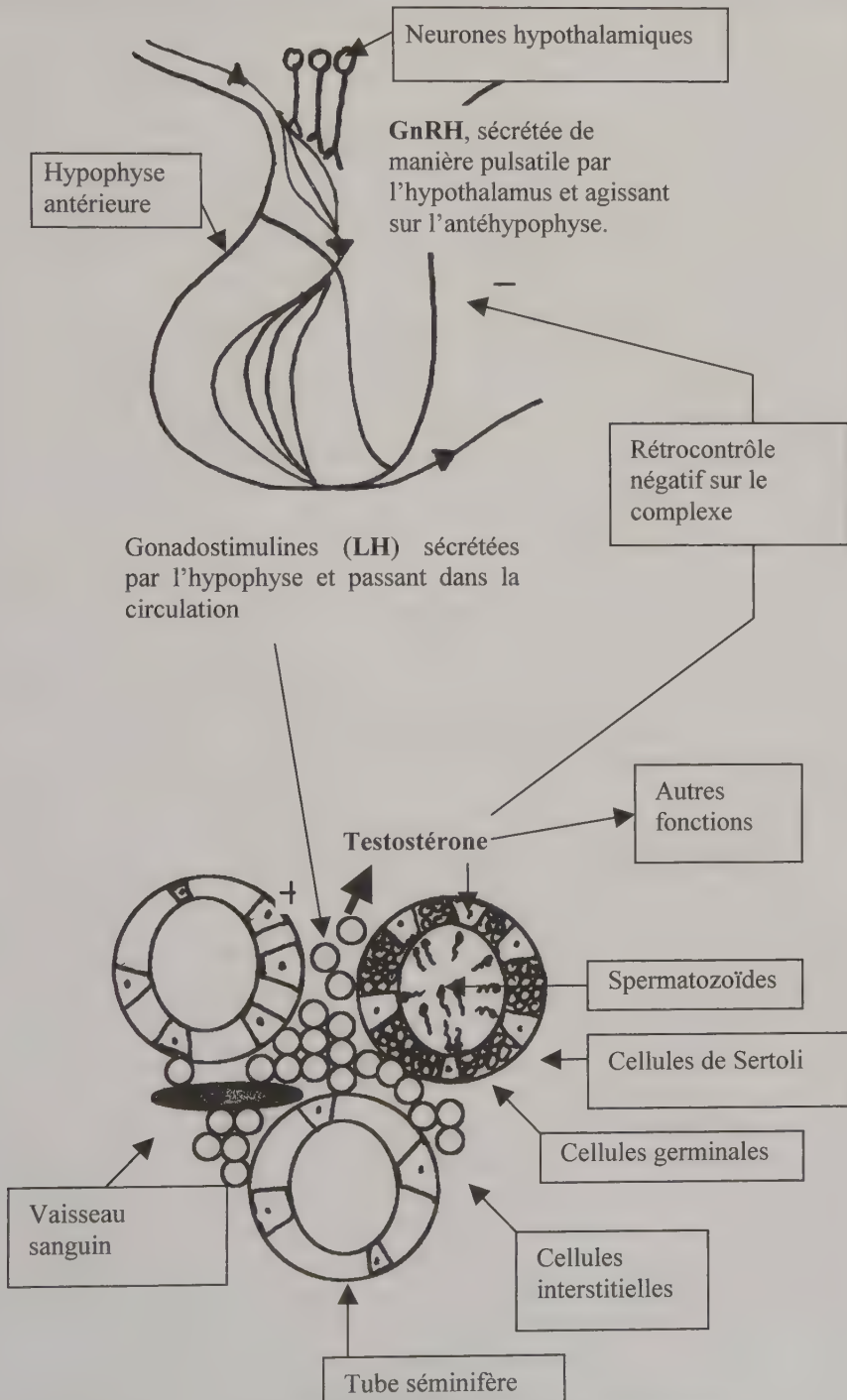


Schéma récapitulatif de la régulation de la fonction mâle

► Hormones ovariennes et régulation de la fonction génitale femelle

La fonction reproductrice femelle, en particulier dans le cas de l'espèce humaine, diffère de la fonction reproductrice mâle en plusieurs points :

	Sexe féminin	Sexe masculin
Production de gamètes	Cyclique Peu abondante (1 gamète par cycle de 28 jours ; environ 400 à 450 au cours d'une vie)	Continue et régulière Extrêmement abondante : des centaines de millions par jour
Période de fertilité	De la puberté à la ménopause (aux environs de 45/50 ans).	De la puberté à la mort (en théorie, mais en fait il existe une andropause, liée à l'âge)
Période de fécondité	Les 24 heures qui suivent l'ovulation (l'ovule non fécondé après ce délai dégénère)	Correspond à la période de fertilité
Gamète	Ovule, immobile, de grande taille (contient les réserves nutritives du futur embryon). Emis par l'ovaire, recueilli par le pavillon des trompes puis migre vers l'utérus (grâce à des cellules ciliées de la paroi des trompes). Haploïde	Spermatozoïde, mobile, de petite taille (ne contient pas de réserves, mais uniquement un noyau haploïde). Nage à la rencontre de l'ovule Durée de vie de 3 à 5 jours dans les voies génitales féminines
Divers	Existence de menstruations	

L'axe gonadotrope étant impliqué dans la régulation de l'activité génitale féminine (tout comme chez l'homme), il nous faut comprendre quel est l'élément qui engendre une activité aussi différente.

A y regarder plus en détail, on constate qu'il existe chez la femme, non pas un, mais plusieurs cycles :

* **Le cycle ovarien** : il correspond à la production cyclique d'un ovule tous les 28 jours. Cet ovule est produit par l'ovaire (les ovaires fonctionnent en alternance) et, au sein de l'ovaire, les cellules germinales (futurs ovules), sont associées à des cellules folliculaires. L'ensemble cellule germinale + cellules folliculaires est un follicule. Ces follicules subissent une maturation au sein de l'ovaire, qui conduit à la formation d'un follicule mûr qui libérera l'ovule qu'il contient. La maturation folliculaire passe par plusieurs étapes caractéristiques et dure 4 à 5 mois au total (elle s'étale donc sur plusieurs cycles, autrement dit, un follicule parvenu à maturité n'a pas débuté sa maturation au début du même cycle, mais quelques cycles auparavant).

Le premier stade de la maturation folliculaire est le follicule primordial. Il s'agit d'une cellule germinale (un ovocyte immature) associée à quelques

cellules folliculaires. L'ensemble a un diamètre voisin de 35 μm dans l'espèce humaine. Les follicules primordiaux sont les plus abondants dans l'ovaire puisqu'ils représentent une réserve, non renouvelée, de cellules germinales immatures. Ils sont présents avant même la naissance : trois mois avant la naissance, un fœtus humain féminin possède déjà environ 6 millions de follicules primordiaux. La plupart des follicules vont dégénérer (phénomène d'atrésie folliculaire). A la naissance, ce nombre a déjà été divisé par dix. L'atrésie se poursuivant et le renouvellement n'existant pas (le stock est fait avant la naissance), on conçoit facilement qu'un jour, il n'y aura plus de follicules dans les ovaires. Cette période correspond à la ménopause.

Le deuxième stade de la maturation folliculaire est le follicule primaire. Les cellules folliculaires se sont multipliées et forment un couronne autour de l'ovocyte. L'ensemble mesure 80 à 100 μm .

La suite de la maturation folliculaire correspond à une multiplication des cellules folliculaires et à l'acquisition de structures spécifiques.

Le stade suivant est le follicule secondaire = follicule plein. Les cellules folliculaires forment à présent un massif compact (= granulosa) autour de l'ovocyte immature. Des thèques (externe fibreuse, interne glandulaire) sont apparues à la périphérie du follicule. L'ensemble a un diamètre voisin de 150 à 200 μm dans l'espèce humaine.

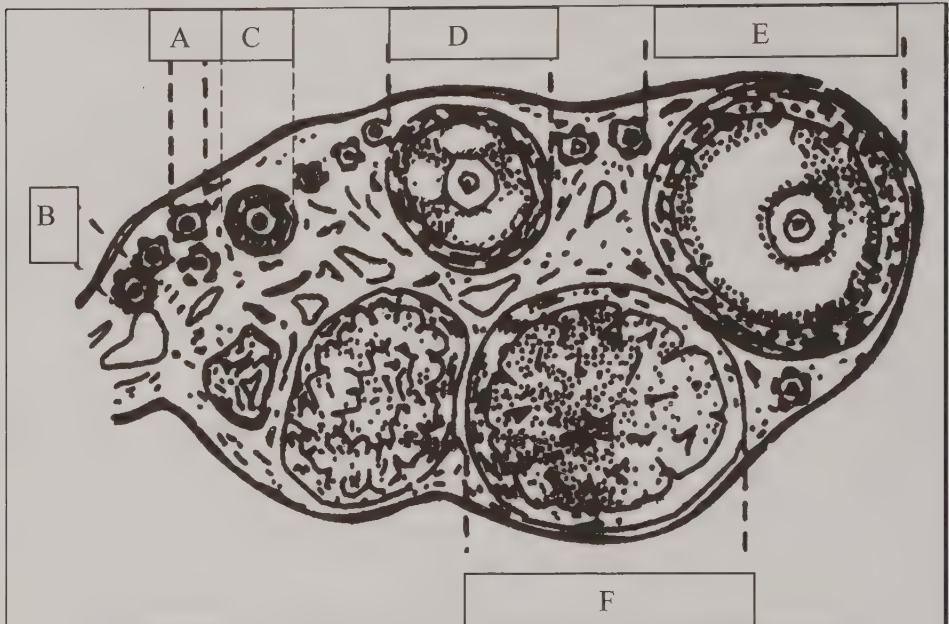
Le stade ultérieur est le follicule tertiaire, ou cavitaire. Des cavités, contenant un liquide folliculaire, se sont creusées dans la granulosa. Ces cavités finissent par se réunir pour ne plus en former qu'une seule. La taille est comprise entre 200 μm et quelques mm. Le follicule est déjà parvenu à ce stade au début du cycle qui permettra une ovulation par ce follicule.

Enfin, le stade final de la maturation folliculaire est le stade follicule mûr (= de de Graaf). La cavité folliculaire s'est agrandie et occupe une place importante dans le follicule. Quelques heures avant l'ovulation, l'ovocyte sera libéré dans le liquide folliculaire et il reprendra sa maturation (sans toutefois l'achever). Ce follicule mûr est une structure de grande taille : de 15 à 25 mm. Ce follicule va libérer l'ovocyte qu'il contient le jour de l'ovulation. Cet ovule va être capté par le pavillon d'une trompe utérine.

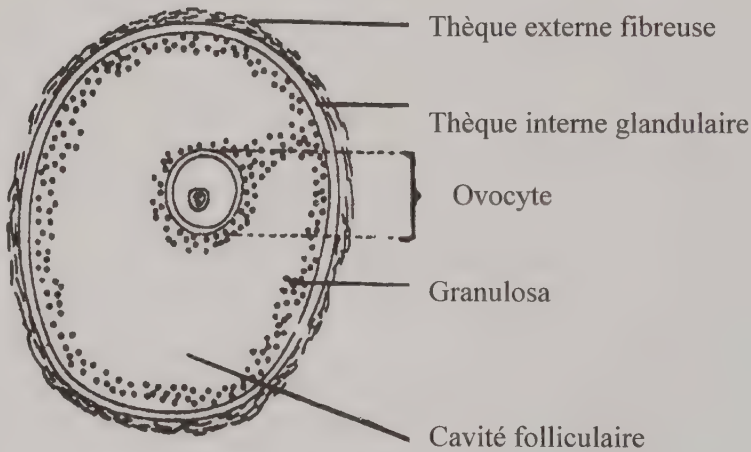
Ce qui reste du follicule après ovulation va alors se transformer en corps jaune, qui se développe dans un premier temps, puis, s'il n'y a pas fécondation, régresse et finit par disparaître.

De manière périodique, à partir de la puberté, quelques follicules entament leur maturation. Seul un d'entre eux (sauf exceptions) parviendra à maturité : le follicule dominant.

Chaque cycle est donc marqué par un événement (l'ovulation) séparant deux périodes distinctes : la période préovulatoire est dominée par la maturation folliculaire (phase folliculaire), et la phase post-ovulatoire est dominée par la présence d'un corps jaune (phase lutéinique).



Les différentes étapes du cycle ovarien : A : follicule primordial ; B : follicule primaire ; C : follicule secondaire jeune ; D : follicule tertiaire ; E : follicule mûr ; F : corps jaune.



Représentation schématique d'un follicule mûr (de de Graaf)

* **Le cycle utérin** : ce cycle a une durée de 28 jours. La paroi muqueuse de l'utérus (le myomètre) passe alternativement par des phases de développement et par des phases de délabrement. La phase optimum de développement est le stade dentelle utérine, au cours de laquelle l'endomètre est prêt à accueillir un éventuel embryon. La muqueuse est épaisse, richement irriguée, elle sécrète du glycogène.

Elle apparaît quelques jours après l'ovulation. Si aucun embryon ne vient s'implanter, cette dentelle va s'altérer, elle est finalement éliminée, c'est la phase des menstruations ou règles. Le premier jour d'apparition des règles (qui, au total durent 4 à 5 jours) marque, par convention, le premier jour du cycle génital. Il faut ensuite reconstruire une nouvelle structure d'accueil, c'est-à-dire développer une nouvelle dentelle utérine. Cela passe par une phase d'épaississement, de développement de la vascularisation, de sécrétion de glycogène...

* **Le cycle de la glaire cervicale** : la glaire cervicale est une substance filamenteuse et légèrement acide qui se trouve au niveau du col de l'utérus. Elle a pour fonction d'opérer un tri extrêmement sélectif parmi les spermatozoïdes, ne laissant passer que les plus résistants. En fait, la plupart du temps elle est imperméable aux spermatozoïdes, mais son aspect et ses propriétés se modifient selon un cycle de 28 jours.

En période ovulatoire, cette glaire cervicale va devenir moins dense et plus alcaline et elle va laisser passer un peu mieux les spermatozoïdes (mais également et malheureusement, les germes microbiens). Quelques jours après l'ovulation, elle a repris son aspect normal.

* **Cycle thermique** : la température corporelle évolue chez la femme selon un cycle de 28 jours. En période préovulatoire, la température est voisine de 36,7 °C. Au moment de l'ovulation elle passe brutalement puis se maintient à une valeur voisine de 37,2 °C (d'où le titre du film de J. J. Beineix) : c'est le plateau thermique. Au cycle suivant, la température reprend sa valeur originale de 36,5 °C.

* A ces différents cycles sont également associés des **cycles hormonaux** (hormones hypophysaires et hormones ovariennes).

Ce qui est le plus remarquable, outre que ces différents cycles ont tous une durée voisine de 28 jours, c'est qu'ils sont tous parfaitement synchronisés. Un léger décalage dans le temps d'un de ces cycles risquerait de gravement compromettre la fonction de reproduction (si, par exemple, la glaire cervicale laissait passer les spermatozoïdes une semaine avant l'ovulation, au moment de celle-ci, ils auraient tous disparu ; si, au contraire, elle laissait passer les spermatozoïdes 3 jours après l'ovulation, il n'y aurait plus d'ovule à féconder). L'ensemble de cette synchronisation suppose une coordination de l'activité des organes concernés, ce qui suppose finalement qu'ils communiquent entre eux. Cette communication est hormonale et fait intervenir l'axe gonadotrope. On constate également, chez l'animal, que le comportement présente également des variations cycliques, saisonnières (saison des amours, période de rut, chaleurs,...).

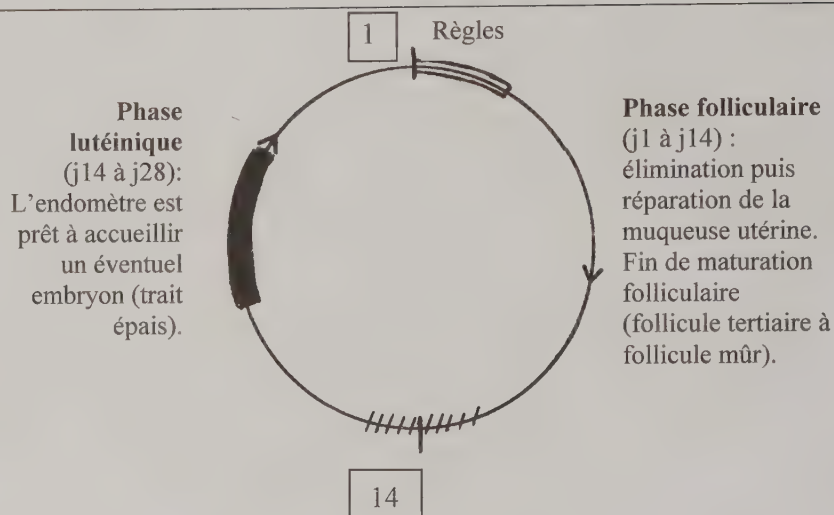


Schéma synthétique du cycle menstruel chez la femme

Le déroulement d'un cycle

Comme nous l'avons déjà indiqué, c'est l'axe gonadotrope ; composé des éléments déjà décrits dans le cadre de la régulation de la fonction testiculaire, qui va intervenir. Les gonadostimulines (tout comme chez le mâle), sont la LH (Hormone Lutéinisante) et la FSH (Hormone FolliculoStimulante). Les hormones sexuelles, sécrétées par l'ovaire sont les estrogènes (ou oestrogènes) et la progestérone. Ce sont la thèque interne et la granulosa des follicules qui assurent cette sécrétion.

La particularité essentielle de la régulation du cycle femelle est que, selon leur concentration, les estrogènes ne vont pas exercer le même rétrocontrôle. La plupart du temps, ce rétrocontrôle est négatif (estrogènes à concentration faible, $< 200 \text{ pg/mL}$), mais, en fin de phase folliculaire, il s'inverse, lorsque le taux plasmatique d'estrogènes dépasse un seuil, voisin de 200 pg/mL . C'est ce double rétrocontrôle assuré par les estrogènes qui est responsable des particularités de ce cycle.

Au jour 1 du cycle, l'endomètre commence à être éliminé, les règles apparaissent. A ce moment, un follicule tertiaire est déjà présent dans l'ovaire, il va achever sa maturation en 14 jours.

La sécrétion pulsatile de GnRH par les neurones hypothalamiques stimule les cellules hypophysaires, qui sécrètent FSH et LH.

Les deux gonadostimulines vont favoriser le développement et la maturation du follicule.

Les gonadostimulines stimulent également la sécrétion d'estrogènes par le follicule en croissance. Dans les premiers jours du cycle, ces estrogènes sont

sécrétés en quantité limitée. Ils exercent alors un rétrocontrôle négatif sur le complexe hypothalamo-hypophysaire. Ces estrogènes vont également favoriser le développement de l'endomètre, et, à terme, ils auront également pour effet de préparer la glaire cervicale à un passage des spermatozoïdes. Avec la croissance folliculaire, ces estrogènes vont toutefois être sécrétés de façon plus abondante et, vers le 12^{ème} jour du cycle, on note l'apparition d'un pic plasmatique d'estrogènes, leur concentration dépassant alors 200 pg/mL. Ils exercent alors un rétrocontrôle positif sur le complexe hypothalamo-hypophysaire (en particulier en sensibilisant les cellules hypophysaires à l'action de la GnRH) et il s'ensuit, au 13^{ème} jour du cycle, un pic de LH, et, dans une moindre mesure, de FSH. Ces deux gonadostimulines, à présent à concentration élevée dans le sang, vont agir sur le follicule parvenu à maturité et, le 14^{ème} jour du cycle, l'ovulation se produit (c'est la ponte ovulaire). Cette ovulation ayant été provoquée principalement par le fort pic de LH, on nomme ce pic : **décharge ovulante**.

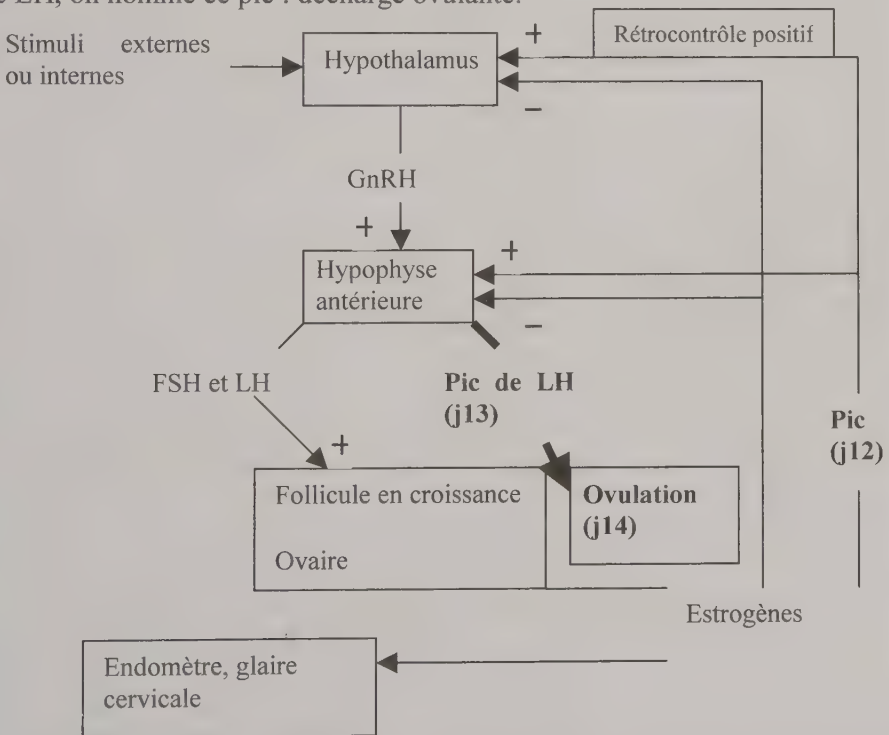


Schéma synthétique des événements marquant la phase folliculaire

———— Sécrète —————> Agit sur

Le cycle aborde à présent sa seconde partie : la phase lutéinique. Elle est marquée par la présence d'un corps jaune, sécrèteur d'estrogènes (à concentration inférieure au seuil) et de progestérone en quantité importante. Ces deux hormones exercent un puissant rétrocontrôle négatif sur le complexe hypothalamo-hypophysaire. De plus, la progestérone favorise la

dentellisation de l'endomètre, favorise également le relâchement du myomètre (le muscle de la paroi de l'utérus) et c'est elle qui induit le plateau thermique caractéristique de la phase lutinique. En d'autres termes, elle prépare l'organisme féminin à une éventuelle gestation.

Le rétrocontrôle négatif exercé par les hormones ovariennes au cours de la phase folliculaire conduit à une nette diminution des taux de LH et FSH. Le corps jaune, moins stimulé finit par régresser et la production des hormones ovariennes, après avoir augmenté, va chuter (à partir du 25^{ème} jour). Recevant moins de progestérone, l'endomètre va à son tour se délabrer, les règles apparaissent, un nouveau cycle débute.

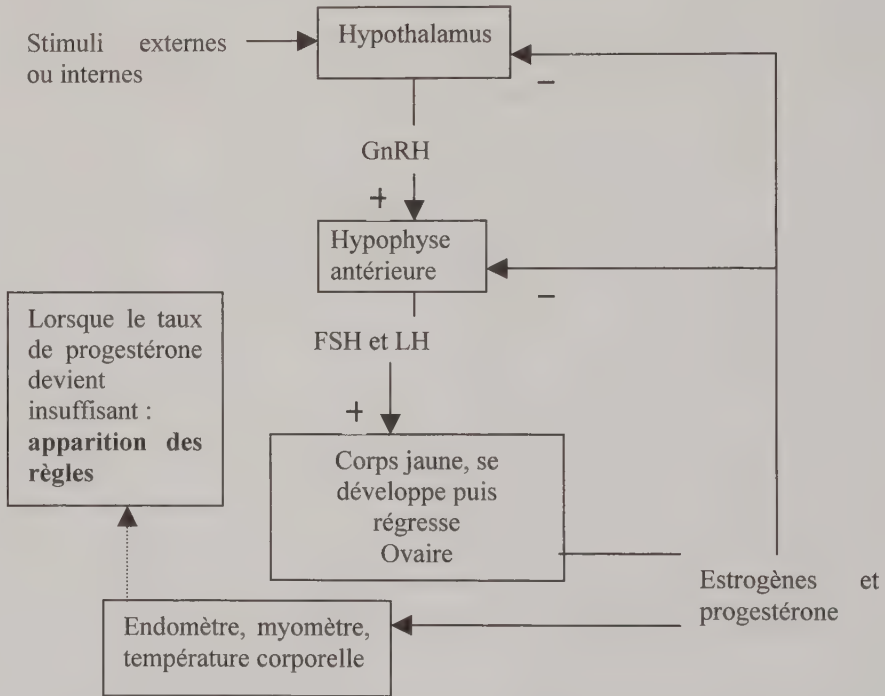


Schéma synthétique des événements marquant la phase lutinique

————— Sécrète —————> Agit sur

NB : l'ensemble des phénomènes décrits ici concerne un cycle non fécondant. A la fin d'un tel cycle, c'est la chute du taux des hormones ovariennes et l'arrêt du rétrocontrôle négatif qui permet un redémarrage du cycle, par augmentation des taux de LH et FSH.

DE L'OVULATION A LA GESTATION

► Les grandes étapes

L'ovule est une cellule de grande taille, immobile, au repos métabolique et chargée de réserves. Le spermatozoïde, est au contraire petit, mobile (la mobilité de ce spermatozoïde a été acquise au cours de son séjour dans l'épididyme) et il a un métabolisme très actif. C'est le spermatozoïde qui va venir féconder l'ovule dans les voies génitales femelles.

Pour qu'une gestation puisse se dérouler il faut que trois étapes fondamentales soient accomplies :

- * L'**ovulation**, puisqu'il faut un ovule à féconder, ce qui implique qu'il y ait des follicules présents, des gonadostimulines pour la stimuler la croissance folliculaire ainsi qu'un pic de LH, déclencheur de l'ovulation.

- * La **rencontre des gamètes**, ce qui suppose que la glaire cervicale soit apte à laisser passer les spermatozoïdes, et donc que les estrogènes aient agi.

- * La **nidation** (implantation de l'embryon dans l'endomètre, environ six jours après la fécondation dans les trompes). Cela suppose la présence de progestérone et d'estrogènes.

On le voit, toutes ces étapes sont contrôlées par des hormones.

► Les adaptations hormonales à la gestation

S'il y a fécondation, suivie d'une nidation, il faut impérativement qu'un taux suffisant de progestérone soit maintenu dans l'organisme maternel, de manière à éviter l'élimination de l'endomètre (ce qui conduirait à un avortement spontané). Or, nous l'avons vu précédemment, lors d'un cycle classique, le rétrocontrôle négatif exercé par les hormones ovariennes conduit à la régression du corps jaune. Sans corps jaune, pas de concentration importante de progestérone et, finalement, pas de maintien de l'endomètre.

C'est l'embryon (plus précisément une annexe de l'embryon : le chorion) lui-même qui apporte une solution au problème. En effet, dès le début de son développement (qui est initié dans les trompes), il sécrète une hormone : la hCG (Gonadotrophine Chorionique humaine). Celle-ci va, en quelque sorte, remplacer la LH. Le corps jaune est donc stimulé, même en présence d'un taux très faible de LH maternelle, et il se maintient, se transformant en corps jaune gestatif. Il continue donc de sécréter de la progestérone, et la grossesse peut se poursuivre.

Plus tardivement, le placenta sécrètera lui-même la progestérone et les estrogènes. La sécrétion de hCG, désormais inutile, pourra alors cesser.

La hCG est donc une hormone spécifique à la gestation, c'est elle que l'on cherche à dépister dans les urines lorsqu'un test de grossesse est pratiqué.

Plus tardivement encore, le placenta sécrètera des hormones qui prépareront l'organisme maternel à la lactation.

LA MAÎTRISE DE LA PROCRÉATION

La connaissance des mécanismes aboutissant à la naissance d'un nouvel individu a permis d'envisager et de mettre au point des méthodes liées à la maîtrise de la procréation. Cette maîtrise de la procréation recouvre différents aspects :

- Contrôle des naissances
- Aide médicalisée à la procréation

Pour chacun de ces deux problèmes, c'est sur les étapes fondamentales de la procréation, de l'ovulation à la gestation, que l'on peut tenter d'agir.

► Dépistage et suivi de la grossesse

Le dépistage de la grossesse est fait traditionnellement par recherche de la hCG dans les urines de la femme présentant une aménorrhée (absence de règles). D'autres dosages sanguins peuvent confirmer ce dépistage (dosages d'hormones telles que progestérone ou hCG).

Le suivi de la grossesse se fait de différentes façons :

- * Dosages hormonaux (recherche, par exemple, de taux anormalement élevés de hCG, souvent corrélés à une trisomie 21).
- * Echographie qui permet de surveiller le développement de l'embryon puis du fœtus. On peut ainsi dépister une trisomie 21, par identification d'une nuque trop épaisse.
- * Amniocentèse (prélèvement de cellules amniotiques), choriocentèse (prélèvement de cellules du chorion) ou cordocentèse (prélèvement de cellules dans le cordon ombilical) permettent de poser un diagnostic après dépistage (par établissement du caryotype par exemple).

► Le contrôle des naissances

Il est possible d'agir sur les points suivants :

- * Ovulation, par prise de pilules, qui, pour la plupart, reproduisent les effets des hormones naturelles, et, en particulier le rétrocontrôle négatif. On peut ainsi empêcher la décharge ovulante de LH.
- * Rencontre des gamètes, par des moyens mécaniques (diaphragme, préservatif, spermicides), ou en agissant chimiquement sur la glaire (hormones ou analogues d'hormones).
- * Nidation, par action mécanique (stérilet) ou chimique : utilisation, par exemple du RU486, analogue structural de la progestérone, qui se fixe sur les récepteurs de cette hormone au niveau utérin, mais sans en avoir les effets. La progestérone ne pouvant plus se fixer sur ses récepteurs, elle n'a alors plus d'effet et l'élimination de la muqueuse utérine s'amorce.

► L'aide médicalisée à la procréation

Le but est ici de venir en aide à des couples désireux d'avoir un enfant, mais dans l'impossibilité de réaliser ce souhait.

Après avoir détecté la cause du problème, on peut, selon les cas agir sur :

- * L'ovulation, par traitements hormonaux (injections de hCG par exemple).

* La rencontre des gamètes, la fécondation in vitro peut par exemple être utilisée dans ce cas. Après avoir provoqué une superovulation chez la femme, on procède in vitro à la rencontre des gamètes avant de réimplanter les embryons obtenus.

* La nidation, par des traitements hormonaux.

Enfin, dans certains cas, on doit faire appel à un donneur pour pratiquer une insémination.

Il va de soi que ces méthodes ne sont pas d'une fiabilité absolue, mais elles résolvent bon nombre de problèmes en venant en aide aux couples dont le désir d'enfant ne peut être satisfait. Elles posent également nombre de problèmes éthiques.

■ Énoncés des exercices ▲

■ Exercice 1 (15 min)

Donnez aux termes suivants une définition claire, concise et complète.

Gonade, gamète, axe gonadotrope, rétrocontrôle, follicule, cycle menstruel, décharge ovulante.

■ Exercice 2 : QCM (15 min)

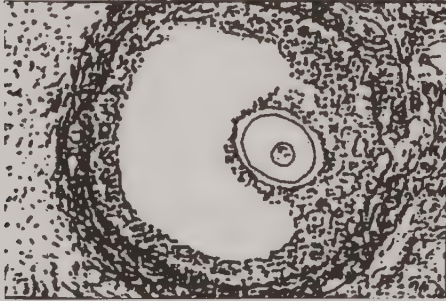
Pour chacune des questions posées, indiquez la ou les proposition(s) vous semblant exacte(s).

1. Dans le cas de la régulation du taux des gonadostimulines hypophysaires :

- Un rétrocontrôle négatif est une rétroaction dans laquelle l'augmentation de la valeur de la variable à réguler doit être compensée par une diminution de la valeur du facteur qui provoque son augmentation, ce qui a pour effet de stabiliser cette dernière
- Chez une femme ovariectomisée, le rétrocontrôle n'existe pas ; les taux de FSH et de LH sont supérieurs à ceux d'une femme fertile
- Chez l'Homme, l'augmentation du taux de testostérone entraîne une diminution du taux de LH
- L'augmentation de la production d'oestradiol en fin de phase folliculaire entraîne une augmentation de la sécrétion des gonadostimulines hypophysaires
- Chez l'homme, la testostérone n'exerce aucun rétrocontrôle sur le taux de LH

- f. Chez la femme, l'une des deux hormones ovariennes produites au cours d'un cycle, peut exercer un rétrocontrôle positif ou négatif selon sa concentration.

2. Le document ci-dessous présente une photographie de structures observées dans une coupe d'ovaire de mammifère, au microscope optique :

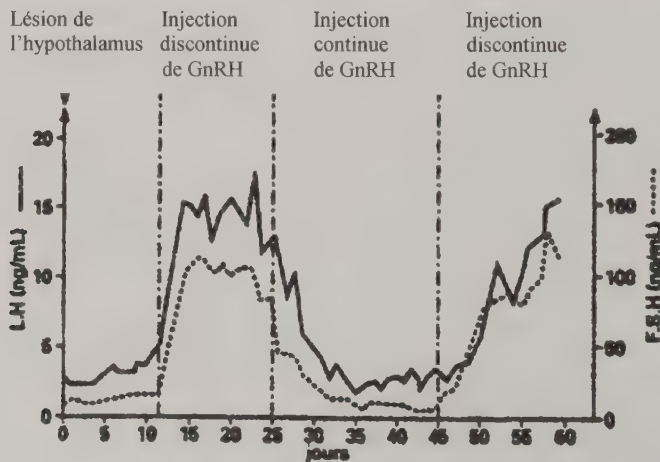


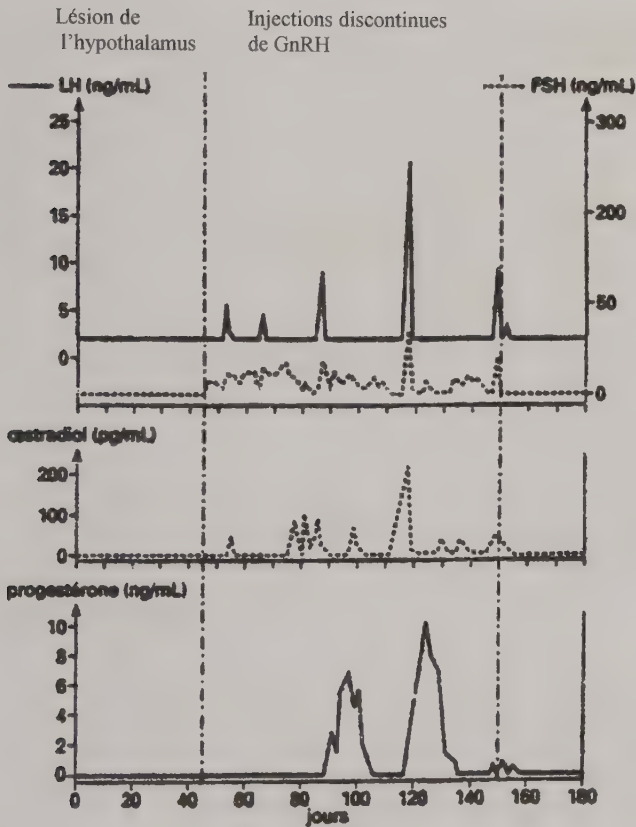
Structure X ($\times 4,5$)



Structure Y ($\times 100$)

- La structure X est un follicule proche de la maturité
 - La structure X se caractérise par une cavité folliculaire
 - La structure X comprend un ovocyte immature
 - La structure X est appelée cellule folliculaire
 - La structure Y peut coexister avec la structure X dans l'ovaire
 - La structure Y comprend un ovocyte immature
 - La structure Y est un follicule qui atteindra sa maturité dans 14 jours.
3. Les courbes suivantes représentent l'évolution de la sécrétion d'hormones lorsque sont pratiquées des perfusions de GnRH chez une femelle ayant atteint la maturité sexuelle et dont l'hypothalamus a été détruit. D'après les documents et vos connaissances :

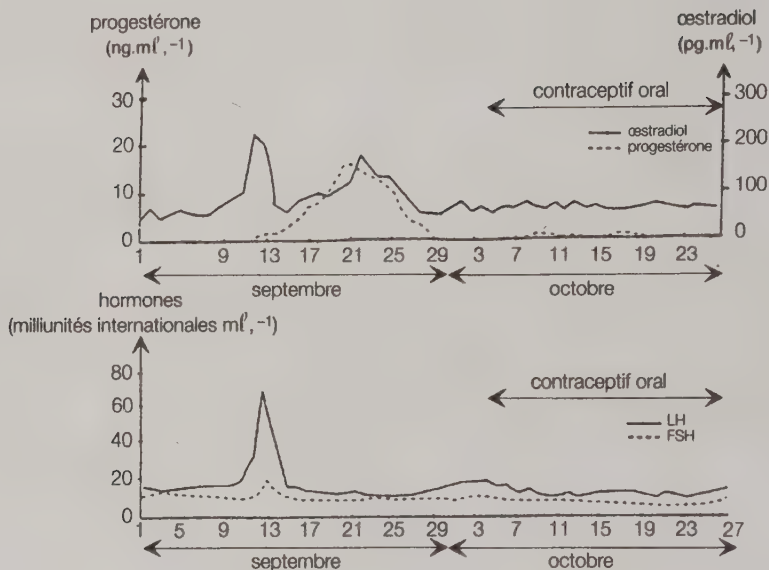




- a. La GnRH agit directement sur la production d'hormones ovariennes
- b. La GnRH n'agit efficacement que si elle est présente en continu
- c. La GnRH stimule la sécrétion des gonadostimulines
- d. La destruction de l'hypothalamus n'a aucune action sur la production d'hormones ovariennes
- e. La GnRH est une neurohormone

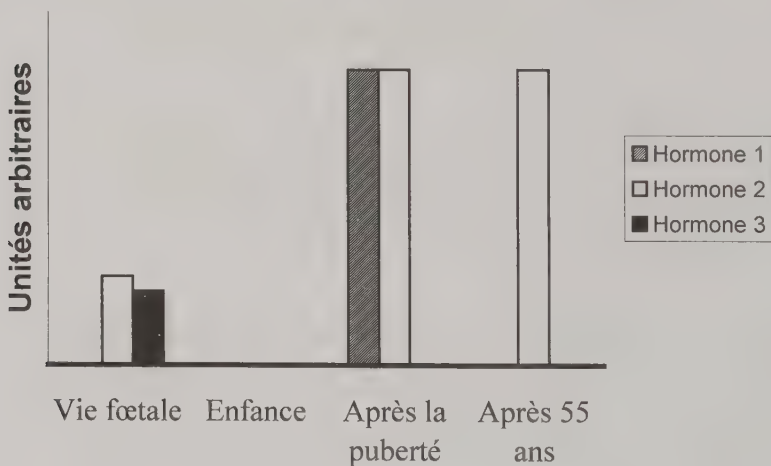
4. La prise d'une pilule contraceptive « combinée normo-dosée » agit sur les taux plasmatiques des hormones sexuelles. Les graphiques de la page suivante présentent des dosages hormonaux (seules figurent les hormones naturelles) effectués chez une femme au cours d'un cycle normal puis lors de la prise d'un contraceptif.

- a. La pilule annule les variations cycliques des hormones ovariennes
- b. Une ovulation s'est produite le 13 septembre environ
- c. Les règles sont apparues le 13 septembre environ
- d. La pilule annule les variations cycliques des gonadostimulines
- e. La pilule a pour effet de faire disparaître le pic de LH
- f. La pilule administrée mime le rétrocontrôle négatif exercé par les hormones naturelles



(D'après divers concours Masso-kinésithérapie)

5. Le graphique suivant présente l'évolution d'hormones sexuelles des deux sexes au cours de leur vie (seule l'allure du graphique importe ici).



- L'hormone 1 peut être l'AMH
- L'hormone 1 peut être une hormone sexuelle mâle
- L'hormone 2 est la testostérone
- L'hormone 2 est un estrogène
- L'hormone 3 peut être l'AMH
- L'hormone 3 peut être la testostérone
- L'hormone 1 et l'hormone 2 peuvent rétroagir sur le complexe hypothalamo-hypophysaire

■ Exercice 3..... (30 min)

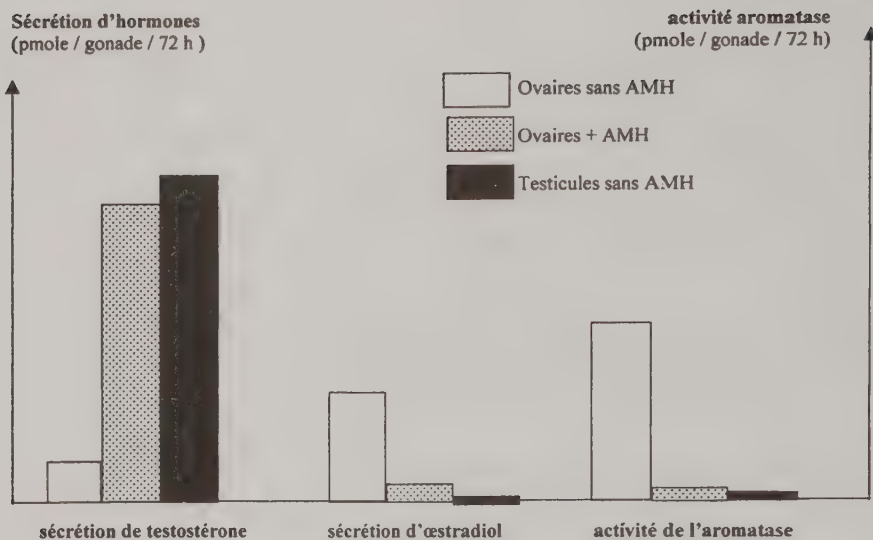
La vache a, normalement, un seul veau par portée, mais des cas de gémellarité peuvent être observés. Lorsque les veaux sont des faux-jumeaux de sexe différents, le fœtus femelle est le plus souvent un « free-martin », c'est-à-dire un intersexué profondément modifié dans le sens mâle.

On remarque que, dans ce cas, les embryons ont contracté très précocement des connexions vasculaires communes.

Document 1 : Chronologie comparée de la mise en place de l'appareil génital des veaux mâle, femelle et « free-martin ».

Age fœtal (jours)	Veau mâle	Veau femelle normal	« Free-martin »
40	Mise en place des cordons séminifères	Gonades indifférenciées	Gonades indifférenciées
45	Différenciation des cellules de Leydig		
50	Régression des canaux de Müller	Augmentation du nombre des cellules germinales	Pas d'augmentation du nombre des cellules germinales Régression des canaux de Müller
56	Développement des vésicules séminales et de la prostate		
60		Organes génitaux externes femelles	Organes génitaux externes femelles
70	Epididyme	Début de méiose et régression des canaux de Wolff	Maintien partiel des canaux de Wolff
90		Début de la folliculogénèse	Cordons séminifères
100		Follicules ovariens	Croissance de l'épididyme, des vésicules séminales et de la prostate

Document 2 : Des expériences ont été réalisées in vitro sur des gonades de fœtus de brebis de 29 jours. Ces gonades sont cultivées en présence ou en absence d'AMH. On mesure dans chaque cas leur production hormonale et l'activité d'une enzyme qui intervient dans la production d'oestradiol à partir de testostérone : l'aromatase.



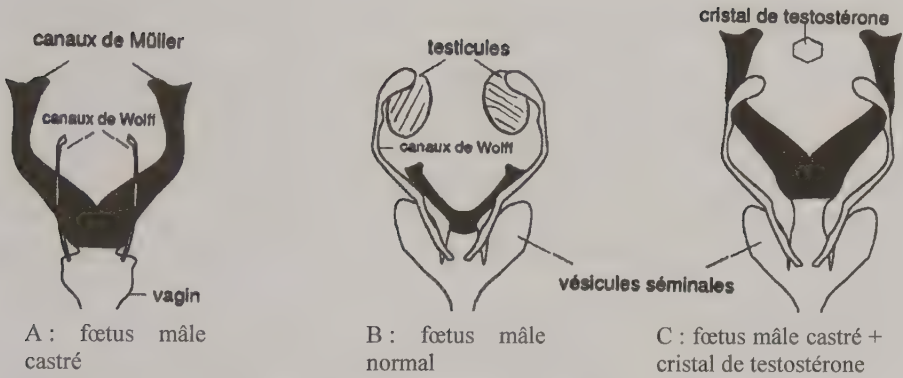
1. Quel est le type de messager chimique mis en jeu dans l'influence du jumeau mâle sur le jumeau femelle ? Justifier la réponse.
2. D'après vos connaissances, indiquez les causes du développement et de la différenciation des testicules chez le mâle.
3. Comment expliquer la régression des canaux de Müller chez le veau « free-martin » ? Justifiez la réponse d'après vos connaissances.
4. A l'aide des documents 1 et 2, expliquez l'origine des événements survenus à partir du 70^{ème} jour chez le veau « free-martin ».

(Concours écoles des services de santé de l'armée, 2003)

■ ■ ■ Exercice 4..... (60 min)

1. A un stade fœtal précoce, les voies génitales des lapins, qu'ils soient génétiquement mâles ou femelles sont semblables. On peut alors trouver dans l'appareil génital embryonnaire à la fois les canaux de Wolff (futurs voies génitales mâles) et les canaux de Müller (futurs voies génitales femelles). Par la suite, au cours du développement, la différenciation des gonades précède celle des voies génitales.

Afin de rechercher le rôle des testicules lors du développement de l'appareil reproducteur mâle, des expériences (Jost, 1947) ont été effectuées sur des fœtus de lapin génétiquement mâles, à un stade très précoce de développement. Les schémas ci-dessous indiquent les résultats de ces expériences juste avant la naissance.



A : Castration de fœtus génétiquement mâle à un stade précoce du développement. Les canaux de Wolff sont en voie de dégénérescence.

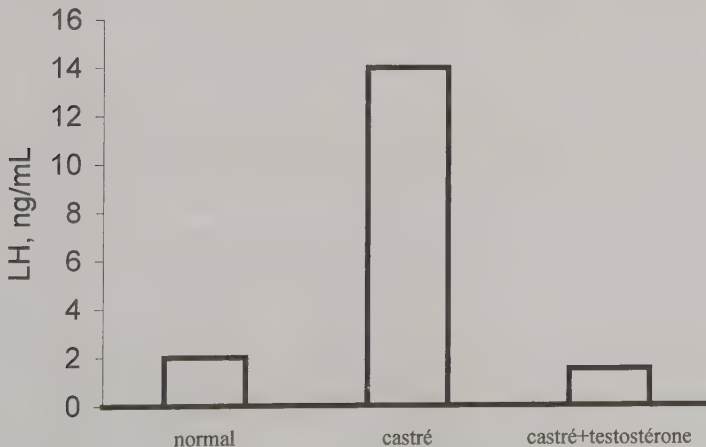
B : Les canaux de Müller sont en voie de dégénérescence.

C : Castration de fœtus génétiquement mâle à un stade précoce du développement (comme en A) et introduction simultanée d'un cristal de testostérone dans la cavité abdominale.

Déduisez de ces expériences le rôle du testicule dans le développement des voies génitales mâles.

(D'après sujet 0, bac 2003)

2. On dose la concentration plasmatique de LH chez des animaux mâles normaux, castré ou castrés recevant quotidiennement de fortes doses de testostérone en injections. Les résultats sont présentés ci-après. Déduisez de ces expériences le rôle de la testostérone sur le complexe hypothalamo-hypophysaire, après avoir rappelé l'origine de la LH.



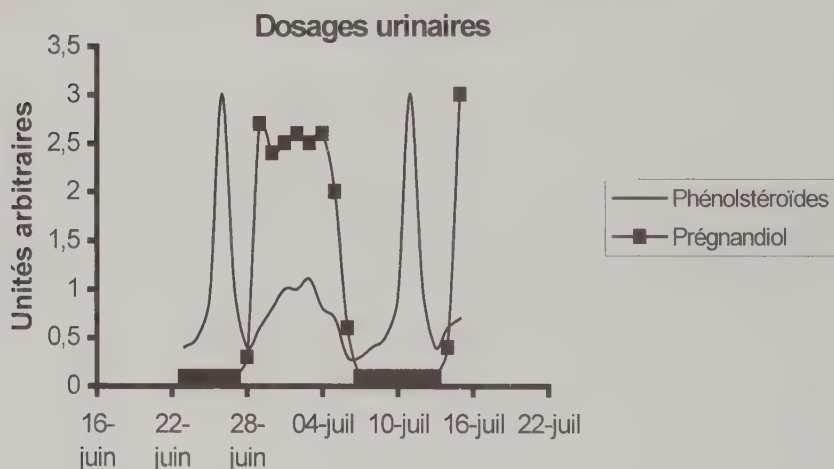
Taux plasmatique de LH chez trois animaux

3. En réalisant un schéma, que vous complétez avec vos connaissances, résumez les rôles de la testostérone chez l'individu mâle.

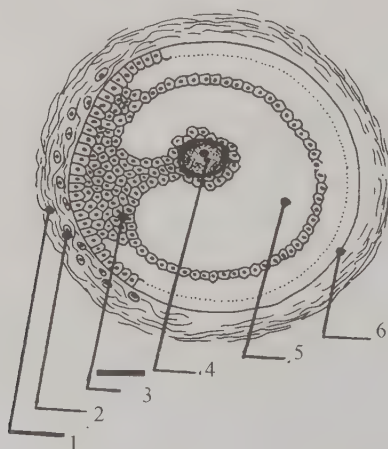
■ Exercice 5..... (20 min)

On a dosé, dans les urines d'une jeune femelle lutin, les composés d'élimination urinaire des hormones ovariennes (produits de la dégradation de ces hormones) : phénolstéroïdes et prégnandiols. Avec une journée de décalage, ces taux urinaires sont représentatifs des taux sanguins des hormones correspondantes. Les variations des taux de ces composés sont donnés dans le graphique ci-après, couvrant une période de quelques semaines (mois de juin et juillet).

1. De quelle hormone sexuelle le prégnandiol est-il la forme d'élimination urinaire ? Même question pour les phénolstéroïdes. Justifiez
2. A quelle date, au cours de la période présentée ici, la 1^{ère} ovulation s'est-elle produite ? Justifiez.
3. Quelle est la durée du cycle ovarien chez le lutin ? Justifiez.



4. A quelle date (approximative), aurait-on pu observer, dans les ovaires de la lutine, une structure telle que représentée ci-après (et que vous identifieriez et légenderez) ? Justifiez.



■ ■ Exercice 6..... (30 min)

On expérimente sur des femelles de singe macaque ou sur des lapines afin de mieux connaître les modalités de leur physiologie sexuelle.

Expérience n°1 : Chez une femelle de macaque on enlève les ovaires avant la puberté. Cette opération a pour conséquence d'empêcher le développement de l'utérus. Si on enlève les ovaires après la puberté, on provoque une atrophie progressive de l'utérus et la disparition des menstruations.

Expérience n°2 : Un fragment d'utérus greffé en une région quelconque de l'organisme femelle adulte subit les mêmes transformations que l'utérus normalement en place.

Expérience n°3 : L'ablation de l'utérus chez une lapine n'a aucun effet sur le fonctionnement des ovaires.

Expérience n°4 : Si l'ablation de l'hypophyse est réalisée chez un animal adulte, l'activité génitale cyclique au niveau de l'ovaire et de l'utérus cesse. La greffe d'une hypophyse chez ces animaux adultes préalablement hypophysectomisés permet à l'activité de l'ovaire et à celle de l'utérus de reprendre.

Expérience n°5 : Chez une femelle de Macaque hypophysectomisée, l'injection d'extraits hypophysaires fait disparaître les effets de l'ablation. Si cette femelle est ensuite ovariectomisée, l'injection d'extraits hypophysaires ne fait pas réapparaître la menstruation.

Expérience n°6 : Chez une lapine une stimulation électrique d'une région très limitée de l'hypothalamus entraîne l'ovulation, tandis que la destruction de cette même région bloque l'ovulation. La stimulation électrique de la région hypothalamique précédente est sans effet si l'on a sectionné auparavant la tige pituitaire qui relie l'hypophyse à l'hypothalamus.

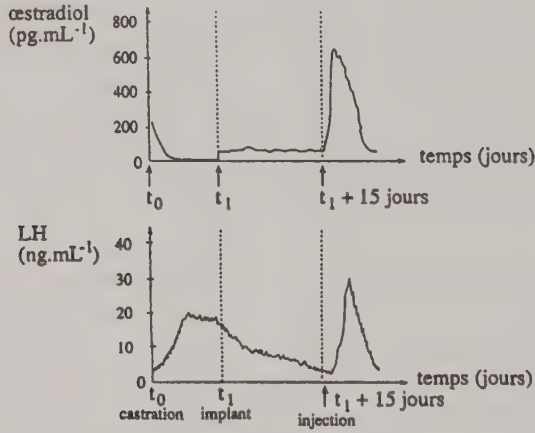
Analysez chacune de ces expériences et indiquez en une unique phrase ce que chacune d'entre elles vous apporte. Vous résumerez alors l'ensemble de ces informations sous la forme d'un schéma.

■ ■ Exercice 7..... (30 min)

L'ovariectomie, d'une façon générale, provoque une élévation des taux sanguins de FSH et de LH. En revanche, l'injection d'estrogènes et de progestérone dans les conditions générales provoque une diminution des taux sanguins de FSH et de LH.

Une femelle adulte de Macaque est castrée au temps t_0 . On introduit à la date t_1 , sous la peau, des implants libérant de l'oestradiol de façon à ce que la concentration soit constante et voisine de la normale en début de cycle. Quinze jours après, on injecte de l'oestradiol de façon à simuler le pic normal se produisant en fin de phase folliculaire. On dose la LH pendant l'expérience. Les résultats sont consignés dans les graphiques ci-après.

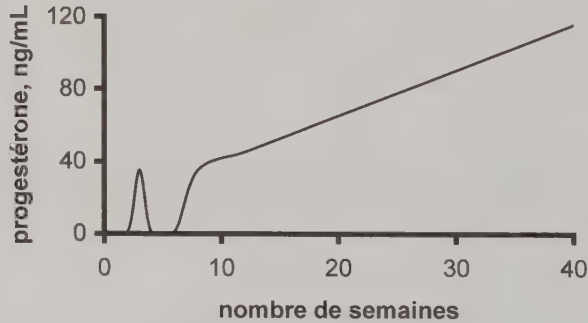
A partir de vos connaissances, donnez une explication à l'ensemble des résultats présentés.



■ Exercice 8..... (20 min)

Des dosages hormonaux effectués chez une femme ont donné les résultats consignés dans le graphique ci-après.

En quoi ces résultats sont-ils surprenants ? Vous leur apporterez une explication en tenant compte du fait qu'un dosage urinaire a permis de mettre en évidence de la hCG chez cette femme.



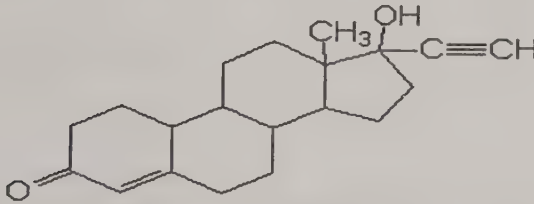
■■■ Exercice 9..... (60 min)

Les documents suivants présentent deux molécules utilisées dans le cadre du contrôle des naissances : le lévonorgestrel et le RU486.

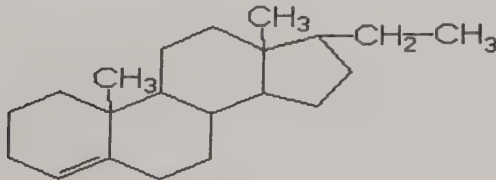
Analysez ces documents et concluez quant aux effets de ces deux molécules, que vous comparerez. Votre réponse sera apportée sous la forme d'un texte structuré.

Document 1 : Après un rapport sexuel éventuellement fécondant, la prise d'un contraceptif d'urgence dont la molécule active, le lévonorgestrel évite dans 85 % des cas une grossesse non souhaitée. Après la prise de ce contraceptif, la concentration plasmatique de lévonorgestrel est proche de 10 µg/L.

Document 2 :



Formule semi-développée de la molécule de lévonorgestrel



Formule semi-développée de la molécule de progestérone

Document 3 :

Il a été mis en évidence, dans des cellules hypothalamiques commandant les sécrétions antéhypophysaires, des récepteurs spécifiques des estrogènes et d'autres spécifiques de la progestérone.

Document 4 :

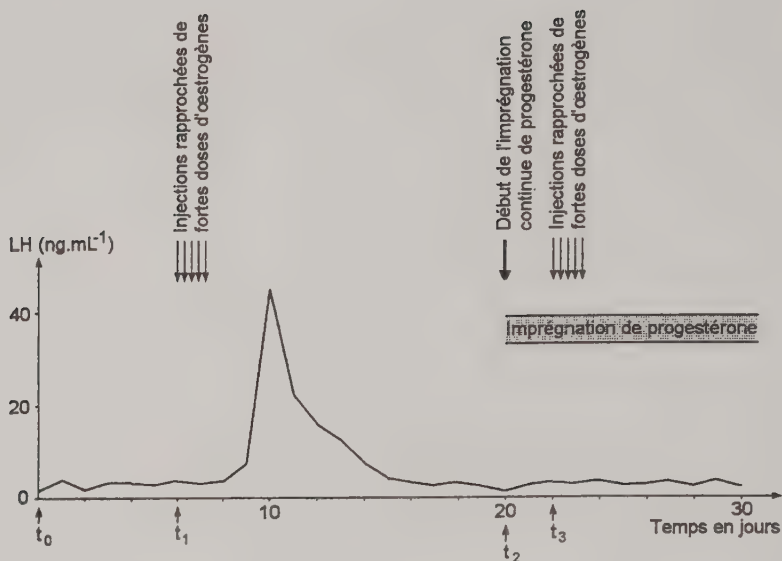
Chez la femme, l'ovulation est obligatoirement provoquée par une décharge massive de LH antéhypophysaire.

La guenon peut servir de modèle expérimental pour l'étude des relations hormonales chez la femme.

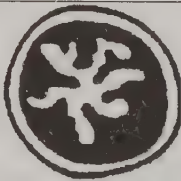
Chez une guenon castrée, faiblement imprégnée d'estrogènes à partir de t0, on dose la sécrétion de LH dans les deux situations expérimentales suivantes :

- Après injections rapprochées de fortes doses d'estrogènes à t1
- Après injections rapprochées de fortes doses d'estrogènes à t3, précédées par une imprégnation plasmatique continue de progestérone proche de 10 µg/mL, à partir de t2.

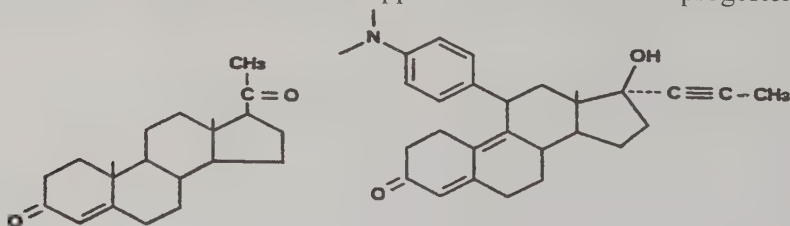
Les résultats sont consignés dans le graphique ci-après.



Document 5 : Expériences réalisées sur des lapines impubères

	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 4	Lot 5
Injections d'oestradiol au temps t_1	NON	OUI	OUI	OUI	OUI
Injection de progestérone au temps t_2	NON	NON	OUI	OUI	OUI
Absorption de RU486 au temps t_2	NON	NON	NON	5 mg/kg	20 mg/kg
Aspect de l'utérus en fin de traitement					
Dentellisation de l'endomètre en fin de traitement	NON	NON	OUI+++	OUI+	NON

Document 6 : structures semi-développées du RU486 et de la progestérone



Document 7 : Résultats d'expériences menées avec du RU486 ou de la progestérone radioactifs. Mesures effectuées dans les cellules de la muqueuse utérine. La quantité totale de molécules radioactives est la même dans toutes les expériences.

Injectons pratiquées	Radioactivité moyenne par cellule de l'endomètre (unités arbitraires)
RU486 marqué au tritium	7,9
Progestérone marquée au tritium	8,55
RU486 non marqué puis progestérone marquée au tritium	2,41

.....■ CONTROLES ■.....

Exercice 1 (100 min ; 10 pts) type I

Expliquez comment, chez la femme, les mécanismes hormonaux contrôlent le développement folliculaire pendant la première partie du cycle ovarien et conduisent à l'ovulation.

Il sera tenu compte de la qualité de l'introduction, du développement structuré et de la conclusion ; des schémas explicatifs, dont celui d'un follicule mûr, devront illustrer chacune des étapes du contrôle.

(Bac 2003)

Exercice 2 (100 min ; 10 pts) type I

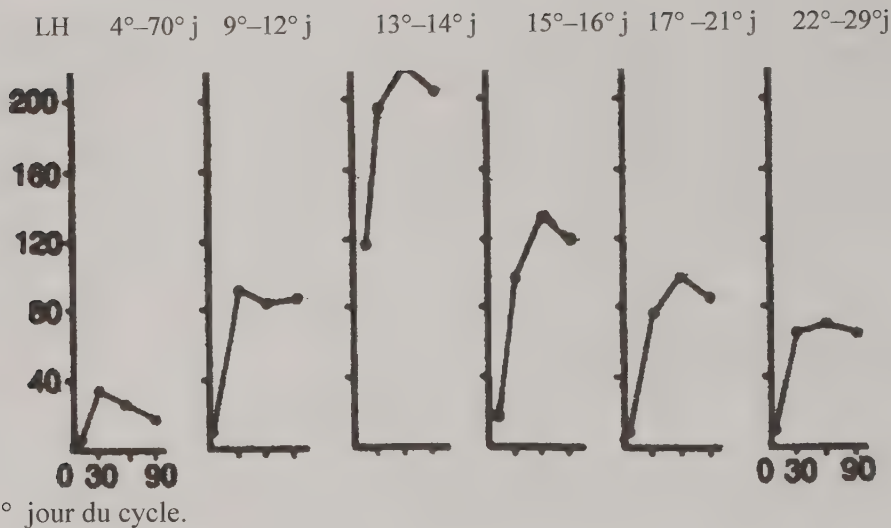
On dit que la testostérone est l'« hormone mâle ».

Vous justifierez cette appellation en envisageant les rôles de la testostérone dans la mise en place et le fonctionnement de l'appareil reproducteur mâle, ainsi qu'en rappelant son mode d'action et son lieu de production.

Exercice 3 (40 min ; 4 pts) Exercice type II1

Le pic de LH est le déclencheur de l'ovulation. Mais quel est le déclencheur de ce pic de LH ? A partir du document suivant, donnez une réponse à cette question.

On effectue des injections intraveineuses identiques d'extraits purifiés d'hypothalamus au cours des différentes périodes du cycle sexuel. La concentration de LH est dosée au cours de ces expérimentations (en milli-unités internationales).



Exercice 4 (40 min ; 4 pts) type II1

Le document suivant présente une série de résultats expérimentaux obtenus chez des rats pubères.

A partir des résultats suivants, montrez qu’une interaction entre appareil génital et hypophyse existe, dont vous préciserez la nature. Un schéma fonctionnel résumera vos conclusions.

Expérience 1 : Le tableau ci-après montre les conséquences de l’ablation des testicules sur les poids moyens des prostates et des vésicules séminales exprimés en mg.

Lot 1 : rats normaux servant de témoins
Lot 2 : rats castrés depuis trois semaines.

Lot N°	Poids des vésicules séminales	Poids des prostates
1	69	76
2	6	8

Expérience 2 : Une injection d’extraits testiculaires chez un mâle castré ou une transplantation testiculaire rétablissent les poids initiaux.

Expérience 3 : Le tableau suivant montre les conséquences de l’ablation de l’hypophyse sur le poids moyen des testicules, des prostates et des vésicules séminales. Exprimés en mg.

Lot N°	Poids des testicules	Poids des vésicules séminales	Poids des prostates
1	1247	69	76
2	280	9	12

Lot 1 : rats normaux

Lot 2 : rats ayant subi l'ablation de l'hypophyse depuis trois semaines

Expérience 4 : Les poids moyens des testicules, vésicules séminales et prostates peuvent être rétablis chez un rat ayant subi l'ablation de l'hypophyse, par injections d'extraits hypophysaires. Toutefois, cette injection n'a d'effets sur les vésicules séminales et prostates que si les testicules sont présents.

Expérience 5 : La castration d'un rat mâle est suivie d'une hypertrophie de l'hypophyse qui montre une activité accrue, celle-ci pouvant être arrêtée par une injection de broyat testiculaire.

Exercice 5 (60 min ; 6 pts) Exercice type II2

On cherche à mettre en évidence les relations entre hypothalamus, hypophyse et ovaire pour comprendre le déterminisme de la sécrétion de LH.

Question : A l'aide des documents 1 et 2, établissez les relations qui existent entre l'hypothalamus, l'hypophyse et les ovaires. Réalisez un schéma fonctionnel récapitulatif illustrant les conclusions tirées des expériences et montrant quels sont les éléments assurant le contrôle de la sécrétion de LH.

Chez une guenon pubère, on dose les concentrations plasmatiques d'oestradiol, hormone ovarienne, et de LH au cours du temps et suivant plusieurs conditions expérimentales. L'espèce de singe choisie présente des cycles sexuels analogues à ceux de la femme.

Document 1. A/ On détruit une région bien localisée de l'hypothalamus de la guenon et, au bout de 20 jours, on perfuse pendant 55 jours de façon pulsatile (à raison de 1 µg/min pendant 6 minutes par heure) une substance extraite de l'hypothalamus : la GnRH. Les variations de concentrations plasmatique de LH et d'oestradiol sont représentées sur la figure 1.

B/ Par ailleurs, chez une autre guenon avec la même lésion de l'hypothalamus et privée d'hypophyse, on fait une injection de GnRH selon les mêmes modalités qu'en A. On observe alors que les sécrétions ovariennes sont nulles.

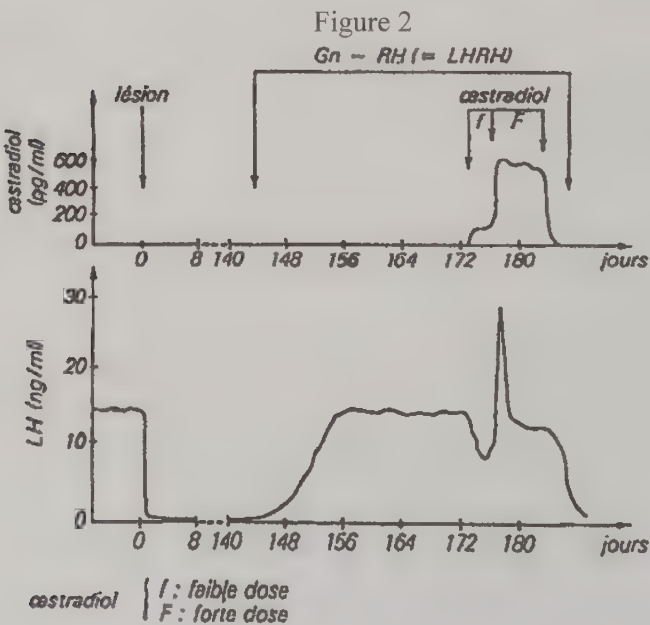
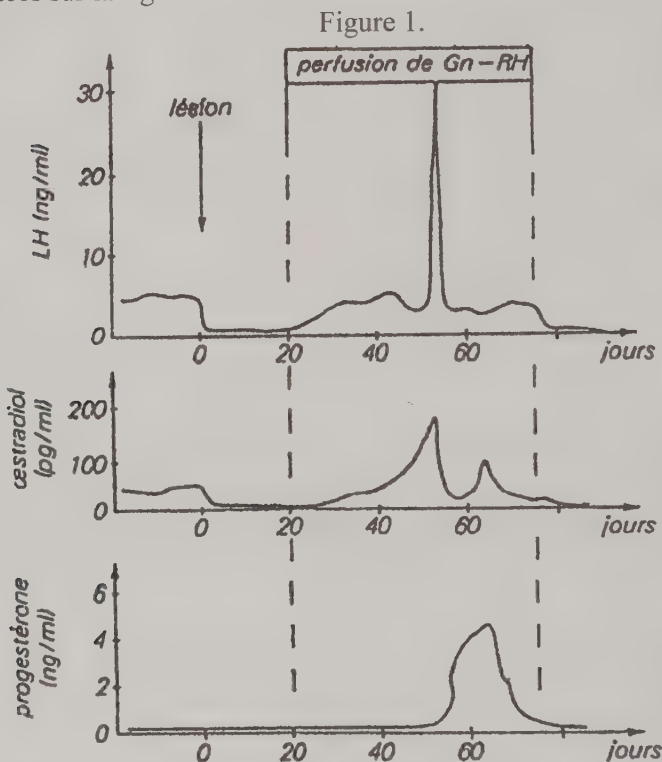
Document 2 : Chez une guenon privée d'ovaires et présentant une lésion de la même partie de l'hypothalamus que précédemment, après un certain délai opératoire, on perfuse successivement diverses hormones.

a) Du 143^{ème} au 187^{ème} jour, on perfuse de façon pulsatile la GnRH dans les mêmes conditions que pour les premières expériences.

b) Du 173^{ème} au 175^{ème} jour, on perfuse de l'oestradiol en faible dose (f sur la figure).

c) Du 176^{ème} au 183^{ème} jour, on perfuse de l'oestradiol à plus forte dose (F sur la figure).

Les variations de concentrations plasmatiques de LH et d'oestradiol sont présentées sur la figure 2.



► Corrigé des exercices ▼

Corrigé 1

Gonade : organe producteur de cellules reproductrices. Chez les animaux, il s'agit des testicules et des ovaires.

Gamète : cellule reproductrice haploïde participant à la fécondation. Chez les animaux, il s'agit des spermatozoïdes et des ovules.

Axe gonadotrope : système de régulation du fonctionnement des gonades. Il comprend trois niveaux de contrôle : hypothalamus, hypophyse et gonades, la communication entre ces éléments se faisant par l'intermédiaire d'hormones : gonadolibérine, gonadostimulines et hormones sexuelles.

Rétrocontrôle : action en retour d'un organe sur un autre organe qui contrôle le fonctionnement du premier. Le rétrocontrôle peut être positif (A stimule B qui, en retour, stimule A) ou négatif (A stimule B qui, en retour, inhibe A).

Follicule : association, au sein des ovaires, d'une cellule germinale et de cellules folliculaires. Le follicule passe par différents stades de développement (primordial, primaire, secondaire, tertiaire, mûr), c'est la folliculogénèse. Au cours de celle-ci diverses structures apparaissent : granulosa, thèques, cavité folliculaire. Le follicule évolue en corps jaune après l'ovulation.

Cycle menstruel : cycle de l'appareil génital femelle au cours duquel apparaissent les menstruations (= règles). Il est sous la dépendance de l'axe gonadotrope. Sa durée est en moyenne de 28 jours dans l'espèce humaine.

Décharge ovulante : pic plasmatique de LH (hormone lutéinisante) hypophysaire qui déclenche l'ovulation. Ce pic est lui-même déclenché par un pic d'estrogènes (rétrocontrôle positif).

Corrigé 2

question	réponse	commentaire
1	a, b, c, d, f	e est nécessairement fausse puisque c est vraie (rétrocontrôle négatif).
2	a, b, c, e, f	X est un follicule mûr, Y est un follicule primaire, il lui reste encore quelques mois avant sa maturation finale.
3	c, e	La GnRH agit sur la production d'hormones ovariennes indirectement, via l'hypophyse et les gonadostimulines. Le premier graphique montre bien la nécessité d'une présence pulsatile de GnRH.
4	a, b, d, e, f	Une ovulation s'est bien produite vers le 13 septembre, après le pic de LH et avant la forte élévation du taux de progestérone. La pilule administrée reproduit les effets

		des hormones naturelles et en particulier le rétrocontrôle négatif exercé sur le complexe hypothalamo-hypophysaire, d'où l'effet contraceptif.
5	c, e, g	Contrairement aux hormones femelles, les hormones sexuelles mâles sont présentes avant la naissance, et elles participent à la différenciation de l'appareil génital mâle. Ce sont donc les hormones 2 et 3. L'hormone 3 est l'AMH, qui n'est présente qu'avant la naissance.

Corrigé 3

1. Les liens existant entre les deux jumeaux sont des liens vasculaires. Le messenger chimique est donc une hormone (puisque c'est la voie sanguine qui est empruntée). Celle-ci a une influence sur le développement de l'appareil génital, dans le sens de la masculinisation. C'est donc une (ou des) hormone sexuelle mâle.

2. Chez le mâle, il y a présence d'un chromosome Y, porteur d'un gène SRY, assurant la synthèse d'une protéine SRY qui permet la différenciation des gonades indifférenciées en testicule.

3. Après la différenciation des testicules, le veau mâle présente une sécrétion de testostérone et d'AMH (Hormone Anti Müllérienne). Si cette dernière peut passer, par voie sanguine, chez le jumeau femelle, elle entraîne la régression des canaux de Müller observable au 50^{ème} jour.

4. A partir du 70^{ème} jour, il y a maintien des canaux de Wolff et croissance d'éléments typiquement masculins tels que épидидyme, vésicules séminales et prostate. Le développement de ces éléments est normalement sous le contrôle de la testostérone. On pourrait tout d'abord penser que la testostérone produite par le jumeau mâle passe dans le sang du jumeau femelle et entraîne la formation de ces éléments. Mais le document 2 nous permet de proposer une explication plus affinée. En effet, un testicule et un ovaire ont une activité sécrétoire différente, le testicule produisant beaucoup de testostérone et peu d'oestradiol, alors que c'est l'inverse pour l'ovaire. Or, l'activité de l'aromatase est plus importante dans l'ovaire que dans le testicule, cette enzyme assurant la transformation de la testostérone en oestradiol. En présence d'AMH, l'activité de cette enzyme est bloquée dans l'ovaire. En présence d'AMH l'ovaire produit donc des taux d'oestradiol (moins produit) et de testostérone (qui n'est plus transformée) comparables à un testicule. Cette forte sécrétion de testostérone par l'ovaire en présence d'AMH explique le maintien des canaux de Wolff et de développement des vésicules séminales, prostate,...

Corrigé 4

1. En présence des testicules (cas B), il se produit une masculinisation des voies génitales. Il y a atrophie des canaux de Müller et développement des canaux de Wolff.

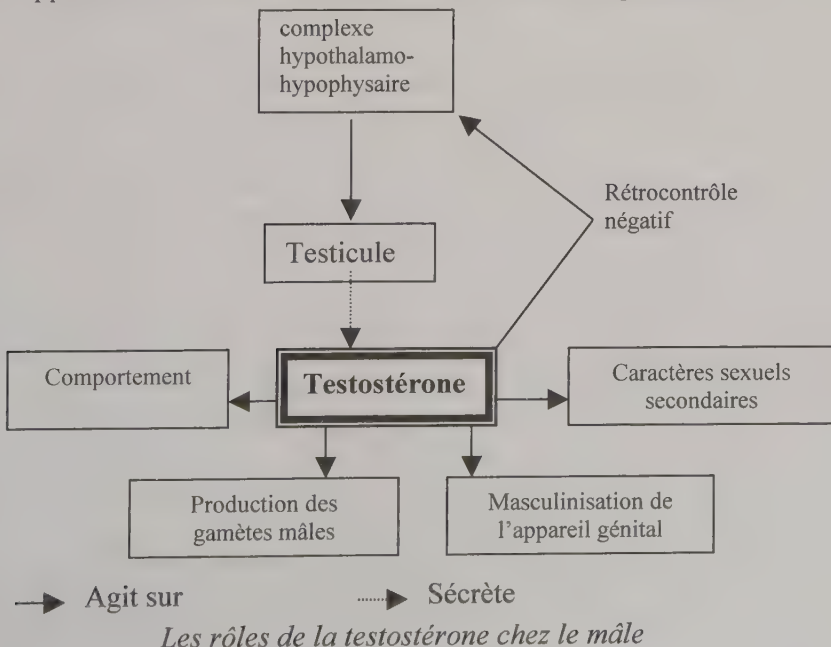
En absence de testicule (cas A), ce sont les canaux de Müller qui se développent, alors que régressent les canaux de Wolff. Ce sont donc les testicules qui sont à l'origine de la masculinisation de l'appareil génital.

En absence de testicule, mais en présence de testostérone (cas C), les canaux de Wolff et de Müller persistent. La testostérone permet donc le maintien et le développement des canaux de Wolff, mais elle n'intervient pas dans la régression des canaux de Müller. Il faut alors envisager une autre action testiculaire (via l'AMH, mais ce ne sont pas les documents qui permettent de l'affirmer).

2. La LH est l'Hormone Lutéinisante. C'est une gonadostimuline produite par les cellules gonadotropes de l'hypophyse antérieure.

Chez un animal castré, on observe, comparativement à l'animal normal, une forte élévation du taux de LH. Le testicule exerce donc une action inhibitrice sur le fonctionnement antéhypophysaire. L'injection de testostérone ramène le taux de LH à une valeur normale, ce qui montre que l'action inhibitrice du testicule s'exerce via la testostérone.

3. La testostérone sécrétée par le testicule joue donc un rôle dans la masculinisation (avant la naissance) et le fonctionnement (après la puberté) de l'appareil génital. Elle intervient en outre dans d'autres fonctions (développement des caractères sexuels secondaires, comportement...).



Corrigé 5

1. Les deux composés présentent une évolution cyclique de leur taux. Les phénolstéroïdes sont présents durant toute la durée du cycle, avec un pic très important les 25 juin et 12 juillet environ. Le prégnañdiol est présent de manière marquée du 28 juin au 6 juillet et à partir du 15 juillet. Le reste du temps, son taux est faible.

Les phénolstéroïdes correspondent à la forme d'élimination des estrogènes (présents durant tout le cycle, avec un pic précédant de peu l'ovulation) et le prégnañdiol correspond à la forme d'élimination de la progestérone (présente de manière importante en phase lutéinique seulement).

2. Il s'est produit une première ovulation vers le 27 juin. En effet, le 29 juin, il y a déjà une forte élévation du taux de prégnañdiol éliminé, ce qui signifie qu'un jour auparavant, le 28 juin, il y a eu une forte élévation du taux de progestérone plasmatique. Un corps jaune est donc présent à partir du 28 juin. De plus, un pic plasmatique d'estrogènes s'est produit vers le 25 juin (pic de phénolstéroïdes urinaires le 27 juin). L'ovulation se situe entre le pic d'estrogènes et l'apparition du corps jaune, soit approximativement le 27 juin.

Remarque : avec le même raisonnement, on montre qu'une autre ovulation a dû se produire vers le 13 juillet.

3. Il faut ici repérer un événement qui se répète de manière nette. Le pic d'estrogènes est un bon indicateur, facile à localiser dans le temps. Si l'on mesure l'intervalle qui sépare les deux pics d'estrogènes qui nous sont présentés, on trouve la valeur de la durée du cycle, ici environ 16 jours.

4. La structure présentée est un follicule mûr, caractérisé par sa cavité importante. Les légendes sont : 1- thèque externe 2- thèque interne 3- granulosa 4- ovocyte 5- cavité folliculaire 6- limite granulosa/thèques

Une telle structure peut être observée dans l'ovaire peu de temps avant l'ovulation, c'est-à-dire le 26 juin et le 12 juillet.

Corrigé 6

Analysons brièvement les expériences proposées :

Expérience 1 : Les ovaires contrôlent le développement et le fonctionnement cyclique de l'utérus, ainsi que le cycle menstruel.

Expérience 2 : Cette action sur l'utérus passe par voie sanguine, c'est-à-dire qu'elle s'effectue par l'intermédiaire d'une hormone.

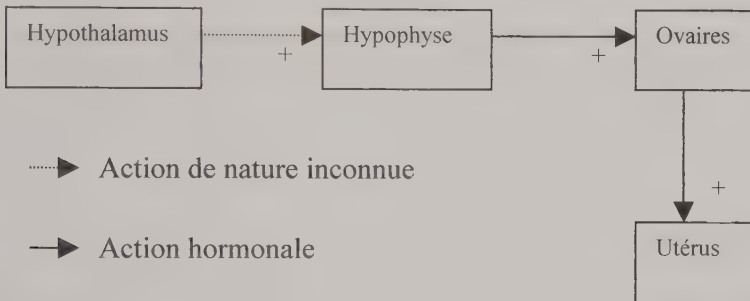
Expérience 3 : L'utérus ne rétroagit pas sur les ovaires.

Expérience 4 : L'hypophyse contrôle, par l'intermédiaire d'hormones, le fonctionnement de l'ovaire et de l'utérus.

Expérience 5 : Les hormones hypophysaires agissent directement sur l'ovaire, en stimulant son fonctionnement, et indirectement sur l'utérus (via les ovaires).

Expérience 6 : L'hypophyse elle-même est contrôlée par l'hypothalamus, via la tige pituitaire.

Si l'on s'en tient aux données tirées des expériences (et c'est bien le but de l'exercice), le schéma que l'on peut proposer est :



Corrigé 7

Notez bien qu'il s'agit ici de donner une explication aux résultats en utilisant les connaissances. Le but n'est donc pas d'analyser les expériences pour (re)découvrir certaines données.

La castration s'accompagne d'une chute de concentration d'oestradiol, (la source de cette hormone, l'ovaire, étant supprimée) et d'une élévation du taux de LH (par suppression du rétrocontrôle globalement négatif exercé par les estrogènes ovariens sur le complexe hypothalamo-hypophysaire).

La pose d'un implant permet de retrouver une concentration modérée (inférieure au seuil) d'oestradiol et l'on reproduit ainsi le rétrocontrôle négatif exercé par les estrogènes, ce qui explique la baisse du taux plasmatique de LH.

A t1 + 15 jours, un pic d'oestradiol plasmatique est obtenu, le taux dépassant alors le seuil, voisin de 200 pg/mL. A cette concentration forte, le rétrocontrôle devient positif et l'on constate alors l'apparition d'un important pic de LH, légèrement décalé dans le temps (un jour après le pic d'oestradiol).

Corrigé 8

Qu'y a-t-il de surprenant dans les données révélées par le graphique ?

Au cours des deux premières semaines de mesure, il n'y a pas de progestérone détectable, puis elle est présente à fort taux au cours des deux

semaines suivantes, le taux revenant ensuite à la valeur initiale faible. Il s'agit d'un cycle normal, de quatre semaines, avec de la progestérone sécrétée de manière importante en phase lutéinique.

C'est le second « cycle » présenté qui est curieux : en effet, si, au cours des deux premières semaines de ce second cycle, il n'y a pas de progestérone détectable, elle apparaît après la deuxième semaine, mais son taux, loin de revenir à la valeur initiale, ne cesse plus d'augmenter. Le cycle disparaît donc. S'il y a présence importante de progestérone, c'est qu'un corps jaune fonctionnel persiste, sécrèteur de progestérone.

La présence de hCG explique cette évolution surprenante : cette hormone est sécrétée par un embryon (ou plus exactement par l'une des ses annexes : le chorion). Nous sommes donc en présence d'une grossesse et un corps jaune gestatif est maintenu en place grâce à la hCG.

Corrigé 9

La connaissance du cycle menstruel et du contrôle hormonal des principales étapes conduisant à une gestation permet d'envisager des méthodes de contrôle des naissances. Deux molécules, lévonorgestrel et RU486 sont ici étudiées. Quels sont leurs modes d'action et leurs effets ? C'est ce que nous nous proposons d'élucider, à partir des documents fournis.

I) Ces molécules sont des analogues structuraux de la progestérone

Lévonorgestrel et RU486 présentent des structures qui, au moins en partie, ressemblent à celle de la progestérone (documents 2 et 6).

La progestérone, comme toutes les hormones, agit en se fixant sur des récepteurs spécifiques. Le RU 486 peut se fixer sur les récepteurs à la progestérone (document 7 : la radioactivité mesurée est un indicateur du nombre de molécules radioactives liées aux récepteurs).

Même si cela n'est pas explicitement dit, on peut envisager que le lévonorgestrel se fixe également sur des récepteurs à la progestérone (il a une action sur le complexe hypothalamo-hypophysaire, au niveau duquel on trouve de tels récepteurs, et sa structure est proche de celle de la progestérone).

II) Le RU486 est un antagoniste de la progestérone

Le RU486 se fixe sur les récepteurs à la progestérone (doc. 7) localisés dans l'endomètre.

Le document 5 indique que, pour une dentellisation correcte de l'endomètre, il faut une action des estrogènes puis de la progestérone (lots 1, 2 et 3). Le RU486 s'oppose à ce développement, cet effet inhibiteur dépendant de la dose utilisée (lots 3, 4 et 5).

En se fixant sur les récepteurs à la progestérone, le RU486 n'a, en lui-même, aucun effet. Mais lorsque cette molécule est liée aux récepteurs, la progestérone ne peut plus se fixer de manière suffisante pour exercer un effet

conséquent. La progestérone a beau être présente, elle ne peut plus agir et, dans ce cas, la dentelle utérine ne peut se développer ni se maintenir. La nidation est alors empêchée. Le RU486 est donc un anti-progestérone, il ne s'oppose pas à sa sécrétion, mais à son action. Le RU486 n'empêche pas l'ovulation, mais il rend la nidation impossible. C'est une molécule contragestive (ou anti-gestative).

III) Le lévonorgestrel reproduit un rétrocontrôle négatif exercé par la progestérone

Le document 4 rappelle que le pic de LH déclenchant l'ovulation est lui-même sous la dépendance d'un pic d'estrogènes (rétrocontrôle positif). Mais si une imprégnation par la progestérone est pratiquée (à partir de t₂), l'administration d'une forte dose d'estrogène est sans effet. La progestérone inhibe le fonctionnement du complexe hypothalamo-hypophysaire en se fixant sur des récepteurs spécifiques qui s'y trouvent (doc. 3).

Nous savons, d'après le document 1, que le lévonorgestrel est utilisé comme contraceptif d'urgence. Son mode d'action (à des doses permettant d'obtenir des concentrations voisines de la concentration de progestérone utilisée dans le document 4) passe par une fixation au récepteur de la progestérone, dont il reproduit les effets inhibiteurs sur le complexe hypothalamo-hypophysaire, bloquant l'apparition du pic de LH déclencheur de l'ovulation. Cette pilule contraceptive n'est cependant efficace que si l'ovulation ne s'est pas déjà produite, ce qui explique son efficacité de 85 %.

En résumé, ces deux molécules sont des analogues de la progestérone, susceptibles de se fixer sur les récepteurs de l'hormone naturelle. En dehors de ce point commun, leurs effets diffèrent. Alors que le lévonorgestrel mime et reproduit les effets de l'hormone (inhibition du complexe hypothalamo-hypophysaire), le RU486 bloque l'action de la progestérone et empêche la dentellisation.

.....■ CORRIGE DES CONTROLES ■.....

Exercice 1

Il faut, comme d'habitude, bien délimiter le sujet. Nous devons ici décrire les mécanismes de contrôle hormonal de la croissance folliculaire et de l'ovulation. Une description exhaustive du cycle menstruel serait hors-sujet. Il est en revanche fondamental de bien cerner le déclenchement de l'ovulation, par le rétrocontrôle positif. Des schémas doivent impérativement apparaître.

Proposition de plan :

La reproduction biparentale suppose la rencontre et donc la production de gamètes.

Le fonctionnement de l'appareil génital féminin se caractérise par son aspect cyclique. Au cours d'un cycle de 28 jours, suite à la croissance d'un follicule dominant, il y a production d'un gamète. L'ensemble de la fonction de reproduction étant soumise à régulation hormonale, on peut s'interroger sur les mécanismes hormonaux qui contrôlent le développement folliculaire et conduisent à une ovulation.

I) La croissance folliculaire est contrôlée par l'hypophyse

Des sécrétions hypophysaires de FSH (et de LH) entraînent la maturation du follicule cavitaire (et non du follicule primordial) en follicule mûr.

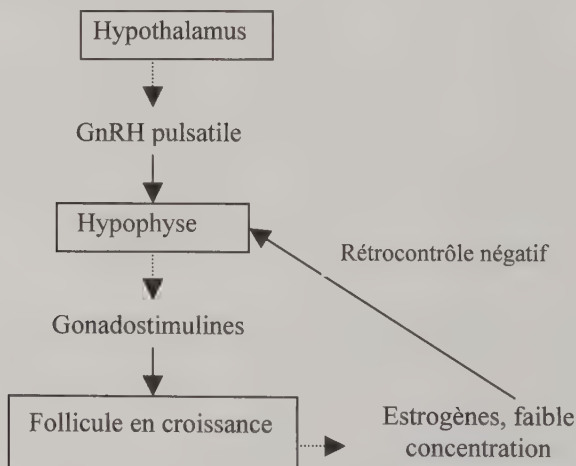
Un schéma légendé de follicule mûr est ici attendu (cf. page 164).

Les sécrétions hypophysaires sont sous le contrôle d'une neurohormone hypothalamique, sécrétée de manière pulsatile : la GnRH.

La thèque interne et la granulosa produisent de l'oestradiol. La production est faible jusqu'au 12^{ème} jour et il s'exerce un rétrocontrôle négatif sur le complexe hypothalamo-hypophysaire.

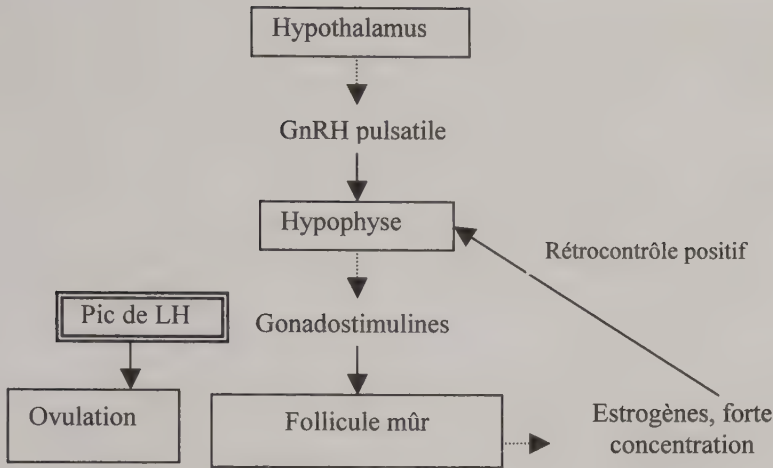
Un rétrocontrôle est une action en retour d'un organe (ici l'ovaire) sur un autre organe qui contrôle son activité.

Avec le rétrocontrôle négatif, il y a inhibition de la production des gonadostimulines hypophysaires. Néanmoins ces hormones sont encore présentes et la maturation folliculaire se poursuit.



II) L'ovulation est déclenchée par une inversion du rétrocontrôle

Avec le développement du follicule ovarien, la sécrétion d'estrogènes s'accroît de manière remarquable vers le 12^{ème} jour du cycle. Le taux plasmatique de cette hormone dépasse alors un seuil (voisin de 200 pg/mL) et le rétrocontrôle exercé par les estrogènes sur le complexe hypothalamo-hypophysaire devient positif. Il s'ensuit un pic de LH = décharge ovulante (13^{ème} jour du cycle environ), qui déclenche l'ovulation au jour 14.



En conclusion, la croissance folliculaire et l'ovulation sont contrôlées par le complexe hypothalamo-hypophysaire. Ce sont les modifications du rétrocontrôle ovarien sur ce complexe qui font passer de la croissance folliculaire à l'ovulation. On peut alors s'interroger sur le devenir du follicule après expulsion de l'ovocyte hors de l'ovaire.

Exercice 2

Le plan est ici suggéré par l'énoncé : rôle de la testostérone dans la masculinisation de l'appareil génital, puis son rôle dans le fonctionnement de cet appareil, sans omettre la fonction fondamentale de production de gamètes. Il faut également penser à définir ce qu'est une hormone (terme de l'énoncé) et à montrer que la testostérone répond à cette définition.

Proposition de plan :

Comme toutes les fonctions physiologiques, la reproduction est contrôlée par des hormones. Une hormone est un messenger chimique sécrété par une structure endocrine, véhiculé par voie sanguine et agissant par l'intermédiaire de récepteurs spécifiques. Le mâle se différencie de la femelle par la production régulière de gamètes, les spermatozoïdes, par son appareil génital et par ses caractéristiques physiques et comportementales.

En quoi la testostérone est-elle responsable de ces spécificités ?

I) La testostérone est une hormone

Elle est sécrétée par les cellules de Leydig testiculaires, et agit sur des cibles spécifiques (voies génitales, complexe hypothalamo-hypophysaire...).

II) La testostérone participe à la mise en place du phénotype masculin

Avant la naissance : action favorisant le développement des canaux de Wolff (l'AMH est ici hors-sujet).

A partir de la puberté : développement des caractères sexuels secondaires : pilosité, morphologie, comportement.

La testostérone participe donc à la mise en place du morphotype masculin.

III) La testostérone participe au fonctionnement de l'appareil génital masculin

Action stimulante dans la production des spermatozoïdes.

Rétrocontrôle négatif sur le complexe hypothalamo-hypophysaire, ce qui permet de conserver un taux de testostérone constant et donc une spermatogenèse régulière.

La testostérone permet donc la mise en place du phénotype masculin, et elle permet également la production des gamètes mâles, tout en exerçant un rétrocontrôle négatif sur le complexe hypothalamo-hypophysaire. Elle est donc bien l'hormone qui caractérise le mâle. Existe-t-il un équivalent chez la femelle ?

Exercice 3

L'injection d'extraits purifiés d'hypothalamus se traduit par une élévation, dans les minutes qui suivent l'injection, du taux de LH. Les extraits hypothalamiques stimulent donc la production de cette hormone. On constate cependant que la réponse hypophysaire n'est pas la même selon le jour du cycle. Au moment de l'ovulation (jour 14), l'injection d'extraits hypotyhalamiques provoque une réponse sécrétoire beaucoup plus importante que pendant les autres jours. L'hypophyse est donc sensibilisée à l'action des extraits hypophysaires en période ovulatoire, ce qui déclenche le pic de LH.

C'est le fort taux d'estrogènes en fin de phase folliculaire qui est responsable de cette sensibilisation, mais les documents ne permettent pas de le dire, et il faut s'en tenir à ces documents, sans ajout de connaissance.

Exercice 4

Analysons successivement les différentes expériences avant de résumer par un schéma les résultats.

Expérience 1 : L'ablation des testicules provoque une régression des caractères sexuels. Le testicule contrôle donc le développement et le maintien de ces caractères.

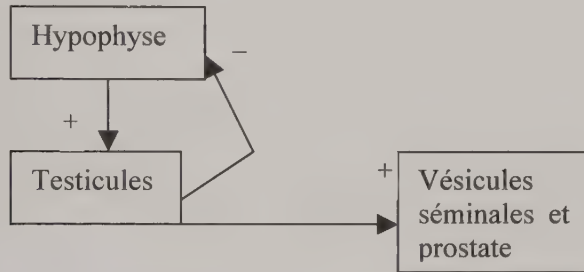
Expérience 2 : Une injection d'extraits permet de corriger les effets de la castration. Cette action testiculaire s'exerce à distance, par voie sanguine. Il s'agit d'une action hormonale.

Expérience 3 : L'ablation de l'hypophyse provoque une régression testiculaires, ainsi que des vésicules séminales et prostate. L'hypophyse contrôle donc le développement et le fonctionnement de ces structures.

Expérience 4 : L'hypophyse agit sur les testicules de manière directe et, de manière indirecte, sur les vésicules séminales et prostate. Cette action s'exerce par voie hormonale.

Expérience 5 : Si l'hypophyse voit son activité augmenter lorsqu'on pratique une castration, cela signifie que les testicules ont une action inhibitrice sur l'hypophyse. Il s'agit d'un rétrocontrôle (puisqu'on a déjà montré qu'il y a un contrôle de l'hypophyse sur les testicules) négatif.

En résumé :



Exercice 5

Déterminons, à l'aide des expériences présentées, comment est contrôlée la sécrétion de LH. L'analyse des documents sera présentée sous forme d'un tableau.

Expériences et analyse	Conclusions
Doc. 1 Conséquences de la lésion de l'hypothalamus : chute du taux de LH et arrêt de la sécrétion d'oestradiol	L'hypothalamus contrôle ces sécrétions.
Conséquences de l'injection de GnRH : retour d'une sécrétion de LH normale (comparativement à la sécrétion avant lésion). Un cycle normal se déroule pic d'oestradiol, pic de LH, apparition de la progestérone en concentration importante.	L'hypothalamus contrôle l'activité hypophysaire par l'intermédiaire de la GnRH. L'hypothalamus contrôle l'activité ovarienne.
Conséquences de l'arrêt de la perfusion de GnRH : mêmes effets qu'à la suite de la lésion	Confirme le rôle de l'hypothalamus et de la GnRH
Injections de GnRH après hypophysectomie : pas d'effet sur les hormones ovariennes	L'hypothalamus agit sur les ovaires par l'intermédiaire de l'hypophyse.
Nous avons donc, pour le moment :	
Hypothalamus > GnRH > Hypophyse > LH > Gonades > Oestradiol et progestérone	
Doc. 2 Effet de l'ovariectomie comparaison figure 1 / figure 2 avant lésion de l'hypothalamus : En absence d'ovaires, le taux de LH est 3 fois plus élevé qu'en présence d'ovaires (15 ng/mL contre 5 ng/mL).	Les ovaires ont un effet globalement inhibiteur sur la sécrétion de LH
Lésion de l'hypothalamus : chute du taux de LH	Confirme le rôle de l'hypothalamus, qui stimule la sécrétion de LH
Perfusion de GnRH : forte sécrétion de LH	Confirme le rôle de la GnRH
Injection d'oestradiol à faible dose : diminution	Les ovaires, via l'oestradiol à faible

du taux de LH	concentration rétroagissent négativement sur la sécrétion de LH
Injection d'oestradiol à forte dose : nette élévation du taux de LH (ce taux double en une journée)	Les ovaires, via l'oestradiol à forte concentration rétroagissent positivement sur la sécrétion de LH

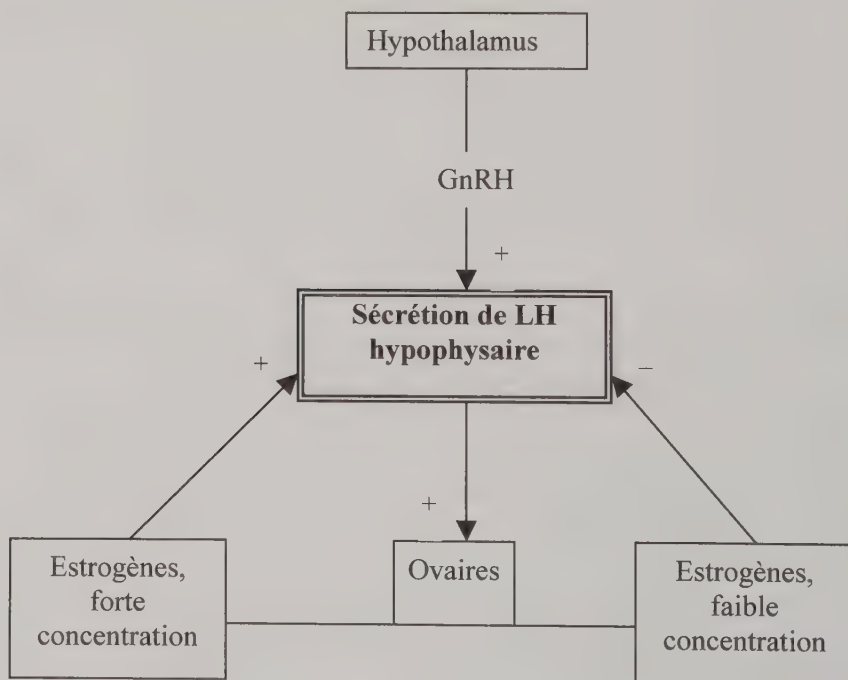
Vous pouvez tout à fait utiliser une présentation de ce type dans une copie de bac.

Remarque : le pic de LH (jour 54 environ) observé dans la figure 1 est donc provoqué par la GnRH et surtout par le rétrocontrôle positif des estrogènes exercé à partir du jour 52 environ.

En résumé, la sécrétion de LH par l'hypophyse est contrôlée par divers facteurs :

- * GnRH hypothalamique, qui stimule la sécrétion de LH
- * Rétrocontrôles ovariens exercés par l'oestradiol
 - Rétrocontrôle négatif à faible concentration
 - Rétrocontrôle positif à fortes concentrations

Un schéma peut résumer cela :



Stabilité et variabilité des génomes et évolution

Les êtres vivants présentent une grande diversité. Ceci est vrai aussi bien si l'on considère l'ensemble de la biodiversité existant ou ayant existé, ou si l'on considère la grande variabilité des individus au sein d'une espèce. Nous allons montrer dans ce chapitre que cette variabilité résulte d'innovations génétiques qui se sont accumulées sur des générations, et qui sont brassées par les mécanismes de la reproduction sexuée.

LES MUTATIONS : UNE SOURCE D'INNOVATION GENETIQUE

Une mutation est une modification brutale, aléatoire, rare et spontanée de l'information génétique. Il s'agit d'une modification de l'ordre dans lequel les nucléotides de l'ADN se succèdent. Une mutation affectant toujours l'ADN, elle est toujours le fruit d'une erreur de réplication. Les mutations naturelles sont spontanées, mais on peut augmenter leur fréquence, par l'utilisation d'agents mutagènes (rayons X par exemple).

Les mutations sont à l'origine des différents allèles (des différentes versions) d'un gène. Elles peuvent n'affecter qu'un seul ou un nombre très restreint de nucléotides (mutations ponctuelles) ou être d'ampleur plus importante.

Il existe trois grands mécanismes de mutations ponctuelles :

- * Mutation par substitution, c'est-à-dire par remplacement d'un nucléotide par un autre. Une telle mutation ne décale pas le cadre de lecture et, de manière générale, la protéine qui résulte de l'expression du gène muté ne diffère de la protéine initiale que par un acide aminé (mutation faux-sens, sauf cas où le codon apparu après modification est un codon stop qui interrompt la lecture de l'ARN messager et l'on parle alors de mutation non-sens). Parfois, du fait de la redondance du code génétique, la modification de l'ADN ne se répercute pas dans la structure primaire de la protéine synthétisée, on parle alors de mutation silencieuse.

- * Mutation par délétion : un nucléotide est perdu. Il y a, dans ce cas, décalage du cadre de lecture et la protéine synthétisée sous contrôle de ce nouvel allèle diffère souvent assez sensiblement de la protéine initiale.

* Mutation par addition (ou insertion) : un nucléotide est venu s'insérer dans la séquence originelle du gène. Il y a, là encore, décalage du cadre de lecture.

Selon la nature et la localisation des mutations, les conséquences phénotypiques observables sont très variables, depuis les mutations silencieuses, sans conséquence phénotypique, jusqu'aux mutations létales, qui tuent les individus qui en sont porteurs.

De manière générale, les mutations sont des événements génétiquement innovants, puisqu'elles créent des allèles nouveaux. Ces nouveaux allèles peuvent se retrouver au sein des populations et ils peuvent y circuler librement, par le biais de la reproduction sexuée. De génération en génération, les allèles s'accumulent au sein des populations et un même gène peut donc y exister sous diverses formes alléliques. Les gènes sont alors dits polyalléliques. On parle de gène polymorphe lorsque deux de ses allèles au moins sont présents à une fréquence supérieure à 1 % dans la population. Un gène polymorphe est donc polyallélique, mais un gène polyallélique n'est pas nécessairement polymorphe.

► La constitution des familles multigéniques

Il existe des protéines (certaines hormones hypophysaires par exemple, ou bien encore les globines constitutives de l'hémoglobine) qui présentent de fortes ressemblances, alors qu'elles sont codées par des gènes différents, occupant des positions (des loci) différentes sur les chromosomes. Ces protéines ne sont donc pas codées par des allèles différents d'un même gène et pourtant, leurs ressemblances suggèrent qu'elles ont une origine commune. Les gènes qui codent pour ces protéines ont donc eux aussi une origine commune.

Le mode de formation de ces familles multigéniques comporte toujours les étapes suivantes :

- Duplication d'un gène, qui se trouve alors présent en deux exemplaires distincts, occupant des loci différents au sein du génome.
- Eventuellement transposition d'un exemplaire du gène sur un autre chromosome.
- Mutations qui vont s'accumuler, au fil des générations. Les mutations étant aléatoires et non dirigées, elles vont petit à petit, au fil des générations, avoir pour conséquence une différenciation des deux exemplaires du gène ancestral. Ces deux gènes vont alors pouvoir produire des protéines apparentées (même origine) mais différentes et ayant parfois des fonctions différentes au sein de l'organisme.

Ces différentes étapes peuvent se répéter, et le gène ancestral peut alors donner naissance à toute une famille de gènes (famille multigénique).

Grâce à ces phénomènes, il y a donc, de génération en génération, enrichissement et complexification du génome.

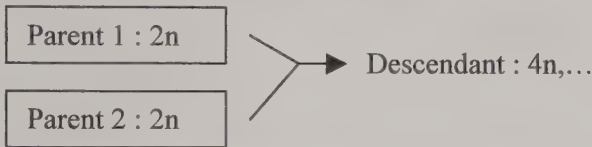
Il s'agit donc d'un important facteur d'évolution.

MEIOSE, FECONDATION ET STABILITE DES ESPECES

► Les cycles de reproduction

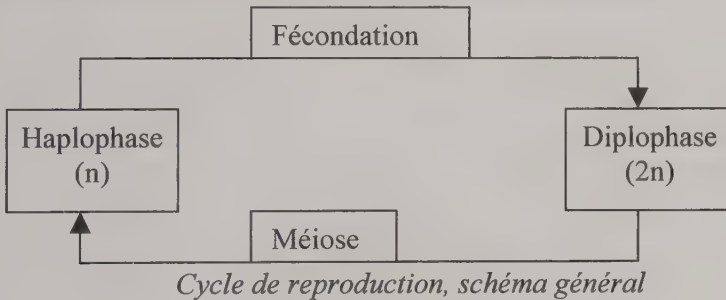
Chez les espèces à reproduction biparentale, il existe une alternance haplophase (phase haploïde, n chromosomes) / diplophase (phase diploïde, à $2n$ chromosomes). Cette alternance est ponctuée par deux mécanismes : la méiose et la fécondation, qui, en se compensant mutuellement, assurent le maintien de la formule chromosomique de génération en génération et contribuent donc à la stabilité de l'espèce.

Si ces phénomènes n'intervenaient pas, le nombre de chromosomes d'une espèce augmenterait au fil des générations :



Or, ce phénomène n'est pas observé lors de la reproduction sexuée.

L'alternance haplophase-diplophase peut être schématisée :



Selon l'importance relative de l'une ou l'autre de ces phases, l'organisme est un diplonte (cycle diplophasique, lorsque la diplophase prédomine, c'est le cas de la plupart des organismes animaux ou végétaux) ou un haplonte (cycle haplophasique, lorsque l'haplophase prédomine, c'est, par exemple le cas du champignon ascomycète *Sordaria*).

Chez les diplontes, la méiose participe à la formation des gamètes. En revanche, chez les haplontes, elle se produit après la fécondation, pour la formation d'individus nouveaux.

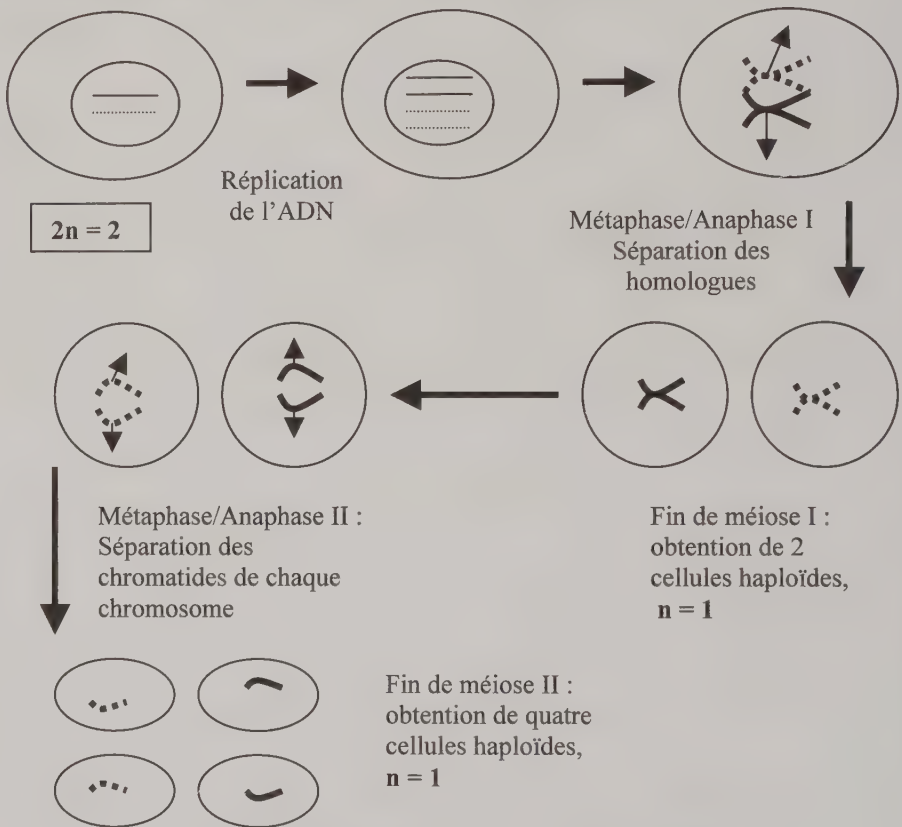
► La méiose opère une réduction chromatique

La méiose est un ensemble de deux divisions qui ne sont précédées que d'une unique réplication de l'ADN. Elle compense la fécondation en opérant le passage de la diplophase à l'haplophase. La méiose permet une réduction (de moitié) du nombre de chromosomes, elle assure une réduction chromatique.

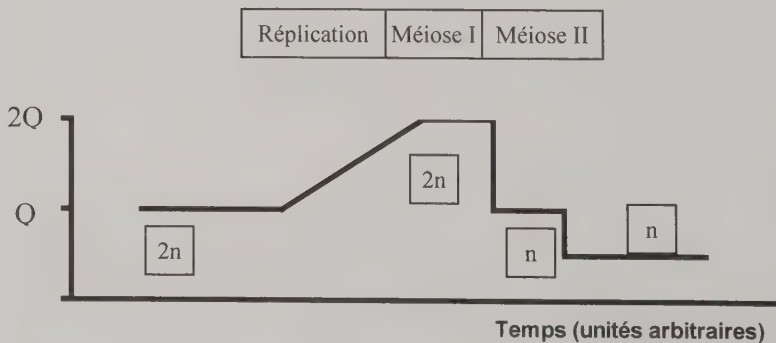
La première division méiotique sépare les homologues de chaque paire. Elle est dite réductionnelle.

C'est lors de cette première division que se produit le passage de $2n$ à n chromosomes.

La seconde division méiotique sépare les chromatides de chaque chromosome. La ploïdie ne change plus. Cette seconde division méiotique, dite équationnelle est comparable à une véritable mitose.



La méiose : principales étapes, schéma simplifié



Evolution de la quantité d'ADN par cellule (unités arbitraires)

Remarques :

- La répartition des homologues lors de la métaphase I est aléatoire.
- Lors de la prophase I, les chromosomes homologues sont susceptibles d'échanger des portions de chromatides (crossing-over).

► La fécondation permet de constituer des paires d'homologues

La fécondation permet d'unir deux cellules haploïdes pour former une cellule diploïde. Il y a donc apport d'un lot haploïde de chromosomes de la part de chacun des deux parents, les paires d'homologues se constituant alors.

Chez les mammifères (et d'autres...), les cellules haploïdes qui s'unissent lors de la fécondation sont des gamètes (spermatozoïde et ovule), élaborés au sein des gonades (testicule et ovaire respectivement). Lorsque la membrane du spermatozoïde fusionne avec la membrane de l'ovule (plasmogamie = union des cytoplasmes), il se produit une activation de l'ovule, ce qui entraîne la mise en place de tout un ensemble de phénomènes visant à éviter la polyspermie (visant à éviter qu'un même ovule ne puisse être fécondé par plusieurs spermatozoïdes, ce qui entraînerait la constitution de cellules ayant des formules chromosomiques anormales).

Il se produit ensuite une union des noyaux (caryogamie), un noyau diploïde est constitué, et la cellule-œuf, première cellule du nouvel individu est formée.

Dès lors, le bagage chromosomique et génétique de ce nouvel individu est constitué. Le sexe du nouvel individu est en particulier déterminé dès cet instant. S'il reçoit de ses parents une combinaison XX, ce sera un individu femelle, s'il reçoit XY, ce sera un mâle.

Avec la constitution de paires d'homologues, chaque gène se retrouve à présent en double exemplaire, mais on ne trouve pas nécessairement le même allèle sur chaque chromosome. Deux situations peuvent alors se présenter pour chacun des gènes contenus dans la cellule :

* Le même allèle est présent en deux exemplaires : l'individu est homozygote pour le gène considéré.

* Deux formes alléliques différentes sont présentes : l'individu est dit hétérozygote. Le phénotype dépendra alors de lois hiérarchiques existant entre les allèles en présence. Lorsqu'un allèle A1 domine un allèle A2, le génotype (A1//A2) est à l'origine d'un phénotype [A1]. Un allèle dominant peut donc s'exprimer si il est présent à l'état homozygote ou hétérozygote. En revanche, un allèle récessif ne peut s'exprimer que s'il est présent en double exemplaire (homozygote).

Dans d'autres cas enfin, les allèles sont en dominance intermédiaire, ou en codominance et, dans ce cas, le phénotype des hétérozygotes résulte d'une coexpression des deux allèles et est donc intermédiaire entre les phénotypes correspondant aux états homozygotes de chaque allèle. C'est, par exemple le cas dans le déterminisme des groupes sanguins (système ABO) chez l'Homme.

Les trois allèles de ce gène sont A, B et o. A et B dominent o, mais A et B sont codominants l'un pour l'autre.

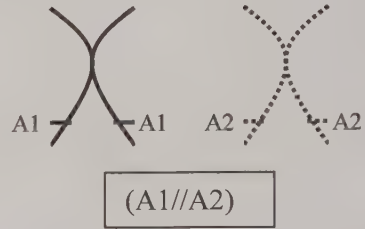
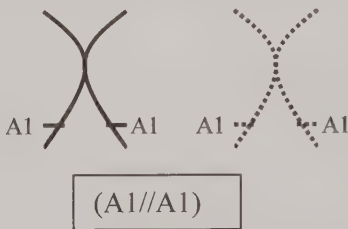
Il existe donc 6 génotypes possibles, et 4 phénotypes :

(A//A) et (A//o) : phénotype (groupe) A

(B//B) et (B//o) : phénotype (groupe) B

(o//o) : phénotype (groupe) O

(A//B) : phénotype (groupe) AB



Représentation chromosomique et notation conventionnelle de deux génotypes : homozygote à gauche, hétérozygote à droite. Du fait de la réplication, les deux chromatides d'un même chromosomes sont normalement identiques.

► Des anomalies lors de la méiose

Certains individus présentent un caryotype et une formule chromosomique anormaux. On parle dans ce cas d'aneuploïdie (euploïdie = formule chromosomique normale).

Dans le cas de l'espèce humaine, la formule chromosomique normale est $2n = 46$ (ce qui signifie qu'il existe $n = 23$ catégories de chromosomes, et que l'on trouve deux chromosomes dans chacune de ces catégories).

Des anomalies méiotiques peuvent conduire à une non-séparation (non-disjonction) de chromosomes homologues. Il en résulte une anomalie de nombre dans les cellules issues de cette méiose anormale.

Parmi les anomalies les plus fréquemment rencontrées, on note la non-disjonction des chromosomes de la paire 21. L'un des gamètes formés contiendra alors deux chromosomes 21, alors qu'un autre gamète n'en contiendra aucun. Si l'on admet que ces gamètes anormaux puissent s'unir avec un gamète normal, on peut donc aboutir, en théorie, à une cellule-œuf présentant une trisomie 21 (syndrome de Down) ou à une cellule-œuf ne contenant qu'un seul chromosome 21 (monosomie 21, non viable dans l'espèce humaine).

Le phénomène peut se décomposer ainsi (ce n'est qu'un exemple) :

Ovule anormal (le risque augmente avec l'âge de la mère et donc de ses ovocytes), ayant reçu, du fait d'une non séparation des chromosomes 21 en première division de méiose : apporte $n + 1 = 24$ chromosomes (2 chromosomes 21).

Spermatozoïde normal : apporte $n = 23$ chromosomes (1 chromosome 21).

Cellule-œuf formée : $2n + 1 = 47$ chromosomes (3 chromosomes 21).

De telles aneuploïdie peuvent également concerner les gonosomes :

$2n + 1 = 47$, XXY = syndrome de Klinefelter

$2n - 1 = 45$, XO (un seul gonosome X) = syndrome de Turner.

Ces anomalies aléatoires de la méiose ont souvent des conséquences catastrophiques, elles peuvent néanmoins avoir un impact évolutif en apportant une innovation (les fraises cultivées sont par exemple nées du passage d'une formule chromosomique de $2n$ à $4n$ chez la fraise sauvage).

MEIOSE, FECONDATION ET BRASSAGE ALLELIQUE

Méiose et fécondation se compensent mutuellement pour assurer le maintien de la formule chromosomique de génération en génération. Cela permet de conserver une grande unité au sein de l'espèce (les individus ayant, en particulier la même formule chromosomique). Cependant, au sein des populations, on constate une grande diversité des individus. En quoi méiose et fécondation participent-elles à cette diversité des individus ?

► Méiose et brassage interchromosomique

La première division méiotique sépare les homologues de chaque paire de manière aléatoire. De ce fait, elle sépare également les allèles portés par ces homologues.

Imaginons un individu homozygote ($A1//A1$), pour un gène A quelconque. Cet individu ne pourra produire qu'un unique type de gamète, contenant obligatoirement l'allèle A1. 100 % de ses gamètes seront (A1).

Si l'individu est hétérozygote ($A1//A2$), il pourra produire deux types de gamètes. On ne saurait en effet trouver dans ses gamètes, qu'un seul allèle du gène, mais, en quantités équiprobables, cela pourra être l'allèle A1 ou l'allèle A2. 50 % des gamètes seront (A1) et 50 % des gamètes seront (A2).

Si maintenant on imagine un individu hétérozygote pour deux gènes ($A1//A2, B1//B2$), il pourra produire 4 ($= 2^2$) types différents de gamètes. En effet, lors de la métaphase I, le chromosome porteur de l'allèle A1 pourra être associé au chromosome porteur de l'allèle B1, mais, avec une égale probabilité, il pourra être associé au chromosome porteur de l'allèle B2. Ces deux dispositions étant équiprobables, les combinaisons alléliques obtenues dans les gamètes seront : 25 % (A1, B1) ; 25 % (A1, B2) ; 25 % (A2, B1) et 25 % (A2, B2).

De manière générale, si l'on considère x gènes, à l'état hétérozygote, tous portés par des paires distinctes de chromosomes, il y aura 2^x types de gamètes formés, chaque type ayant une probabilité d'apparition de $1/(2^x)$.

Un allèle dominant s'exprimant toujours, qu'il soit à l'état homozygote ou à l'état hétérozygote, il est difficile de prévoir, a priori, le génotype d'un individu de phénotype dominant, et donc il est impossible de dire avec certitude combien de types de gamètes il pourra former.

Pour déterminer combien de types différents de gamètes un individu peut former (et donc pour déterminer son génotype), on procède à un croisement-test.

Cela consiste à croiser l'individu testé avec un individu de phénotype récessif, dont on connaît forcément le génotype (il est obligatoirement homozygote récessif). Tous ses gamètes posséderont obligatoirement l'allèle récessif.

Les allèles qui seront apportés dans les gamètes de l'individu testé pourront donc s'exprimer dans la descendance F₂ obtenue. Un exemple théorique permettra de mieux comprendre ce principe :

Premier cas. l'individu testé est homozygote, il possède en double exemplaire l'allèle dominant A (l'allèle récessif sera noté a). Il ne forme qu'une seule catégorie de gamète, contenant tous l'allèle A. L'individu de phénotype récessif utilisé pour le test apportera toujours l'allèle récessif a. Tous les descendants auront donc pour génotype (A/a) et seront de phénotype [A].

Second cas : l'individu testé est hétérozygote, il possède comme génotype (A/a) et peut former deux types équiprobables de gamètes : 50 % (A) et 50 % (a). L'individu de phénotype récessif n'apporte que l'allèle récessif dans ses gamètes. La descendance se composera alors statistiquement de 50 % d'individus (A/a) (donc de phénotype dominant [A]) et de 50 % d'individus (a/a) (donc de phénotype récessif [a]).

Dans tous les cas, la descendance F₂ obtenue sera à l'image des gamètes produits par l'individu testé.

Chez les diplontes, le brassage allélique peut être mis en évidence par des croisements de dihybridisme (c'est-à-dire croisement de deux lignées qui diffèrent pour deux caractères et qui sont pures = homozygotes, pour les caractères considérés). Lorsque les gènes considérés sont indépendants, c'est-à-dire portés par deux paires distinctes de chromosomes les résultats suivants sont obtenus : Parents [A,B] x [a,b]

Première génération (hybrides F₁) : 100 % de phénotype dominant [A,B]

Génération F₂ issue d'un croisement-test : 4 phénotypes équiprobables, 50 % de phénotypes parentaux [A,B] et [a,b] et 50 % de phénotypes recombinés inédits [A,b] et [a,B]. Ces résultats s'expliquent par la disposition aléatoire des homologues en métaphase I.

Génération F₂, issue du croisement de deux F₁ : les résultats sont alors 9/16 [A,B] ; 3/16 [A,b] ; 3/16 [a,B] et 1/16 [a,b].

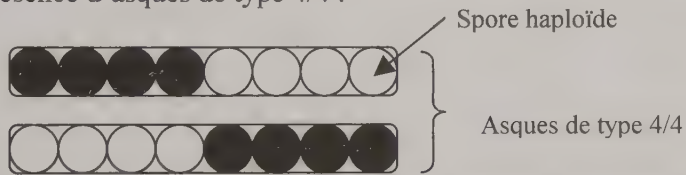
Vérification de la séparation des allèles lors de la méiose : cette vérification peut être faite de manière simple, en travaillant sur des organismes haploïdes tels que *Sordaria macrospora*.

Il s'agit d'un champignon ascomycète se développant sous la forme de filaments mycéliens haploïdes. Des cellules de certains filaments mycéliens peuvent fusionner, il y a fécondation et formation d'un noyau diploïde. Le

retour à l'haplophase fera intervenir une méiose, suivie d'une réplication et d'une mitose supplémentaire. Il y a alors au total huit spores haploïdes qui seront formées. Ces huit spores sont contenues et alignées dans des asques, l'ensemble de ceux-ci étant contenu dans un organe de fructification nommé périthèce.

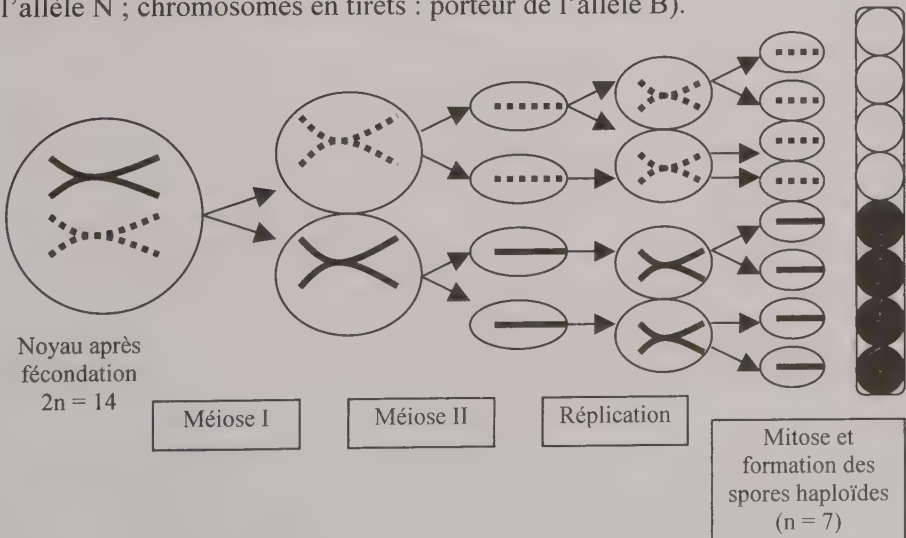
Les ascospores sont haploïdes et, de ce fait, leur phénotype reflète directement leur génotype (pas de problème de dominance ou de récessivité ici). L'emplacement des spores correspondant à celui où les noyaux se sont formés au cours des trois divisions successives, l'analyse de la disposition des spores permet de reconstituer le comportement des chromosomes et des allèles lors de la méiose.

Imaginons un croisement impliquant deux souches parentales, l'une à spores blanches, l'autre à spores noires. Les asques qui résulteront d'un tel croisement posséderont des spores blanches et noires (4 de chaque), mais pouvant présenter des dispositions variées. On constate ainsi, au sein des périthèces, la présence d'asques de type 4/4 :



La disposition de ces spores peut s'expliquer aisément par une séparation des allèles responsables de la couleur noire ou blanche des spores (que l'on notera respectivement N et B) dès la première division méiotique, c'est-à-dire simultanément à la séparation des homologues.

Schématisons un tel comportement (chromosome en trait plein : porteur de l'allèle N ; chromosomes en tirets : porteur de l'allèle B).



Méiose chez Sordaria et formation des asques 4/4

► Méiose et brassage intrachromosomique

Lors d'un croisement chez *Sordaria*, tel que celui évoqué précédemment, on constate qu'outre les asques de type 4/4, il existe quatre autres types d'asques :



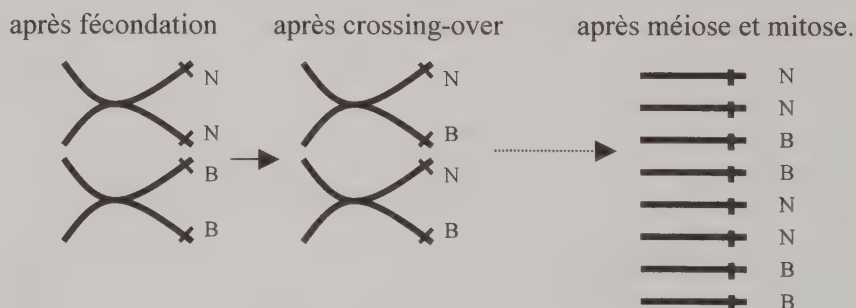
Ces dispositions des spores dans les asques ne peuvent être expliquées par le simple brassage chromosomique lié à la première division méiotique.

Ces dispositions sont le fruit d'un échange d'allèles entre chromatides appartenant à des chromosomes homologues. Ces échanges se produisent lors de phénomènes de crossing-over (enjambements), au niveau de chiasmats (points où deux chromatides s'enchevêtrent), au cours de la prophase de la première division méiotique.



Le phénomène de crossing-over : schéma explicatif simplifié. Les chromatides des deux homologues échangent des segments d'ADN de manière réciproque. Suite au crossing-over (schéma de droite) les chromosomes possèdent des chromatides remaniés.

Imaginons donc les chromosomes chez *Sordaria*,



Ainsi se trouvent expliquée l'une des quatre dispositions précédentes (les autres dispositions s'expliquent de manière analogue).

Le brassage intrachromosomique existe également chez les diplontes, et, à condition de travailler sur des dihybrismes au moins, on peut en observer des conséquences génétiques, à savoir un brassage allélique.

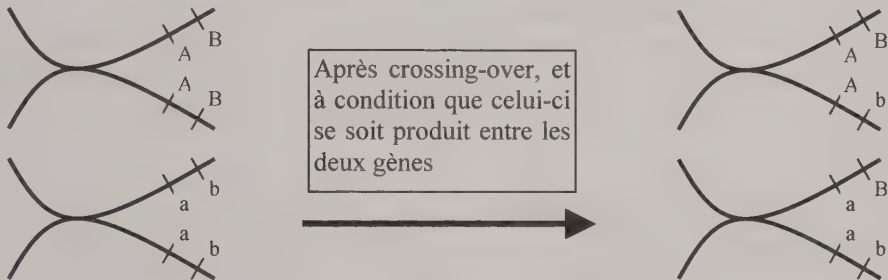
Cela concerne les gènes liés, c'est-à-dire portés par une seule et même paire de chromosomes. On pourrait, a priori, penser que ces gènes sont transmis en bloc.

Imaginons deux parents purs pour les gènes A et B liés. Le premier parent est de génotype (A,B//A,B) et le second (a,b//a,b).

Qu'il y ait ou pas crossing-over chez ces individus, les descendants de première génération auront pour génotype : (A,B//a,b) et l'on pourrait penser que les gamètes qu'ils forment ne sont que de deux types équiprobables : (A,B) et (a,b) puisque les gènes sont liés et que l'on ne voit pas comment A et B d'une part, et a et b d'autre part pourraient se séparer.

Cependant la séparation est possible, ce, grâce au crossing-over.

Les chromosomes des hybrides de F1, à l'entrée en méiose sont :



Les chromosomes sont remaniés, ils possèdent des chromatides qui ne sont plus génétiquement identiques.

La première division méiotique sépare ces deux homologues alors que la seconde division sépare les chromatides. L'individu peut former non pas deux, comme on aurait pu s'y attendre, mais quatre types de gamètes :

(A,B) et (a,b) gamètes de type parental ; (A,b) et (a,B) gamètes contenant des combinaisons inédites d'allèles (type recombiné). Le brassage chromosomique a bien entraîné un brassage allélique, permettant la recombinaison entre gènes liés.

De tels phénomènes sont détectables grâce à un croisement-test, qui permet de connaître les divers types de gamètes que peut former un individu. A l'issue d'un croisement-test de dihybridisme au cours duquel un brassage intrachromosomique est mis en évidence, la génération F₂ résultant du croisement-test comportera quatre phénotypes non équiprobables. En effet, l'hybride testé produira toujours davantage de gamètes parentaux que de gamètes recombinés. De plus, le taux de recombinaison (nombre de recombinés / total) varie selon les gènes considérés, et, plus exactement, selon la distance les séparant. A l'issue d'un croisement-test, plusieurs situations peuvent donc se présenter comme le montre le tableau page suivante.

En résumé, la méiose a deux grandes conséquences :

- Passage à l'haplophase, par réduction chromatique
- Important brassage allélique, entre gènes liés (brassage intrachromosomique) ou non (brassage interchromosomique). Le nombre de types de gamètes qu'un même individu peut former est alors énorme : dans l'espèce humaine, en admettant que sur chaque paire de chromosomes 100 gènes sont présents à l'état hétérozygote, il y a alors (2^{100}) types de gamètes

qui peuvent être formés (2^{23} par le brassage interchromosomique parmi 23 paires de chromosomes et « puissance 100 » pour 100 loci hétérozygotes par paire de chromosomes, pouvant aléatoirement subir le brassage intrachromosomique). Il existe donc, pour un couple donné, plus de descendants théoriques qu'il n'existe d'atomes dans l'univers (la fécondation augmentant encore la diversité puisqu'il y a rencontre aléatoire des gamètes). L'impact de la reproduction sexuée sur la diversité des individus est donc considérable, on parle alors de « loterie de la reproduction », chaque individu étant statistiquement unique et recevant une combinaison inédite unique des allèles que possédaient ses parents.

Nous noterons enfin que la reproduction sexuée brasse les allèles, mais ne crée pas d'allèle nouveau. Ce sont les mutations qui ont ce rôle. Mutations et sexualité sont donc complémentaire dans l'émergence de la diversité au sein des populations.

Résultats du croisement-test	Conclusions
Un seul phénotype	L'individu testé est homozygote
Deux phénotypes équiprobables	Monohybridisme, l'individu testé est hétérozygote
Quatre phénotypes équiprobables (parentaux = recombinés)	Dihybridisme, l'individu testé est hétérozygote et les gènes sont indépendants
Quatre phénotypes non équiprobables (parentaux > recombinés)	Dihybridisme, l'individu testé est hétérozygote et les gènes sont liés

RELATIONS ENTRE MECANISMES DE L'EVOLUTION ET GENETIQUE

Nous avons déjà vu, à l'occasion de la description des familles multigéniques, que les innovations génétiques peuvent enrichir et complexifier le génome au cours de l'histoire de la Vie.

Nous allons ici montrer, à partir d'exemples simples que la diversité allélique liée aux mutations est un important facteur d'évolution.

Une première remarque s'impose : toute innovation génétique n'est pas nécessairement transmise à la descendance. Seules le sont celles qui affectent les cellules de la lignée germinales, ou se retrouvent dans ces cellules.

► Mutations, diversité allélique et sélection naturelle

Du fait de la diversité allélique existant au sein des populations les individus sont très diversifiés et n'ont donc pas tous les mêmes aptitudes. Les individus porteurs d'allèles qui, dans un environnement et des conditions de vie donnés, leur donnent une probabilité plus grande de parvenir à la maturité sexuelle ont une chance d'avoir une descendance plus importante.

Ces allèles avantageux se répandent alors dans la population et peuvent devenir prépondérants en fréquence.

A l'inverse, un individu porteur d'allèles handicapants, dans un contexte précis, ont peu de chances de pouvoir se reproduire et ces allèles ne sont que faiblement représentés (voire éliminés) dans la population.

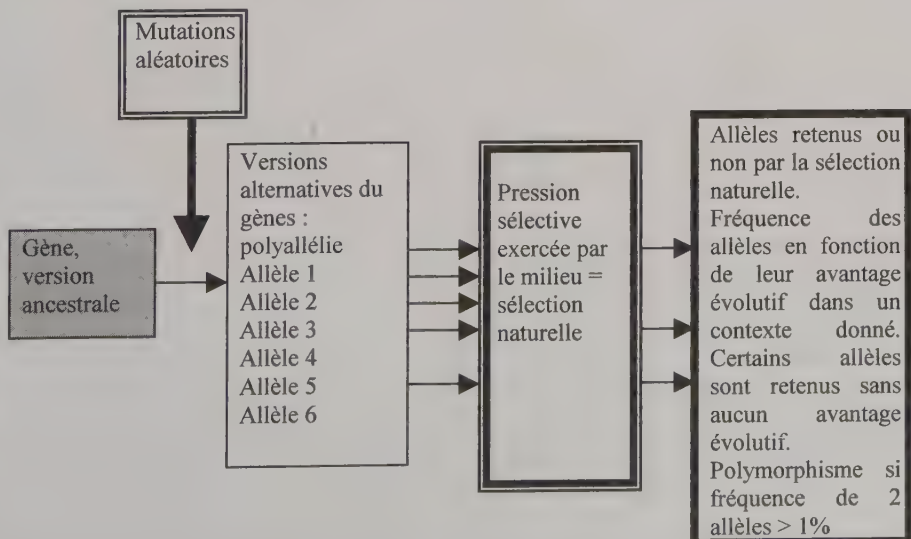
On peut illustrer cette notion à partir de l'exemple du phalène du bouleau. E papillon vit, comme son nom l'indique, sur les troncs de bouleau où il trouve refuge et se camoufle. Il existe deux formes de ce papillon, la forme claire et la forme sombre. Ces deux phénotypes alternatifs sont sous la dépendance de deux allèles (clair et sombre). Il y donc ici, une diversité allélique préalable à l'action de la sélection naturelle. La pression sélective est exercée par la couleur des troncs, plus ou moins sombres selon la région considérée (polluée ou non) et par les prédateurs qui dévorent ces papillons (oiseaux qui chassent à vue).

Sur des troncs clairs, c'est la forme claire du papillon qui est la mieux camouflée et qui échappe donc le mieux aux prédateurs. La fréquence des formes claires (et de l'allèle correspondant) est donc plus élevée en zone non polluée (zone rurale). En revanche, sur des troncs sombres (zone urbaine plus polluée), ce sont les papillons de forme sombre qui sont les mieux camouflés et qui échappent le mieux aux prédateurs. Dans un tel environnement, c'est donc l'allèle sombre qui est avantageux.

Il est important, comme nous le voyons, de ne pas considérer que les qualités intrinsèques d'un allèle, mais d'envisager les avantages (ou désavantages) qu'il peut conférer dans un environnement donné.

Il existe pourtant, dans certains cas où la sélection d'un allèle plutôt qu'un autre n'a rien à voir avec un quelconque avantage sélectif qu'il peut conférer aux individus qui le possèdent. On parle alors de mutation neutre, et la sélection d'un allèle particulier est alors le seul fait du hasard.

Cela peut se schématiser ainsi :



Signalons également que, outre les gènes de structure, les mutations peuvent également affecter des gènes régulateurs du développement (gènes homéotiques en particulier). Une simple mutation peut alors avoir des répercussions considérables en modifiant la durée et la vitesse de développement des individus. On parle alors d'hétérochronies.

La néoténie fait partie de ces phénomènes. Elle correspond à la conservation chez une espèce, de caractères juvéniles de ses ancêtres évolutifs. L'Homme semble ainsi un animal néoténique, un adulte humain ressemble en effet plus à un Chimpanzé juvénile qu'à un Chimpanzé adulte (cela ne signifie bien sûr pas que le Chimpanzé est l'ancêtre de l'Homme, mais que l'Homme a hérité d'un ancêtre commun de ces caractéristiques juvéniles : face plate, trou occipital sous le crâne).

► Énoncés des exercices ◄

■ Exercice 1 (15 min)

Les questions suivantes appellent des réponses très courtes.

1. A quoi peut-on attribuer le fait qu'une mutation puisse être silencieuse ?
2. Au cours de quelle phase de la méiose se produit le brassage intrachromosomique ?
3. Combien de catégories de gamètes génétiquement différents un individu de génotype (A//a, B//B, c//c, D//d) pourra-t-il constituer ?
4. Pourquoi chez *Sordaria*, le phénotype des spores est-il représentatif de leur génotype ?
5. Qu'est-ce qu'un cycle diplophasique ?
6. M. et Mme X ont un doute sur un éventuel échange de leur enfant à la maternité, avec l'enfant de M. et Mme Y. Pour lever ce doute, il font des analyses sanguines et leurs groupes sanguins sont déterminés :
 M. X : (A, Rhésus +, M) ; Mme X : (B, Rhésus +, MN)
 Marine, enfant X : (O, Rhésus -, N)
 M. Y : (A, Rhésus -, MN) ; Mme Y : (O, Rhésus +, N)
 Marin, enfant Y : (O, Rhésus -, M)
 Que diriez-vous à ces parents inquiets ?
 On rappelle :
 Système ABO : trois allèles, A et B dominant o et sont entre eux codominants.
 Système Rhésus : deux allèles : + domine -
 Système MN : deux allèles : M et N sont codominants.

■ Exercice 2..... (30 min)

Le document suivant présente un fragment de séquence d'ADN de lutin, codant pour une protéine métabolique majeure (qui comporte en tout 120 acides aminés. Seule la séquence d'ADN codant pour les six premiers acides aminés est fournie ici).

ACAGGCCCTACGAAAGGT

1. Donnez la séquence polypeptidique correspondant à ce morceau d'ADN.
(en utilisant un tableau de code génétique fourni ci-après).
2. On connaît différentes variantes de ce gène, les séquences correspondant à ces variantes sont :

– Forme 1 : ACAGGACCTACGAAAGGT

– Forme 2 : ACAGGCACTACGAAAGGT

– Forme 3 : ACAGCCCTACGAAAGGT

– Forme 4 : ACCGGCCCTACGAAAGGT.

Comment nomme-t-on les modifications permettant de créer différentes versions d'un même gène ? Quelles sont les modifications intervenues ici ?

Comment nomme-t-on ces différentes variantes du même gène ?

3. Les différentes variantes du gène étudié ont des conséquences variées.
L'une des variantes n'a aucune conséquence phénotypique.
Une autre variante a pour conséquence la synthèse d'une protéine légèrement anormale et donnant lieu à une maladie bénigne.
Une troisième variante a pour conséquence la synthèse d'une protéine totalement anormale, se traduisant par une forme mortelle de la maladie.
Enfin une quatrième variante a pour conséquence la non synthèse de la protéine, ce qui entraîne là encore une forme mortelle de la maladie.
Pouvez-vous associer chacune des formes 1 à 4 du gène avec la conséquence phénotypique qui en résulte ?

		NUCLEOTIDES 2 ^e POSITION					
		U	C	A	G		
NUCLEOTIDES 1 ^{er} POSITION	U	UUU } phényl-	UCU }	UAU } tyrosine	UGU } cystéine	U	NUCLEOTIDES 3 ^e POSITION
		UUC } alanine	UCC } sérine	UAC }	UGC }	C	
		UUA } leucine	UCA }	UAA } non-sens	UGA non-sens	A	
		UUG }	UCG }	UAG }	UGG tryptophane	G	
	C	CUU } leucine	CCU }	CAU } histidine	CGU }	U	
		CUC }	CCC } proline	CAC }	CGC } arginine	C	
		CUA }	CCA }	CAA } glutamine	CGA }	A	
		CUG }	CCG }	CAG }	CGG }	G	
	A	AUU } isoleucine	ACU }	AAU } asparagine	AGU } sérine	U	
		AUC }	ACC } Thréo-	AAC }	AGC }	C	
		AUA } méthionine	ACA } nine	AAA } lysine	AGA } arginine	A	
		AUG }	ACG }	AAG }	AGG }	G	
	G	GUU } valine	GCU }	GAU } acide	GGU }	U	
		GUC }	GCC } alanine	GAC } aspartique	GGC } glycine	C	
		GUA }	GCA }	GAA } acide	GGA }	A	
		GUG }	GCG }	GAG } glutamique	GGG }	G	

A : adénine ; G : guanine ; C : cytosine ; U : uracile.

■ ■ Exercice 3..... (40 min)

Les apports de la paléontologie et de l’embryologie ont permis de tracer la lignée évolutive suivante :

Poissons cartilagineux > Poissons osseux > Amphibiens > Reptiles > Mammifères

L’objectif de cet exercice est de mettre en évidence un des mécanismes participant à cette évolution.

Expliquez, à l’aide des documents suivants et de vos connaissances, comment les hormones présentées ont pu apparaître au cours de l’évolution.

Document 1

L’hypophyse postérieure des vertébrés sécrète diverses hormones peptidiques. Trois d’entre elles ont été recherchées dans différents groupes : (AVT : vasotocine, OT : ocytocine, ADH : hormone antidiurétique).

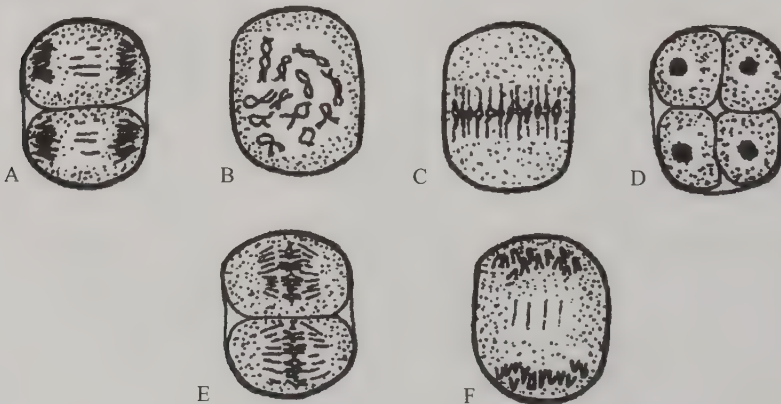
		Hormones
Poissons osseux	A branchies seules	AVT
	A branchies et poumons	AVT, OT
Amphibiens		AVT, OT
Reptiles		AVT, OT
Mammifères		AVT, OT, ADH

Document 2 : La séquence des acides aminés entrant dans la constitution de ces hormones a été établie.

AVT	Cys	Tyr	Ile	Gln	Asp	Cys	Pro	Arg	Gly
OT	Cys	Tyr	Ile	Gln	Asp	Cys	Pro	Leu	Gly
ADH	Cys	Tyr	Phe	Gln	Asp	Cys	Pro	Arg	Gly

■ ■ Exercice 4..... (30 min)

Les images suivantes représentent dans le désordre, diverses phases de la méiose.



La photographie ci-après (chez une espèce différente de celle étudiée dans le document précédent) correspond à la phase B des schémas ci-dessus.



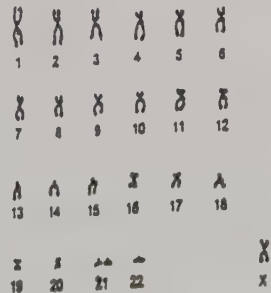
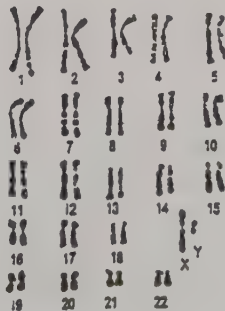
1. Remplacez dans l'ordre chronologique les schémas A à F en les identifiant.
2. Quelle était la formule chromosomique de la cellule initiale dans ces schémas ?
3. Identifiez le phénomène présenté dans le second document.
4. En quoi les schémas B, C, F et la photographie illustrent la notion de brassage de l'information génétique ?

■ Exercice 5..... (25 min)

Le document 1a représente le caryotype d'un sujet atteint d'un syndrome de Down et le document 1b celui d'un individu normal.

1. Donnez deux informations apportées par la comparaison de ces caryotypes. Le document 1c représente le caryotype d'une cellule de la lignée germinale provenant d'un homme à caryotype normal. Cette cellule est identique à celle ayant permis la naissance de l'individu 1a.
2. Après avoir commenté le caryotype du document 1c, que vous replacerez dans la méiose, faites le schéma annoté de l'anaphase de la division à l'origine de cette cellule. Vous ne considérerez que les chromosomes concernés par l'anomalie et les chromosomes sexuels.

(Concours masso-kinésithérapie, Rouen, 99)



■ Exercice 6..... (40 min)

On étudie la transmission théorique chez les diplontes de deux gènes A et B, présents chacun sous deux formes alléliques différentes : A,a et B,b.

On croise deux parents de lignées pures et qui diffèrent pour les deux caractères considérés. La génération F1 obtenue est homogène, tous les individus sont de phénotype [A,B].

1. Qu'en déduisez-vous ?

Un croisement test est effectué sur ces individus de F1.

2. Quel est le phénotype de l'autre individu ayant servi à faire ce croisement-test ?

A l'issue de ce croisement-test théorique, nous envisagerons deux possibilités.

Premier cas :

La génération F'2 issue du croisement-test, présente quatre phénotypes équiprobables : [A,B] ; [A,b] ; [a,B] ; [a,b].

3. Que déduisez-vous de ce résultat ?

4. Quels pouvaient être les génotypes et les phénotypes des parents initiaux (de lignée pure) ?

5. Donnez le génotype des F1, en notation conventionnelle et donnez-en une représentation chromosomique.

Second cas : La génération F'2 issue du croisement-test, présente quatre phénotypes non équiprobables : [A,B] : 20 % ; [A,b] : 30 % ; [a,B] : 30 % ; [a,b] : 20 %.

Mêmes questions que pour le premier cas, numérotées 6 à 8.

■ Exercice 7..... (50 min)

Neurospora est un champignon microscopique haploïde, dont les principales étapes du cycle de développement sont présentées sur le document ci-après. On connaît chez ce champignon deux souches qui se distinguent par leur capacité à croître sur un milieu « minimum » sans méthionine (un acide aminé).

- La souche sauvage [M+] peut se développer en l'absence de méthionine
- La souche mutée [M–] a besoin de méthionine pour se développer.

On admet que ce phénotype est déterminé par l'expression d'un couple d'allèles, notés M+ et M–.

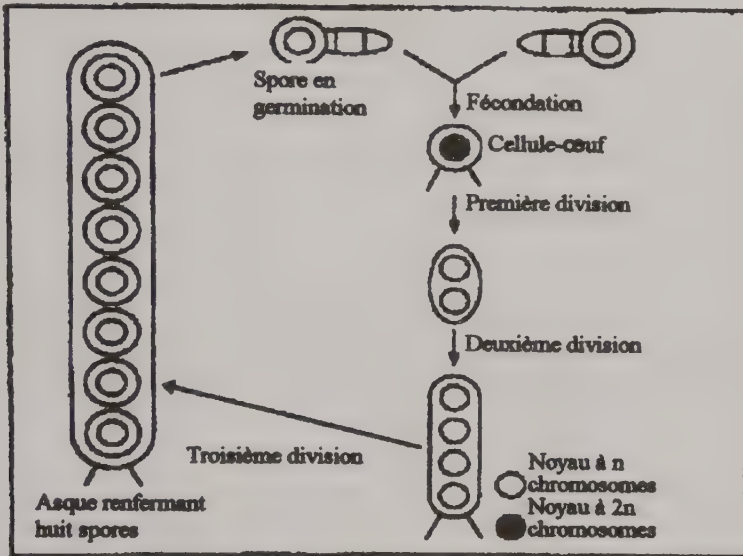
On croise une souche [M+] avec une souche [M–]. Les spores obtenues, en place dans les asques sont cultivées sur milieu minimum, sans méthionine. Le résultat, observable après quelques heures est schématisé sur le document 2 ci-après.

1. Le cycle de *Neurospora* est-il haplophasique ou diplophasique ? Justifiez brièvement.
2. Expliquez l'aspect des asques obtenus. Tous les types d'asques auxquels on peut s'attendre sont-ils représentés ?

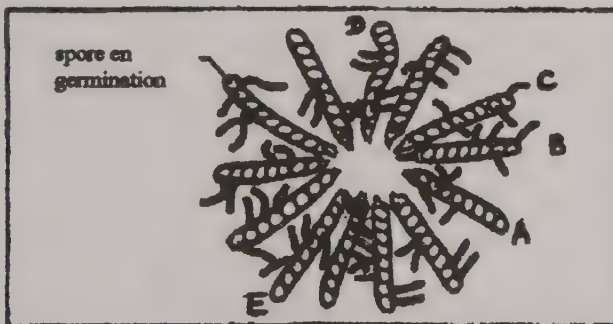
3. Expliquez la survenue des asques de type A et B.
4. Expliquez la survenue des asques de type C, D et E.

(Inspiré d'une question QCM de concours masso-kinésithérapie, Poitiers, 2000)

Document 1 : représentation simplifiée du cycle de développement de *Neurospora*.



Document 2 : résultat de la culture *Neurospora* sur milieu minimum sans (méthionine).



■ Exercice 8..... (20 min)

On entend de plus en plus dire que les antibiotiques ont de moins en moins d'effet et que les bactéries sont de plus en plus résistantes. A l'aide de vos connaissances sur les innovations génétiques et la sélection naturelle, apportez une courte explication à ce phénomène.

.....■ CONTROLES ■.....

Exercice 1 (100 min ; 10 pts) type I

La reproduction sexuée est « une machine à faire du différent ».

Vous justifierez cette affirmation en considérant le brassage allélique induit par la méiose. Vous considérerez pour cela trois gènes A, B et C, situés sur deux paires de chromosomes.

Exercice 2 (40 min ; 4 pts) type II1

Le document suivant concerne la transmission de caractéristiques du pelage chez la souris.

Question : A partir de conclusions tirées de l'étude de ce document, montrez :

1. Que les résultats obtenus ne peuvent s'interpréter si les caractéristiques du pelage sont gouvernées par un seul gène.
2. Quels sont les rapports de dominance entre les allèles considérés.
3. Quelle est la localisation relative des gènes considérés.

Document :

On étudie la transmission des gènes piebald (p) et hairless (h) qui gouvernent respectivement la couleur et la chute des poils chez la souris.

On croise deux souris de race pure, l'une au pelage de couleur grise uniforme dont les poils commencent à tomber lorsque l'animal est âgé de deux semaines, et l'autre au pelage tacheté de blanc, sans chute de poils.

On obtient des hybrides F1 au pelage uniforme sans chute de poils.

Dans un deuxième croisement, on croise une souris F1 avec un individu de race pure au pelage tacheté dont les poils tombent.

On obtient : 88 souris à pelage tacheté sans chute de poils, 8 souris à pelage uniforme sans chute de poils, 10 souris à pelage tacheté avec chute des poils, 77 souris à pelage uniforme avec chute des poils.

Exercice 3 (60 min ; 6 pts) type II2

Les documents 1 à 2 concernent des croisements de dihybridisme chez la drosophile. Le document 3 est une photographie d'une phase de la méiose.

Question : En utilisant ces documents, proposez une localisation des gènes étudiés. Votre étude se conclura par un schéma inspiré du document 3, sur lequel vous schématiserez les gènes considérés, de manière pertinente, afin de rendre compte des résultats obtenus.

Document 1 : Premier croisement : on croise deux parents purs pour deux caractères (longueur des ailes et couleur du corps).

Parent 1 : ailes longues, corps gris.

Parent 2 : ailes vestigiales, corps ébène.

La F1 obtenue comporte 100 % d'individus à ailes longues et corps gris.

Un croisement-test entre un individu de F1 et un individu à ailes vestigiales et corps ébène donne les résultats suivants :

103 individus ailes longues, corps gris ; 97 ailes vestigiales, corps ébène
98 ailes longues, corps ébène ; 101 ailes vestigiales, corps gris.

Document 2 : Second croisement : on croise deux parents purs pour deux caractères (longueur des ailes et couleur des yeux).

Parent 1 : ailes longues, yeux rouges.

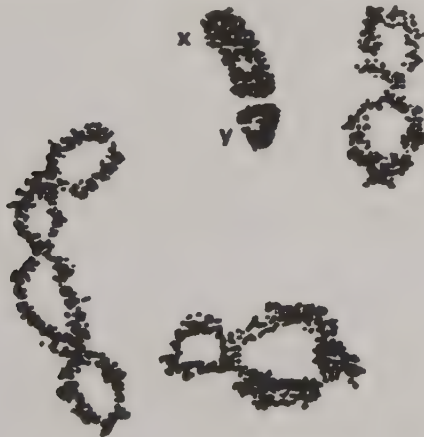
Parent 2 : ailes vestigiales, yeux marrons.

La F1 obtenue comporte 100 % d'individus à ailes longues et yeux rouges.

Un croisement entre un individu de F1 et un individu à ailes vestigiales et yeux marrons donne les résultats suivants :

402 individus ailes longues, yeux rouges ; 398 ailes vestigiales, yeux marrons ; 102 ailes vestigiales, yeux rouges ; 95 ailes longues, yeux marrons.

Document 3 : Photographie d'une phase de la méiose



► Corrigé des exercices ▼

Corrigé 1

1. C'est la redondance du code génétique qui fait qu'une mutation puisse être silencieuse. Un triplet d'ADN peut subir une modification qui entraîne l'apparition d'un autre triplet, ayant la même signification.

2. Le brassage intrachromosomique, lié à l'existence de crossing-over, se produit en prophase de première division méiotique.

3. On ne tient compte que des loci à l'état hétérozygote, il y en a 2 ici. l'individu peut former $2^2 = 4$ types génétiquement différentes de gamètes : (A,B,c,D) ; (A,B,c,d) ; (a,B,c,D) et (a,B,c,d).

4. Parce que les spores sont haploïdes, elles ne peuvent contenir qu'un seul allèle de chaque gène et le phénotype est donc le reflet de l'expression de cet unique allèle.

5. Un cycle diplophasique est un cycle de reproduction (alternance diplophase / haplophase marquée par la succession méiose / fécondation) dans lequel la phase diploïde est prédominante.

6. Compte tenu des lois de dominance énoncées, l'enfant de M. et Mme X peut très bien être O, Rhésus-, alors que ses parents ne le sont pas. Il suffit pour cela que les parents aient un génotype hétérozygote : (A//o,+//-) pour le père et (B//o,+//-) pour la mère. En revanche, il est impossible à ces deux parents (M//M) et (M//N) d'avoir un enfant de groupe N. Il ne peut être que M ou MN. L'enfant supposé de M. et Mme X ne peut donc pas être leur enfant.

Concernant la famille Y, leur enfant peut également être (O, Rhésus +), mais il ne peut pas être de groupe N. Il ne peut être que N ou MN.

Il est donc impossible que cet enfant soit celui de M. et Mme Y et un échange d'enfant a effectivement dû se produire.

Corrigé 2

1. Pour déterminer quelle séquence polypeptidique est codée par ce fragment de gène, il faut le transcrire (complémentarité des bases azotées) et traduire l'ARNm correspondant (code génétique).

ADN : ACAGGCCCTACGAAAGGT

ARNm : UGUCCGGAUGCUUUGCA

Polypeptide : Cys-Pro-Gly-Cys-Phé-Pro

2. Les modifications permettant de former différentes versions d'un gène sont les mutations (rares, aléatoires, spontanées). Ces différentes versions du gène sont des allèles.

Les modifications qui se sont produites :

Forme 1 : ACAGGACCTACGAAAGGT

Substitution (en italique)

Forme 2 : ACAGGCACTACGAAAGGT

Substitution (en italique)

Forme 3 : ACAGCCCTACGAAAGGT

Délétion du quatrième ou du cinquième nucléotide et décalage du cadre de lecture

Forme 4 : ACCGGCCCTACGAAAGGT

Substitution (en italique)

3. Voyons quelles peuvent être les conséquences phénotypiques de ces mutations. Pour cela, nous allons nous intéresser aux conséquences de ces mutations sur la séquence peptidique.

Forme 1 : ADN : ACAGGACCTACGAAAGGT

ARNm : UGUCCUGGAUGCUUUCCA

Polypeptide : Cys-Pro-Gly-Cys-Phé-Pro

Du fait de la redondance du code, la mutation est silencieuse, c'est donc cette forme qui n'a aucune répercussion phénotypique.

Forme 2 : ADN : ACAGGCACTACGAAAGGT

ARNm : UGUCCGUGAUGCUUUCCA

Polypeptide : Cys-Pro

Du fait de l'apparition d'un codon stop, la synthèse cesse après le deuxième acide aminé, autrement dit, il n'y a pas de protéine fabriquée. La forme 2 est responsable d'une forme mortelle de maladie, sans protéine fabriquée.

Forme 3 : ADN : ACAGCCCTACGAAAGGT

ARNm : UGUCGGGAUGCUUUCCA

Polypeptide : Cys-Arg-Asp-Ala-Phé-...

Le décalage du cadre de lecture affecte gravement la protéine fabriquée. Cette forme 3 est responsable d'une maladie mortelle, mais une protéine anormale est néanmoins fabriquée.

Forme 4 : ADN : ACCGGCCCTACGAAAGGT

ARNm : UGGCCGGAUGCUUUCCA

Polypeptide : Trp-Pro-Gly-Cys-Phé-Pro

Une protéine anormale est fabriquée, mais la différence avec la protéine normale ne tient qu'à un acide aminé unique. Cette forme 4 peut être responsable d'une maladie bénigne.

Corrigé 3

On constate des ressemblances (doc. 2) entre ces hormones, qui ont manifestement une origine commune. Leur coexistence chez divers vertébrés indique qu'elles sont codées par des gènes distincts. Il s'agit d'une famille multigénique, formée par suite de duplications et de mutations d'un gène ancestral.

Si l'on compare dans le détail la structure de ces hormones, on peut compter les différences entre elles, qui résultent de l'accumulation de mutations au cours des temps, depuis la duplication du gène.

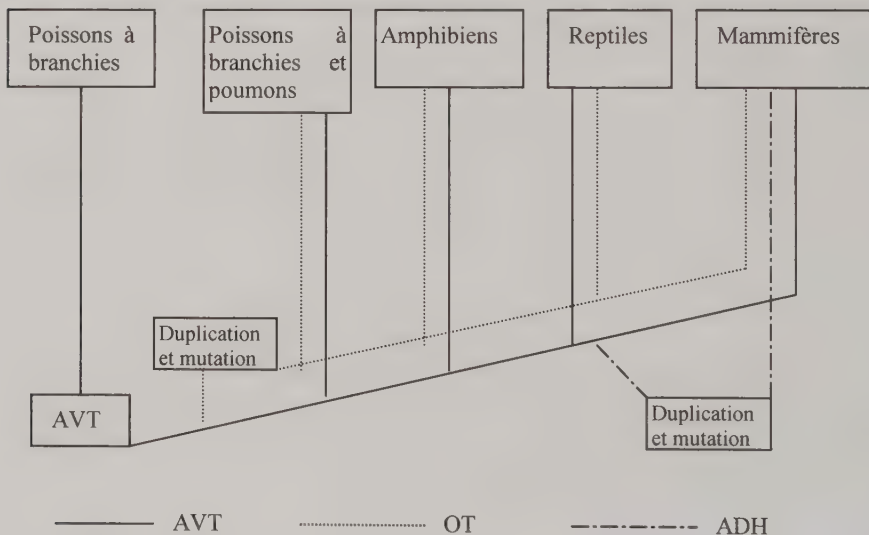
Acides aminés différents	AVT	OT	ADH
AVT	0		
OT	1	0	
ADH	1	2	0

Si l'on applique le principe de parcimonie (solution la moins « coûteuse » en termes de modifications envisagées), le plus simple est d'imaginer :

* Une duplication du gène de l'AVT, puis une mutation permettant la formation de l'OT.

* Une nouvelle duplication du gène de l'AVT, suivie d'une mutation permettant la formation de l'ADH.

Il y a donc, au cours du temps, enrichissement et complexification du génome, grâce à des mécanismes aléatoires de duplication (nous ne pouvons savoir ici s'il y a eu translocation) et mutation. De nouveaux gènes apparaissent, pouvant être à l'origine de nouvelles fonctions physiologiques. L'histoire de cette famille multigénique peut être résumée comme suit :



Corrigé 4

1. Les différentes phases de la méiose sont, dans l'ordre :

B : prophase I, les chromosomes sont réunis en bivalents

C : métaphase I, les bivalents sont alignés sur le plan équatorial

F : anaphase I, séparation des homologues de chaque paire

E : métaphase II, les chromosomes (les cellules sont désormais haploïdes) sont alignés sur le plan équatorial

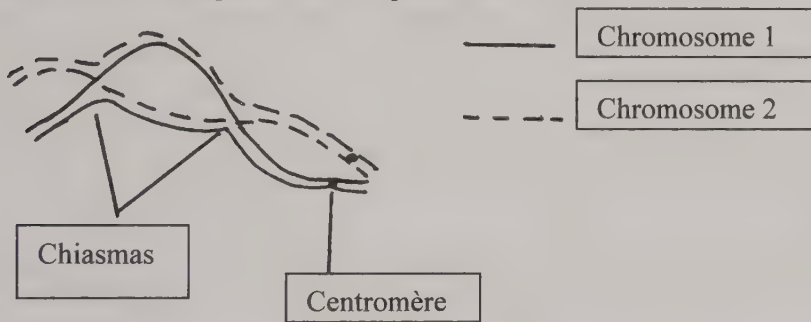
A : anaphase II, séparation des chromatides de chaque chromosome

D : fin de la télophase II, obtention de quatre cellules haploïdes.

2. En B, nous avons identifié une prophase I. Nous voyons 12 éléments dans la cellule qui est encore diploïde. Ces 12 éléments sont des bivalents, c'est-à-dire qu'il y a $12 \times 2 = 24$ chromosomes. La formule chromosomique initiale est donc $2n = 24$.

3. La photographie proposée correspond à une prophase I de méiose. On peut compter 6 bivalents, c'est-à-dire 6 groupes de 2 chromosomes homologues appariés. Au sein de ces bivalents se produisent des phénomènes de crossing-over, c'est-à-dire d'échanges réciproques de segments homologues de chromosomes.

Une représentation schématisée du bivalent situé en haut de la photographie peut aider à la compréhension du phénomène :



Crossing-over et échange de matériel génétique

4. Le schéma B du premier document et la photographie correspondent à une prophase I. C'est au cours de cette phase que se produisent les crossing-over, c'est-à-dire un brassage intrachromosomique, qui explique la recombinaison existant entre gènes liés.

Les schémas C et F mettent en évidence le brassage interchromosomique qui s'effectue par séparation aléatoire des homologues de chaque paire, un grand nombre de combinaisons d'associations chromosomiques existant. Cela explique la recombinaison génétique existant entre gènes non liés.

L'ensemble conduit à la constitution de combinaisons originales d'allèles d'où une innovation génétique qui participe à la diversité des individus au sein des populations.

Corrigé 5

1. Comparaison des caryotypes 1a et 1b : L'observation du caryotype 1b (sujet normal servant de référence) montre qu'il y a euploïdie, c'est-à-dire que nous sommes en présence d'une formule chromosomique normale, avec $2n = 46$ chromosomes. Les chromosomes sexuels sont ici X et Y, le sujet est de sexe masculin, sa formule chromosomique détaillée est $2n = 46, XY$.

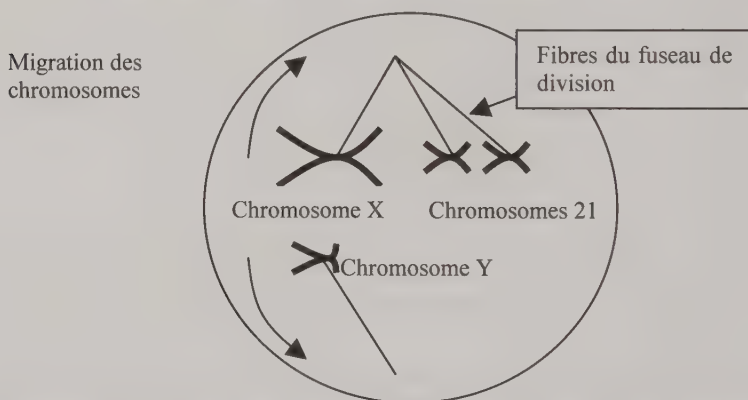
En revanche, le caryotype 1a présente une aneuploïdie, c'est-à-dire une anomalie de formule chromosomique. Il y a un chromosome surnuméraire

($2n + 1 = 47$). L'anomalie tient au fait qu'il existe un chromosome 21 en trop : il y a une trisomie 21.

Les chromosomes sexuels sont XX et l'individu est de sexe féminin.

2. Le caryotype du document 1c montre des chromosomes bichromatidiens, non réunis par paire (à l'exception des chromosomes 21, mais c'est là une situation anormale, à l'origine du syndrome de Down dont souffre l'individu dont le caryotype est 1a). Il n'y a qu'un chromosome sexuel : le chromosome X (le chromosome Y a été séparé avec les autres chromosomes des paires 1 à 20 et 22). Ce caryotype provient d'une cellule germinale mâle, ayant subi la première division méiotique (formule chromosomique : $n + 1 = 24$) mais pas encore la seconde. Si un tel gamète féconde un ovule normal, il y aura trois chromosomes 21 dans la cellule-œuf.

Cette cellule germinale anormale provient d'une erreur de séparation des chromosomes 21 lors de l'anaphase de première division méiotique. Les deux chromosomes 21 ont migré ensemble et se sont retrouvés dans la même cellule à l'issue de la première division méiotique.



Anaphase I de méiose donnant naissance à des cellules anormales

Corrigé 6

1. Les individus de la F1, issus du croisement de deux parents purs, sont nécessairement hétérozygotes pour les gènes considérés (si le premier parent apporte l'allèle A, alors l'autre qui diffère pour ce gène apporte obligatoirement l'allèle a, même remarque pour B et b).

Or sur les allèles présents (A et a, B et b) seuls A et B s'expriment, ils dominent donc a et b respectivement.

2. Un croisement-test consiste à croiser un individu dont on cherche le génotype (ici un F1), avec un individu de phénotype récessif (ici double récessif puisque nous étudions la transmission de deux caractères). Cet individu a donc pour phénotype [a,b] et il ne peut apporter dans ses gamètes que les allèles a et b.

Premier cas.

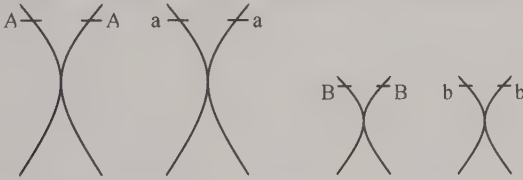
3. La descendance F₂ du croisement-test comporte quatre phénotypes équiprobables. L'individu de F₁ testé forme donc quatre catégories équiprobables de gamètes (d'après le principe du croisement-test, la descendance F₂ est à l'image des gamètes de l'individu testé) qui sont (A,B) ; (a,b) ; (A,b) ; (a,B). Les allèles se sont donc séparés aléatoirement au cours de la méiose, la séparation de A et a s'est faite indépendamment de la séparation de B et b. Les gènes sont donc indépendants, c'est-à-dire portés par deux paires distinctes de chromosomes.

4. On ne peut pas savoir avec certitude ici les génotypes et phénotypes des parents purs. Ils peuvent, dans cet exemple, être : (A//A,B//B) pour l'un et (a//a,b//b) pour l'autre, ou bien être (A//A,b//b) pour l'un et (a//a,B//B) pour l'autre. Autrement dit leurs phénotypes peuvent être [A,B] et [a,b] ou bien [A,b] et [a,B].

Leurs génotypes sont notés avec deux doubles traits de fraction, puisqu'il y a ici deux paires de chromosomes.

5. Individu de F₁, on peut écrire son génotype : (A//a, B//b).

La représentation chromosomique correspondante est alors :



N'hésitez pas à faire des chromosomes manifestement différents en taille, pour qu'il n'existe aucune ambiguïté.

Second cas :

6. La descendance du croisement-test comporte quatre phénotypes non équiprobables. L'individu de F₁ forme donc quatre catégories de gamètes non équiprobables. Les gènes sont liés, c'est-à-dire portés par une seule et même paire de chromosomes. Il y a davantage de gamètes contenant des combinaisons parentales d'allèles que de gamètes contenant des combinaisons nouvelles. Ces dernières existent néanmoins et s'expliquent par un brassage intrachromosomique, autrement dit par un phénomène de crossing-over.

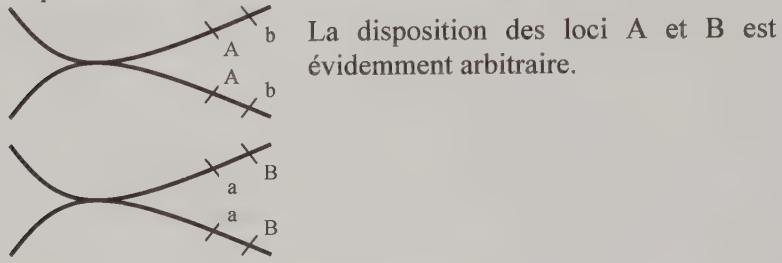
7. Cette fois les génotypes et phénotypes des parents peuvent être identifiés. En effet, l'individu de F₁ forme, comme nous venons de le dire précédemment, plus de gamètes de type parental que de gamètes de type recombiné. Or les gamètes les plus abondants ici (60 % du total) sont (A,b) et (a,B). Les phénotypes parentaux sont donc [A,b] et [a,B] et les génotypes correspondants sont (A,b//A,b) et (a,B//a,B).

Un seul double trait de fraction ici puisqu'il n'y a qu'une seule paire de chromosomes.

8. Le F1 a reçu une combinaison allélique (A,b) sur un seul chromosome, de la part d'un de ses parents, et une combinaison (a,B) de l'autre parent.

Son génotype s'écrit donc : (A,b//a,B).

La représentation chromosomique est alors la suivante :

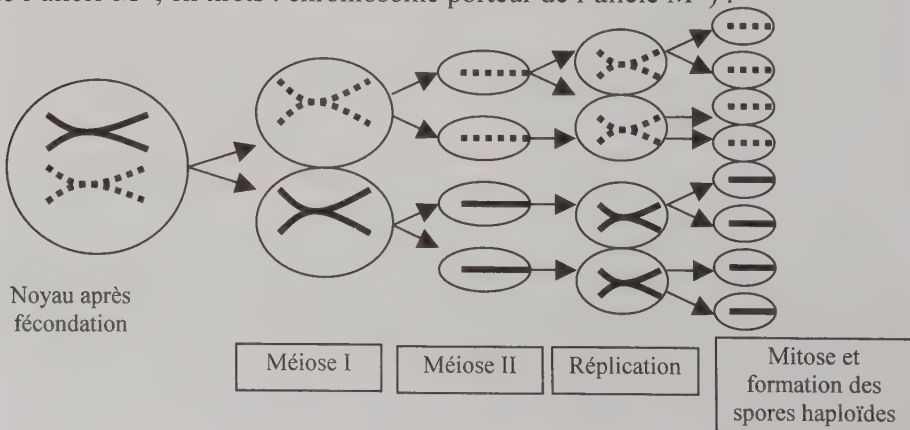


Corrigé 7

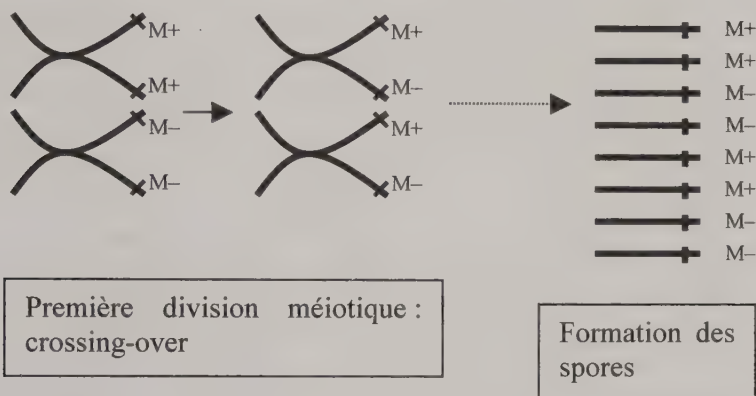
1. Les asques obtenus contiennent tous 8 spores haploïdes, issus des deux divisions méiotiques et de la mitose supplémentaire. Les spores étant haploïdes, leur phénotype révèle directement leur génotype. Dans ces asques, issus d'un croisement [M+] x [M-], on constate qu'il se trouve systématiquement 4 spores ayant germé en absence de méthionine spores [M+] et 4 spores n'ayant pas germé en absence de méthionine (spores [M-]). Il existe plusieurs dispositions des spores dans les asques : asques 4/4 (A et B) et asques non 4/4 (C,D,E).

2. En théorie, on pouvait s'attendre à trouver six dispositions des spores dans les asques et il n'y en a ici que cinq (mais l'effectif est faible). Il manque des asques de type (2+, 4-, 2+), l'asque E étant de type (2-, 4+, 2-).

3. La disposition 4/4 dans les asques A et B indique que les allèles M+ et M- se sont séparés dès la première division de méiose. La formation de ces asques pouvant alors s'expliquer ainsi (en trait plein : chromosome porteur de l'allèle M+, en tirets : chromosome porteur de l'allèle M-) :



4. La disposition différente de 4/4 dans les asques C, D et E indique que les allèles M^+ et M^- ne se sont séparés qu'à l'issue de la seconde division méiotique. Il s'est produit un brassage intrachromosomique, par crossing-over, ce qui a permis l'apparition de chromosomes recombinés. La formation de l'asque C peut alors se schématiser :



Corrigé 8

Contrairement à une idée reçue, les bactéries ne s'adaptent pas à l'antibiotique en y étant confrontées. En revanche, certaines d'entre elles, par le jeu du hasard des mutations, possèdent une résistance naturelle à un antibiotique. Il s'agit alors d'un caractère avantageux qui leur permet, si elles sont en contact avec cet antibiotique, d'y résister. Ne survivent alors que les bactéries porteuses de ces facteurs de résistance, les autres disparaissant. A la génération suivante, il y a donc majoritairement des bactéries résistantes au sein de la population considérée. Ces dernières ont franchi avec succès, le passage par la sélection naturelle (la pression sélective étant ici assurée par l'antibiotique).

.....■. CORRIGE DES CONTROLES ■.....

Exercice 1

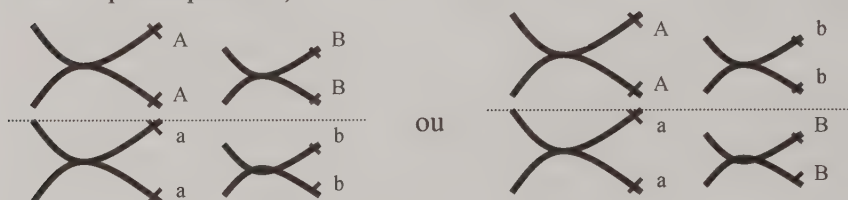
Il ne s'agit pas ici de décrire en détail la méiose ou la reproduction sexuée, mais de montrer en quoi la méiose est responsable d'un double brassage allélique. Nous devons considérer trois gènes sur deux chromosomes, deux de ces gènes sont donc liés. De plus, il est indispensable pour la démonstration de les considérer tous trois à l'état hétérozygote.

Proposition de plan :

Contrairement à la reproduction conforme, qui engendre une grande monotonie génétique (aux mutations près), la reproduction biparentale induit une grande diversité parmi les individus au sein des populations. La méiose

s'accompagne en particulier d'un double brassage allélique que nous allons décrire : brassage interchromosomique, pour lequel nous considérerons deux gènes A et B localisés sur des paires distinctes de chromosomes et brassage intrachromosomique, pour lequel nous considérerons deux gènes A et C liés. I) Le brassage interchromosomique résulte d'une disposition aléatoire des chromosomes en méiose I

En division réductionnelle de méiose, il se produit une séparation des homologues de chaque paire. Si l'on considère deux gènes A et B non liés à l'état hétérozygote, il existe deux dispositions possibles pour les chromosomes concernés au sein du fuseau de division en métaphase I (en tirets : plan équatorial) :



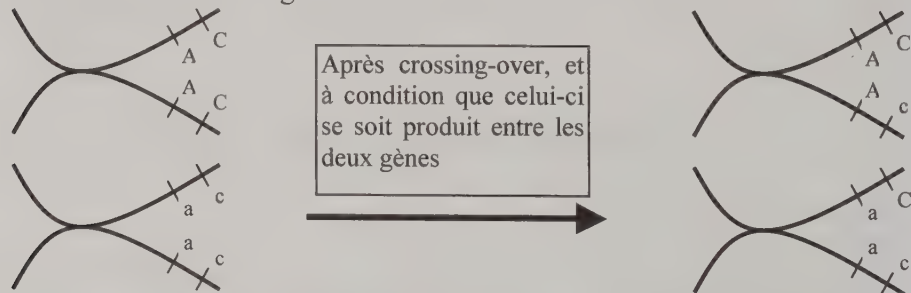
Il en résulte la formation de quatre types équiprobables de gamètes : (A,B), (A,b), (a,b) et (a,B). De manière générale, pour x paires de chromosomes il existe 2^x combinaisons possibles.

II) Le brassage intrachromosomique résulte de recombinaisons au sein des chromosomes

Ce brassage résulte de crossing-over se déroulant en prophase I. Il s'agit d'échanges de segments de chromatides entre les homologues. Cela explique la recombinaison entre gènes liés.



Si l'on considère deux gènes liés A et C :



Il y a formation de quatre types non équiprobables de gamètes (le taux de recombinaison dépendant de la distance entre les gènes) : (A,C), (A,c), (a,C), (a,c).

La méiose s'accompagne d'un brassage allélique. Si l'on tient simultanément compte des trois gènes, il y a formation possible de huit types de gamètes (A,B,C), (A,B,c), (A,b,C), etc.

Pour l'ensemble des gènes humains, on admet qu'il y a possibilité de former 2^{2300} types différents de gamètes.

La fécondation est, elle aussi, aléatoire et elle augmente encore la diversité des combinaisons possibles, participant de manière importante à la diversité des individus au sein des populations. Cette diversité des individus a une grande importance évolutive, puisque c'est sur elle que portera la sélection naturelle.

Exercice 2

1. Si nous avons affaire à un déterminisme monogénique (un seul gène impliqué), les caractères « couleur » et « chute » resteraient associés chez les descendants comme ils le sont chez les parents. De plus, le résultat du second croisement présenté (croisement-test) ne correspond pas à un monohybridisme, mais à un dihybridisme.
2. Les F1 étant issus de parents purs, ils sont hétérozygotes pour les deux gènes. Seuls les allèles « uniforme » et « sans chute » s'expriment, ce sont les allèles dominants (vis-à-vis de « tacheté » et « chute »).
3. Le second croisement présenté est un croisement-test. Il permet de connaître le nombre de types de gamètes que l'individu de F1 peut former, ici quatre, non équiprobables. Les gènes sont donc liés, les combinaisons parentales étant transmises en plus grand nombre que les combinaisons nouvelles. Les deux gènes considérés sont donc portés par une seule et même paire de chromosomes.

Exercice 3

Analysons les documents proposés :

Document 1 : la F1, issue du croisement de deux parents purs, nous permet d'affirmer que les allèles « ailes longues » et « corps gris » sont dominants sur respectivement « ailes vestigiales » et « corps ébène ».

La descendance issue du croisement-test comporte quatre phénotypes équiprobables et il y a autant de combinaisons parentales (ailes longues, corps gris et ailes vestigiales, corps ébène) que de combinaisons nouvelles. Les gènes sont indépendants, c'est-à-dire portés par deux paires distinctes de chromosomes. La séparation des deux allèles d'un gène se fait indépendamment de la séparation des allèles de l'autre gène.

Document 2 : la F1, issue du croisement de deux parents purs, nous permet d'affirmer que les allèles « ailes longues » et « yeux rouges » sont dominants sur respectivement « ailes vestigiales » et « yeux marrons ». Le second croisement proposé est un croisement-test (F1 x double récessif).

La descendance issue du croisement-test comporte quatre phénotypes non équiprobables et il y a davantage de combinaisons parentales (ailes longues, yeux rouges et ailes vestigiales, yeux marrons) que de combinaisons nouvelles. Les gènes sont liés, c'est-à-dire portés par une seule paire de chromosomes. La recombinaison génétique observée s'explique par des phénomènes de crossing-over tels que nous pouvons en observer sur le document 3, qui représente des bivalents en prophase de première division

méiotique. A leur niveau se produisent des échanges de segments de chromatides qui expliquent cette recombinaison.

Document 3 : comme indiqué précédemment, il s'agit d'une prophase de première division méiotique, on peut y observer 4 bivalents (c'est-à-dire 8 chromosomes appariés) et des crossing-over se produisent.

En résumé, nous avons étudié ici trois gènes, localisés sur deux paires de chromosomes (ce qui nous ramène à l'exercice de type I traité auparavant).

En s'inspirant du document 3, nous pouvons proposer une localisation de ces gènes qui permet de rendre compte des résultats obtenus : deux gènes (longueur des ailes et couleur des yeux) sur une même paire de chromosomes, avec un chiasma entre eux, pour faire apparaître la recombinaison. Le troisième gène (couleur du corps) se trouve sur une autre paire de chromosomes.

En reprenant schématiquement l'aspect de deux des bivalents présentés dans le document 3 :

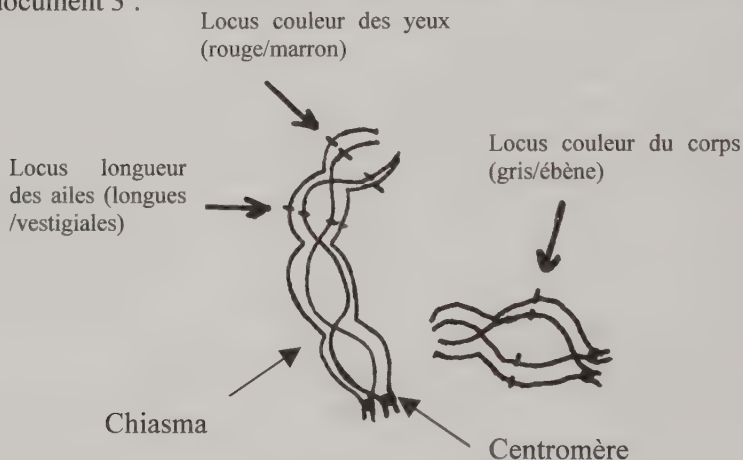


Schéma représentant trois gènes sur deux bivalents en prophase I

Remarque : la photographie présentée n'est pas celle de chromosomes de drosophiles (la formule chromosomique est la même, mais la ressemblance s'arrête là), mais cela n'a aucune répercussion sur le raisonnement à mener dans cet exercice.

Immunologie

Les diverses fonctions physiologiques (reproduction, maintien de la glycémie,...) sont soumises à des régulations de manière à pouvoir s'adapter aux variations de l'environnement (dans des limites raisonnables). De cette manière est assurée l'intégrité fonctionnelle de l'organisme. Nous allons voir dans ce chapitre que l'organisme peut également réagir à des attaques d'éléments potentiellement pathogènes. Il dispose en effet d'un système de défense que vous avez déjà abordé au collège : le système immunitaire, qui permet à l'organisme de conserver une certaine stabilité en dépit de la diversité des éléments extérieurs auxquels il peut être confronté.

Nous commencerons par l'étude d'une maladie qui touche ce système : le SIDA, puis nous verrons son fonctionnement un peu plus en détail.

LE SIDA : UNE ATTAQUE DU SYSTEME IMMUNITAIRE PAR UN VIRUS

► Caractéristiques générales du SIDA

Le SIDA est le Syndrome d'ImmunoDéficiency Acquis. Comme son nom l'indique, il s'agit d'une déficience de fonctionnement du système immunitaire, acquise au cours de la vie de l'individu alors que ce système fonctionnait de manière satisfaisante auparavant (par opposition à une immunodéficiency innée, pour laquelle le système immunitaire n'a jamais fonctionné).

C'est une maladie virale (causée par le VIH = Virus de l'Immunodéficiency Humaine), qui touche environ 40 millions de personnes dans le monde, dont 70 % en Afrique sub-saharienne et 15 % en Asie.

En 2001, on estime qu'environ 5 millions de personnes ont été contaminées et que 3 millions de personnes sont mortes de cette maladie.

► Les modes de transmission du SIDA

Il existe trois grands modes de transmission :

- Par voie sexuelle, homo ou hétérosexuelle, le SIDA est une MST (Maladie Sexuellement Transmissible). La multiplicité des partenaires sans prise de précaution (préservatif) représente le risque le plus grand de transmission. Ce mode de transmission représente environ 70 à 80 % des cas.
- Par voie sanguine (transfusions, échanges de seringues entre toxicomanes) reste un risque non négligeable, bien que les précautions prises lors des dons de sang (dépistage) aient considérablement ce risque.

– Transmission de mère à enfant : au cours de la vie fœtale et plus encore, au cours de l'accouchement, des échanges sanguins entre mère et fœtus se produisent, pouvant alors contaminer l'enfant. Cependant, un enfant peut être dépisté comme séropositif à la naissance alors qu'il n'est pas contaminé (ce sont dans ce cas, uniquement des anticorps maternels qui sont passés de la mère à l'enfant et non le virus lui-même).

▶ Le VIH agent de transmission du SIDA

L'agent responsable du SIDA, le VIH est un rétrovirus, c'est-à-dire un virus à ARN. Comme tous les virus, il possède une structure très simple, est dépourvu d'organites pouvant assurer son autonomie (ribosomes, enzymes métaboliques...) et il est donc un parasite obligatoire. Cela signifie qu'il doit obligatoirement parasiter une cellule vivante pour pouvoir se reproduire, en détournant à son profit la machinerie de la cellule qu'il infecte, qu'il finit généralement par détruire.

Le cycle de reproduction du virus comporte différentes étapes fondamentales :

- * Reconnaissance et attachement spécifique du virus à sa cible. Cela passe par une reconnaissance et une fixation par complémentarité tridimensionnelle entre la gp120 du virus et une protéine CD4 de la membrane cellulaire. Les cellules-cibles spécifiques du virus sont donc caractérisées par la présence de cette protéine CD4, ces cellules sont dites CD4+ (il s'agit principalement de lymphocytes T4 ou LT4, mais également de macrophages et d'autres encore).

- * Pénétration du virus dans sa cellule-cible, grâce à la gp41, qui s'insère dans la membrane de la cellule infectée.

- * Décapsidation et libération de l'ARN viral.

- * Rétrotranscription de l'ARN viral en ADN bicaténaire (dit ADN proviral), grâce à la rétrotranscriptase virale.

- * Intégration dans le génome de la cellule-hôte, grâce à l'intégrase virale. A ce moment, le virus est « caché » dans la cellule, à l'état latent.

Dès lors, la cellule infectée va devenir productrice de nouvelles particules virales.

- * Transcription de l'ADN proviral en ARNm par les enzymes cellulaires.

- * Traduction de l'ARNm en précurseurs protéiques.

- * Clivage des précurseurs protéiques en protéines virales (rétrotranscriptase, protéines de capsid, gp120, gp41,...), par des protéases virales et cellulaires.

- * Assemblage de nouveaux virions (= particules virales).

- * Bourgeonnement des particules virales qui emportent avec elles un morceau de la membrane de la cellule-hôte.

- * Libération de ces particules virales qui peuvent aller infecter d'autres cellules CD4+ (principalement les lymphocytes T4, rappelons-le).

Remarques :

– La rétrotranscriptase est une enzyme moins fiable que l'enzyme assurant la réplication de l'ADN. Ainsi des erreurs se produisent et de nombreux mutants viraux apparaissent, d'où la difficulté de mettre au point un vaccin contre le VIH.

– Au cours du cycle viral, se produisent des étapes spécifiques au virus (rétrotranscription, intégration, clivage des précurseurs protéiques). Ces étapes spécifiques sont les cibles des médicaments utilisés dans les multithérapies.

► L'évolution de la maladie

La maladie peut évoluer pendant plusieurs années. On distingue trois grandes phases :

– Primoinfection : Débute avec l'infection et dure de 3 à 8 semaines. Le virus se multiplie dans un premier temps (augmentation de la charge virale). A l'issue de cette phase, il y a apparition d'anticorps dirigés contre le virus. Le sujet est alors dit séropositif pour le VIH. Une confirmation de l'infection du patient, après détection de sa séropositivité (détection des anticorps anti-VIH) par Western-blot (électrophorèse de protéines).

Avec la réponse du système immunitaire (qui se manifeste par l'apparition des anti-VIH et par l'élévation du taux des LT4, la charge virale diminue, mais le virus ne disparaît pas totalement de l'organisme.

Au cours de cette première phase, le sujet peut présenter quelques signes cliniques bénins, tels que de la fièvre.

– Phase asymptomatique (peut durer jusqu'à 12 ans). La maladie est sous le contrôle du système immunitaire, mais le virus reste présent dans l'organisme (la charge virale reste cependant faible). Les LT4 sont petit à petit détruits par le virus. Il y a également apparition de lymphocytes T cytotoxiques dirigés contre les cellules infectées (c'est-à-dire contre les LT4 principalement, ce qui n'arrange pas la situation).

Le taux de LT4 passe progressivement sous la barre des 500/mL.

Quelques maladies mineures commencent à se développer.

– Stade SIDA déclaré : Une immunodéficience acquise sévère va apparaître. Des maladies opportunistes vont alors se développer. Ce sont des maladies (liées à des virus, des bactéries, des tumeurs) normalement bien et facilement combattues par le système immunitaire lorsqu'il est parfaitement efficace, mais qui « profitent » de l'immunodéficience pour se développer.

La baisse du nombre de LT4 et d'anti-VIH devient de plus en plus marquée et l'immunodéficience conduit finalement au décès de l'individu.

En résumé, le SIDA se caractérise par une atteinte progressive du système immunitaire. Dans un premier temps, ce système réagit et oppose une réponse où apparaissent divers moyens de défense :

– Anticorps circulants dans l'organisme, dirigés spécifiquement contre les particules virales.

– Lymphocytes T : LT cytotoxiques, détruisant les cellules infectées et LT auxiliaires (LT4) qui stimulent l'ensemble de la défense. C'est l'effondrement du taux de ces LT4 qui est à l'origine de l'immunodéficience.

L'ensemble de ces moyens représente une défense acquise.

Cette défense met du temps à se mettre en place, elle finit par combattre assez efficacement le virus, mais celui-ci ne disparaît pas totalement de l'organisme, les LT4 disparaissent petit à petit et la défense perd de son efficacité, d'où l'apparition des maladies opportunistes.

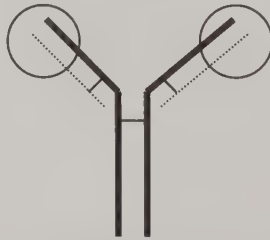
LES PROCESSUS IMMUNITAIRES

Lors du développement du SIDA, nous avons vu se mettre en place des éléments de la défense immunitaire. Nous allons à présent voir avec plus de détails quels sont ces moyens de défense.

► Les anticorps : agents du maintien de l'intégrité du milieu extracellulaire

Au cours de la phase initiale du SIDA, apparaissent des anticorps, qui témoignent d'une réponse du système immunitaire face à l'agresseur et qui signalent la séropositivité de l'individu contaminé par le VIH.

Les anticorps sont des protéines circulant dans le sérum. Ces protéines sont des gammaglobulines nommées immunoglobulines. Elles sont formées de quatre chaînes, deux lourdes et deux légères, identiques deux à deux, et liées par des liaisons covalentes (ponts disulfure).



Structure schématique simplifiée d'un anticorps. En gras : chaînes lourdes, en tirets : chaînes légères.

Chaînes lourdes et chaînes légères se caractérisent par un domaine variable (zones dans les cercles du schéma ci-dessus, le reste de la molécule étant le domaine constant) pouvant se lier de manière spécifique aux antigènes (système clé-serrure). Par cette fixation sur l'antigène, l'anticorps neutralise l'antigène (celui-ci n'est pas détruit, mais inactivé). De plus, lorsque plusieurs anticorps et plusieurs antigènes se sont fixés l'un à l'autre, il y a formation de complexes moléculaires de grande taille : les complexes immuns.

Ceux-ci sont par la suite éliminés par des cellules jouant le rôle d'éboueurs dans l'organisme : les phagocytes (macrophages et polynucléaires en particulier). La phagocytose est rendue ici possible par la présence, sur la membrane des phagocytes, de récepteurs pouvant lier le domaine constant de l'anticorps. La phagocytose se déroule en trois phases :

- * Adhésion, au cours de laquelle le phagocyte lie un domaine constant d'anticorps, lui-même relié par son domaine variable à un antigène.

- * Ingestion, au cours de laquelle, par invagination membranaire, l'élément à détruire est absorbé par la cellule.

- * Digestion, assurée par des enzymes lytiques contenues dans des vésicules membranaires au sein du phagocyte.

L'élément étranger, sur lequel se sont fixés les anticorps a alors été détruit.

Les étapes de la production des anticorps. Ce sont les lymphocytes B (issus de la moelle rouge des os) qui sont indirectement impliqués dans cette sécrétion. Il existe dans l'organisme de très nombreux clones de lymphocytes B, se distinguant par les immunoglobulines qu'ils portent à leur surface membranaire. A chaque clone de lymphocyte B est associé un type particulier d'immunoglobuline (différant des autres par son domaine variable). Par cet intermédiaire, un clone de lymphocyte B est spécifique d'un antigène (et d'un seul). Avant tout contact avec un antigène, il existe donc une grande diversité de lymphocytes B (l'organisme a potentiellement de quoi répondre à toutes les attaques), mais pour un antigène donné, le nombre de lymphocytes B pouvant lui être spécifique est insuffisant pour développer rapidement une réponse efficace. De plus, les immunoglobulines présentes ne sont que membranaires et pas encore circulantes, elles n'ont donc encore aucune efficacité contre l'antigène.

Lorsqu'un antigène pénètre dans l'organisme, il va, en se fixant sur les immunoglobulines qui lui sont spécifiques et portées par un clone précis de lymphocyte B, sélectionner et activer ce clone de lymphocyte B (les autres clones, porteurs d'immunoglobulines non spécifiques de l'antigène ne sont pas sélectionnés ni activés). On parle de sélection clonale.

Les lymphocytes B activés deviennent alors sensibles à l'action d'interleukines, molécules sécrétées par des lymphocytes T4 ayant eux-mêmes été sélectionnés et activés par l'antigène. Sous l'action des interleukines, les lymphocytes B sélectionnés se multiplient alors et se différencient en cellules effectrices : les plasmocytes. La principale différence existant entre lymphocytes B et plasmocytes est que ces derniers présentent une structure caractéristique de cellules à forte activité de sécrétion de protéines. Les plasmocytes produits après contact avec un antigène sécrètent donc en grande quantité les anticorps spécifiques de cet antigène.

Il y a donc à présent, dans le sang de l'individu, des anticorps circulants pouvant assurer la neutralisation de l'antigène. La défense ne s'est ici mise en place qu'après contact avec l'antigène et ne s'est développée de manière efficace qu'après quelques semaines. Cette défense est dite acquise (par

opposition à la défense innée, assurée par des éléments tels que les macrophages, qui peut être efficace immédiatement).

Il est à noter que, au cours de la multiplication et de la différenciation des lymphocytes B, une partie d'entre eux se transforme en cellules mémoires (LBm), destinées à conserver une trace dans l'organisme de la réponse dirigée contre un antigène précis. Lors d'un contact ultérieur avec le même antigène, ces LBm seront très rapidement mobilisés et des anticorps circulants apparaîtront très rapidement (on retrouve ici le fait qu'il s'agit d'une défense acquise, qui n'intervient rapidement qu'après un premier contact avec un antigène).

En résumé, cette défense assurée par les anticorps se développe en trois phases :

- * Sélection et activation de lymphocytes B par l'antigène.
- * Seconde activation des lymphocytes B sélectionnés, par des interleukines. Multiplication et différenciation des lymphocytes B en plasmocytes et LBm.
- * Sécrétion d'anticorps spécifiques qui vont neutraliser l'antigène, formation de complexes immuns et phagocytose facilitée par la fixation des anticorps sur les antigènes.

Les anticorps produits circulent librement dans l'organisme et permettent de lutter contre des molécules antigéniques dans le milieu intérieur (sang et lymphe). Cela permet, par exemple, de neutraliser des particules virales libres dans l'organisme.

Comment lutter contre les virus tels que le VIH lorsqu'ils ont infecté des cellules et s'abritent à l'intérieur de celles-ci ?

► Les lymphocytes T cytotoxiques : agents du maintien de l'intégrité cellulaire

Les lymphocytes T sont des cellules qui sont produites par la moelle osseuse et le thymus (T = Thymodépendants). Parmi eux, les lymphocytes T cytotoxiques sont capables de détruire spécifiquement des cellules infectées par un virus (avec une spécificité envers la souche virale ayant infecté les cellules), ou bien encore des cellules tumorales. La destruction de ces cellules devenues anormales dans l'organisme est une cytolysse, qui fait intervenir un contact étroit entre la cellule à détruire et le lymphocyte T cytotoxique. Il se produit en fait une fixation spécifique du lymphocyte sur la cellule-cible, suivie d'une sécrétion de perforines par le lymphocyte. Ces molécules sont susceptibles de perforer des trous dans la membrane de la cellule-cible, ce qui entraîne sa destruction.

Déroulement de cette réponse : Dans l'organisme, avant toute pénétration d'un élément étranger ou apparition d'une cellule anormale, il existe de nombreux lymphocytes T8 (= lymphocytes pré-cytotoxiques). A leur surface, il existe des récepteurs T pouvant détecter des antigènes à la surface de cellules anormales (infectées par un virus, tumorales, ...). De même qu'un

lymphocyte B n'est spécifique que d'un antigène, un lymphocyte T8 n'est spécifique que d'un type cellulaire infecté par un antigène précis. Les lymphocytes T contrôlent les cellules dans l'organisme. Dès qu'une cellule anormale est détectée par un clone précis de lymphocyte T8, de manière spécifique, ce clone est sélectionné et activé. Ce clone lymphocytaire devient alors sensible aux interleukines et, en présence de celles-ci, il se multiplie et se différencie en lymphocytes T cytotoxiques spécifiques des cellules anormales détectées. La destruction de ces cellules doit permettre à l'organisme de se défendre.

Cette défense est donc basée sur le même principe que la défense acquise assurée par les anticorps (sélection, double activation, multiplication, différenciation et apparition d'effecteurs).

► Les LT4 : pivots des réactions immunitaires spécifiques acquises

Selon le même principe que celui décrit précédemment, suite à la pénétration d'un antigène dans un organisme, il y a activation et sélection, par des cellules anormales, modifiées par la présence d'un antigène (tumoral, viral,...), de clones de lymphocytes T4. Après multiplication, les clones sélectionnés de lymphocytes T4 vont se différencier et former des lymphocytes T auxiliaires, sécréteurs d'interleukines qui vont stimuler la multiplication et la différenciation des lymphocytes B, ainsi que la production des anticorps, mais également la multiplication et la différenciation des lymphocytes T8. Ces interleukines sont donc activatrices de l'ensemble des réponses immunitaires spécifiques. Par la sécrétion de ces molécules, les lymphocytes T4 ont donc un rôle central dans l'ensemble de la défense immunitaire, et l'on comprend alors pourquoi leur disparition progressive lors du SIDA entraîne l'apparition d'une immunodéficience.

L'ensemble de la réponse immunitaire, ainsi que l'action du VIH et le développement du SIDA sont résumés dans le schéma de la page 239.

VACCINATION ET MEMOIRE IMMUNITAIRE

► La mémoire immunitaire se met en place après un premier contact

Lors du premier contact avec un antigène, les éléments de défense spécifique ne sont que potentiels. Ils sont présents (LB et LT spécifiques de l'antigène sont déjà dans l'organisme), mais inefficaces. Le contact avec l'antigène se traduit par une identification de ce dernier comme étant étranger à l'organisme et une réponse se met alors en place. Cette réponse nécessite cependant quelques semaines avant d'atteindre son efficacité (voyez par exemple le temps qu'un individu infecté par le VIH pour devenir séropositif vis-à-vis de ce virus).

Cependant, on constate que, si un contact ultérieur avec le même antigène se produit, la défense spécifique apparaît beaucoup plus rapidement et avec une intensité supérieure. La réponse primaire (réponse au premier contact) a

donc été mémorisée et la réponse secondaire (toute réponse ultérieure) sera plus rapide et massive, donc plus efficace. L'individu est alors mieux protégé. Cette mémoire est spécifique, la mémorisation de la réponse vis-à-vis d'un antigène A ne protège efficacement que contre cet antigène A.

Cette mémoire immunitaire repose sur l'existence de cellules mémoires (LBm et LT4m) qui se forment au cours de la mise en place de la réponse. Ces cellules sont spécifiques d'un antigène et leur durée de vie est de plusieurs années. A chaque nouveau contact avec l'antigène, ces cellules sont rapidement et massivement sollicitées, d'où la rapidité de la réponse. Au cours des années, leur nombre diminue en absence de nouveau contact avec l'antigène, mais ce nombre augmente au contraire à chaque nouveau contact.

A chaque fois que l'organisme rencontre un antigène inconnu, de nouvelles cellules mémoires se constituent et la mémoire immunitaire s'enrichit peu à peu.

► **La vaccination se base sur la mémoire immunitaire**

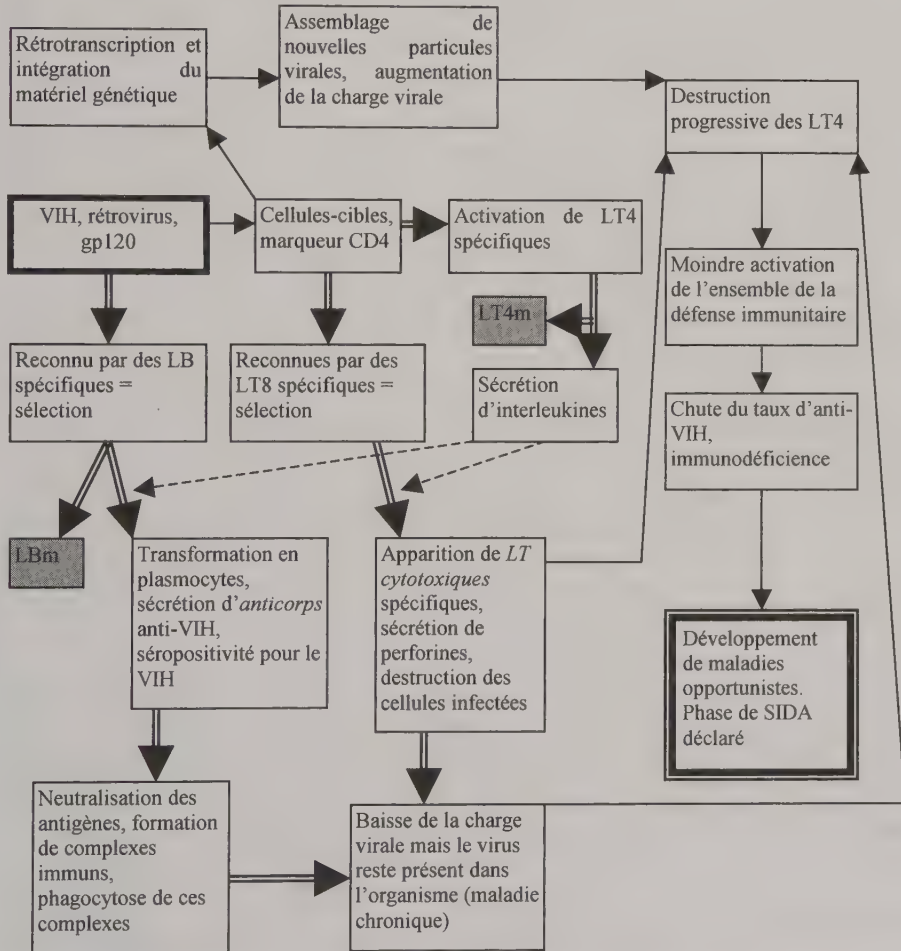
Nous venons de voir qu'après un premier contact avec un antigène, l'organisme met un certain temps avant de développer une réponse efficace.

Au cours de cette période, des mécanismes innés de défense peuvent limiter l'expansion de l'agent infectieux, voire le combattre totalement. Cependant cette défense innée peut s'avérer insuffisante et l'agent pathogène a alors le temps de détruire l'organisme avant qu'une défense spécifique efficace ne soit mise en place.

Comment donner à l'organisme les moyens de se défendre lorsqu'il est confronté pour la première fois à un antigène de manière accidentelle ? La question semble contradictoire puisque, pour qu'une réponse efficace soit envisageable, il faudrait un premier contact avant le premier contact... La vaccination permet d'apporter une réponse au dilemme posé ici. Elle consiste à mettre l'individu en contact avec un antigène atténué (donc non nocif pour l'organisme) mais ayant gardé assez de ressemblances avec l'antigène contre lequel on cherche à se protéger pour que la défense mémorisée contre l'antigène atténué soit également efficace contre l'élément pathogène. Dans la pratique, on utilise des anatoxines (toxines rendues inactives), des virus ou bactéries atténués (on a, par exemple, supprimé chez eux les gènes responsables de la virulence), des fragments de paroi bactérienne ou virale, des antigènes produits par génie génétique,...

Le principe est donc de mettre en place, sans risques pour l'organisme, une défense efficace contre un antigène donné, de façon à ce que cette défense soit mémorisée. La mémoire immunitaire ainsi constituée pourra être utilisée en cas de contact ultérieur accidentel avec la version pathogène du même antigène. La vaccination est donc une défense active, mémorisée, spécifique, préventive et la protection ainsi assurée est durable (mais attention les cellules mémoires ont une durée de vie longue, mais elles ne sont pas éternelles, il faut donc respecter le calendrier prévu pour les rappels de vaccination).

Enfin, il ne faut pas confondre vaccination et sérothérapie. Cette dernière consiste à injecter directement à un individu des anticorps dirigés contre un antigène donné. Cette méthode est spécifique, mais elle n'est pas une réponse mémorisée. Il s'agit donc d'une protection curative (on l'utilise lorsque l'individu est déjà atteint et qu'il est trop tard pour le vacciner), à court terme (les anticorps injectés seront eux-mêmes éliminés en quelques semaines, après avoir joué leur rôle protecteur).



VIH, SIDA et défense immunitaire. Flèches simples : développement du virus et de la maladie ; flèches doubles : défense immunitaire ; italiques : effecteurs de la défense ; grisé : mémoire immunitaire.

▴ Enoncés des exercices ▴

■ Exercice 1 (20 min)

Complétez le texte suivant en remplaçant les chiffres par les termes en italiques placés ci-après :

Le VIH est le virus responsable du (1), c'est un virus à (2). Il infecte les cellules qui possèdent une (3) membranaire et, en particulier, les lymphocytes T4 (LT4).

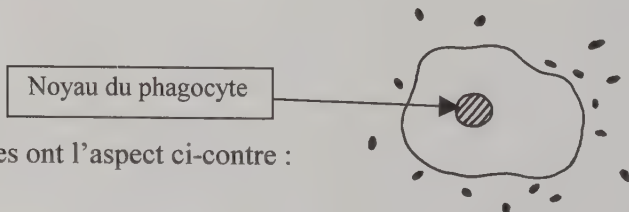
Lorsque le virus contamine un individu, il est détecté par le système immunitaire qui met alors en place une réponse. Il se produit une augmentation du nombre des (4) et, après 2 à 8 semaines, des (5) apparaissent dans le sang de l'individu qui est alors (6). D'autre part, des (7), spécifiques des cellules infectées apparaissent. Cette première phase est la phase de (8), au cours de laquelle se produit la (9).

Les anticorps anti-VIH sont des (10) produites par les (11) qui se sont différenciés à partir de (12). La sélection est faite par l'(13) lui-même, et une seconde activation est assurée par les (14) sécrétées par les (15), issus d'une différenciation de LT4 activés par des cellules modifiées par l'antigène. Ces LT4 ont un rôle régulateur central dans l'ensemble de la (16). En dépit de la réponse de l'organisme, le virus n'est pas totalement éliminé et, petit à petit, le nombre de LT4 diminue, ainsi que la quantité des anticorps anti-VIH. Une (17) s'installe, au cours de la phase (18). Lorsque cette immunodéficience devient sévère, des (19) apparaissent et c'est alors la phase (20), qui va conduire à la mort de l'individu.

Termes à utiliser : *maladies opportunistes, défense immunitaire, ARN, antigène, protéine CD4, LT4, LTc, plasmocytes, LB sélectionnés et activés, LT auxiliaires, anticorps anti-VIH, immunoglobulines spécifiques, séropositif pour le VIH, primo-infection, séroconversion, interleukines, immunodéficience, asymptomatique, de SIDA déclaré, SIDA.*

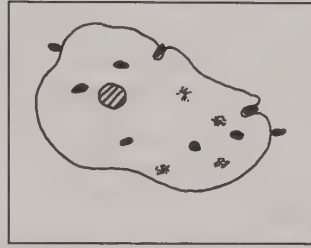
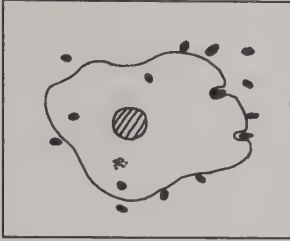
■ Exercice 2..... (30 min)

Les schémas suivants (inspirés des expériences de Woods) représentent des phagocytes mis en présence de staphylocoques (bactéries pathogènes) de souche 1.



Au temps 0, les cellules ont l'aspect ci-contre :

Si rien n'est ajouté, cet aspect reste inchangé 3 ou 5 minutes plus tard.
Si l'on ajoute à la préparation précédente un sérum anti-staphylocoque de souche 1, les cellules présentent l'aspect suivant après 3 (gauche) et 5 minutes (droite).



Si l'on avait ajouté un sérum anti-staphylocoque de souche 2, le résultat obtenu après 3 ou 5 minutes était le même que lors de la toute première expérience.

Le document suivant présente les résultats obtenus lors de la réalisation d'un test d'immunodiffusion sur gel (Ouchterlony).



- 1 : Sérum anti-staphylocoque de souche 1
- 2 : Antigènes extraits de staphylocoques de souche 1
- 3 et 4 : Antigènes extraits de staphylocoques de souche 2
- 5 : Sérum anti-staphylocoque de souche 2

Traits gras : arcs de précipitation

En vous appuyant sur l'ensemble des résultats, et vos connaissances :

1. Quelles molécules actives se trouvent dans les sérums anti-staphylocoques ? Faites-en un schéma annoté. Quelles sont les cellules productrices de ces molécules ?
2. Expliquez les résultats des expériences de Woods.

■ Exercice 3..... (30 min)

Les expériences de Claman (1966). Des cellules de thymus et de moelle osseuse sont prélevées chez une souris normale et mises en suspension dans un milieu physiologique approprié. Elles sont ensuite injectées par voie sanguine à trois lots de souris receveuses ayant subi, dès la naissance, une destruction des organes producteurs de lymphocytes.

L'importance de la réponse immunitaire (qui se manifeste par la production d'anticorps anti-GRM dans cette expérience) est évaluée par un test d'agglutination (les GRM : globules rouges de mouton, mis en présence

d'anti-GRM, subissent une agglutination). Pour cela, le sérum des souris de chacun des lots est prélevé et mis en présence de GRM.

Les résultats sont consignés dans le tableau ci-après.

Lots de souris Traitements	Premier lot	Deuxième lot	Troisième lot
Temps t1, injection intraveineuse	De cellules de thymus	De cellules de moelle osseuse rouge	De cellules de thymus et de cellules de moelle osseuse
Temps t2 (quelques jours plus tard), injection intraveineuse	De GRM	De GRM	De GRM
Temps t3, (quelques jours plus tard)	Prélèvement de sérum	Prélèvement de sérum	Prélèvement de sérum
Expérience finale, contact sérum- GRM	Pas d'agglutination	Très légère agglutination	Agglutination

On précise que la moelle osseuse produit des lymphocytes B et que le thymus produit les lymphocytes T.

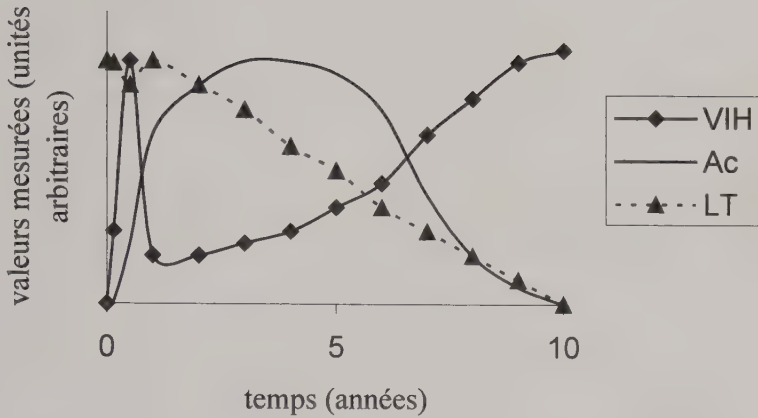
Interprétez ces expériences.

(D'après bac. 98)

■ Exercice 4..... (40 min)

On cherche à comprendre comment le VIH, responsable du SIDA, agit sur le système immunitaire. Pour cela, on mesure, chez des personnes infectées, la quantité de VIH dans le sang (VIH, courbe ci-après) et la concentration sanguine en lymphocytes T (LT) ainsi que celle en anticorps anti-VIH (Ac). Les résultats sont consignés dans les graphiques de la page suivante. Dans ces graphiques, la date 0 correspond au moment de la contamination de l'individu.

1. Donnez la signification des termes VIH et SIDA.
2. Expliquez, après avoir défini ce terme, pour quelles raisons les individus infectés sont atteints de maladies « opportunistes ».
3. Expliquez le terme « séropositif ».
4. Quelles sont les cellules-cibles du VIH et quelles sont les conséquences directes de leur infection et de leur destruction ?
5. Indiquez brièvement quelles sont les étapes de la réponse immunitaire qui se sont déroulées au cours de la phase de séroconversion (phase comprise entre la contamination et l'apparition de la séropositivité).



Une femme séropositive pour la VIH met au monde un enfant. Des tests de dépistage du SIDA sont réalisés sur le bébé après la naissance.

Moment du test	2 jours	1 mois	3 mois	6 mois	1 an
Résultat du test	++	+/-	0	0	0

(++ test positif ; +/- résultat limite ; 0 résultat négatif)

6. Nommez et décrivez les éléments mis en évidence par le test de dépistage.
7. Pourquoi l'enfant, séropositif à la naissance est-il ici devenu séronégatif.
8. Quels sont les modes de transmission du SIDA ?

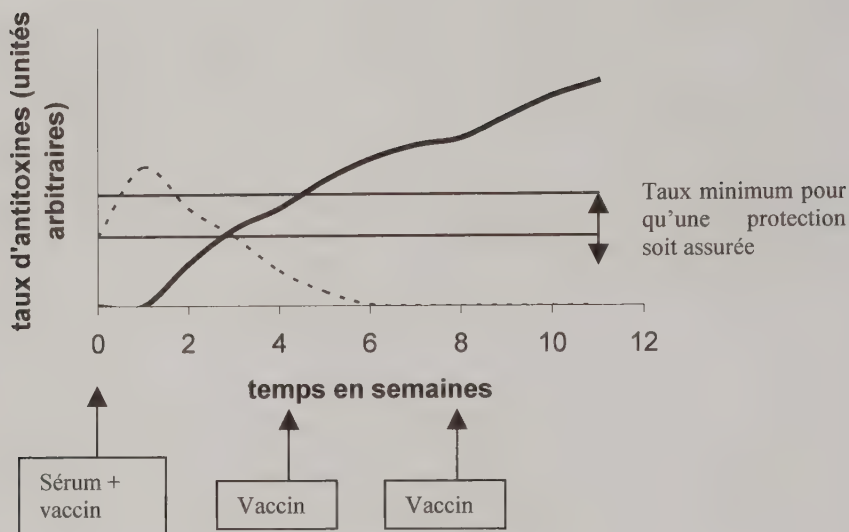
(D'après concours masso-kinésithérapie, Assas, 2000 et EFOM, 96).

■ Exercice 5..... (40 min)

Le tétanos est une maladie due à l'introduction dans l'organisme, d'une bactérie (*Clostridium tetani*) qui libère une toxine dans le milieu intérieur. Pour éviter cette maladie, on procède à une vaccination dès le plus jeune âge en injectant trois doses de vaccin à un mois d'intervalle, puis des rappels tous les cinq ans.

Chez une personne profondément blessée sur une clôture rouillée et n'ayant pas eu de rappel, le médecin pratique une injection de sérum antitétanique puis une vaccination.

Le taux d'antitoxines tétaniques est suivi dans le sang de ce patient (graphique page suivante).



1. Que contient le sérum antitétanique ?
2. Que contient le vaccin antitétanique ?
3. Pourquoi un enfant est-il généralement protégé contre le tétanos jusqu'à son troisième mois ?
4. D'après le graphique, quel est le rôle du sérum ?
5. Quel est le rôle des injections de vaccin ?
6. Pourquoi le médecin a-t-il choisi de faire simultanément les deux types d'injections (il s'agit d'une séro-vaccination) sur le patient blessé ?

(D'après concours podologie, EFOM, 2000).

■■■ Exercice 6 (45 min)

La brucellose est une maladie contagieuse due à une bactérie du genre *Brucella*, elle peut atteindre l'Homme et les animaux d'élevage. On cherche à préciser quelques caractéristiques de la réaction à cette infection.

Expérience 1 : On mélange quelques gouttes d'une solution contenant des bactéries du genre *Brucella* avec soit des lymphocytes, soit du sérum prélevé sur deux vaches. Les résultats sont consignés dans le document 1 de la page suivante.

1. Analysez complètement et avec rigueur cette expérience. Vous n'utiliserez que les connaissances strictement nécessaires.

Expérience 2 : Des dosages ont été réalisés chez un animal après une première infection et après une seconde infection par ce même agent pathogène. Les résultats sont présentés dans le document 2.

En établissant une relation avec la première expérience, et en comparant les deux types de réponses :

2. Expliquez ces résultats.
3. Tirez-en des applications pratiques concernant la protection sanitaire des troupeaux d'animaux domestiques.

Expérience 3 : On injecte à deux vaches A et B du sérum et des lymphocytes prélevés chez une vache C ayant contracté une maladie due à une bactérie différente de celle provoquant la brucellose.

La vache A ayant reçu le sérum de C résiste à cette autre maladie, alors qu'elle est sensible à la brucellose.

La vache B ayant reçu les lymphocytes de C est sensible aux deux maladies.

4. En tenant compte des réponses précédentes, tirez de cette nouvelle expérience des précisions concernant la défense immunitaire intervenant ici.

Document 1

Sur chaque plaque sont déposées quelques gouttes d'une solution contenant des bactéries du genre *Brucella*.

Apport particulier à chaque plaque

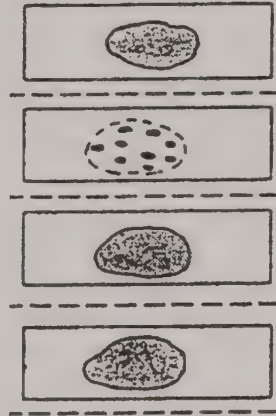
Lymphocytes d'une vache 1 atteinte de brucellose

Sérum d'une vache 1 atteinte de brucellose

Sérum d'une vache 2 non atteinte de brucellose

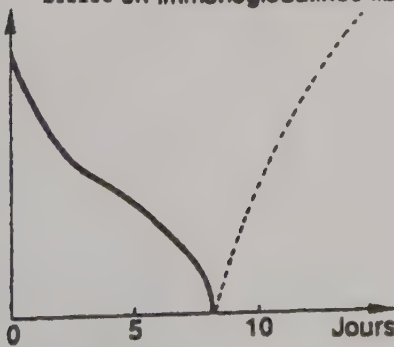
Lymphocytes d'une vache 2 non atteinte de brucellose

Aspect après 5 minutes

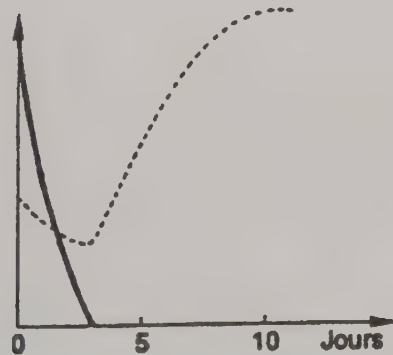


Document 2

Taux sanguins (en unités arbitraires)
 — en antigènes
 - - - en immunoglobulines libres



Dosages effectués après une première
Injection au temps $t = 0$



Dosages effectués après une
deuxième injection au temps $t = 0$

.....■ **CONTROLES** ■.....

Exercice 1 (100 min ; 10 pts) type I

Définir la séropositivité pour le VIH et décrire les mécanismes immunitaires mis en jeu lors de l'infection d'une personne permettant d'aboutir à cette séropositivité.

La réponse sera illustrée par un ou plusieurs schémas. Au moins un schéma décrivant les molécules responsables de la séropositivité est attendu. La phase effectrice des mécanismes immunitaires mise en jeu est hors-sujet.

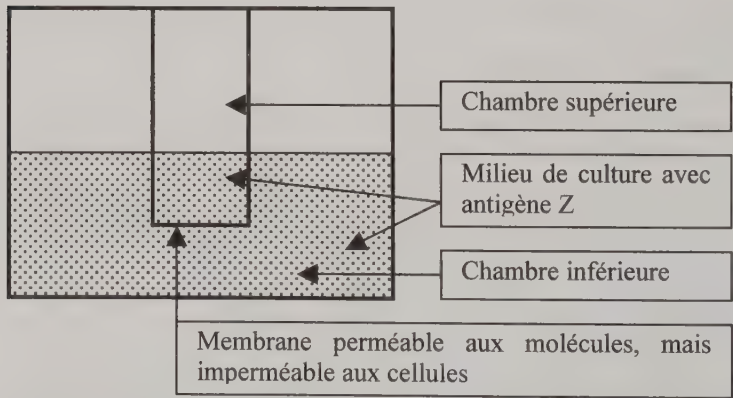
(bac ; Sujet 0, 2003)

Exercice 2 (40 min ; 4 pts) type II1

Le document suivant présente des résultats expérimentaux portant sur le fonctionnement du système immunitaire.

Question : En exploitant ce document, montrez qu'une communication cellulaire est indispensable au fonctionnement correct du système immunitaire. Toujours d'après ce document, vous préciserez la nature de cette communication.

Document : On cherche à préciser le type de relations existant entre les lymphocytes B et les lymphocytes T. Des lymphocytes B et T sensibilisés (ayant déjà été en contact avec l'antigène Z) sont placés dans une chambre de culture de Marbrook. Le schéma du montage et les résultats sont présentés ci-après



Nature des lymphocytes placés dans la chambre		Cellules sécrétrices d'anticorps anti-Z par million de cellules
Supérieure	Inférieure	
	T + B	960
	B	72
T	B	1011

Exercice 3 (60 min ; 6 pts) type II2

Les documents suivants présentent quelques aspects de la défense immunitaire.

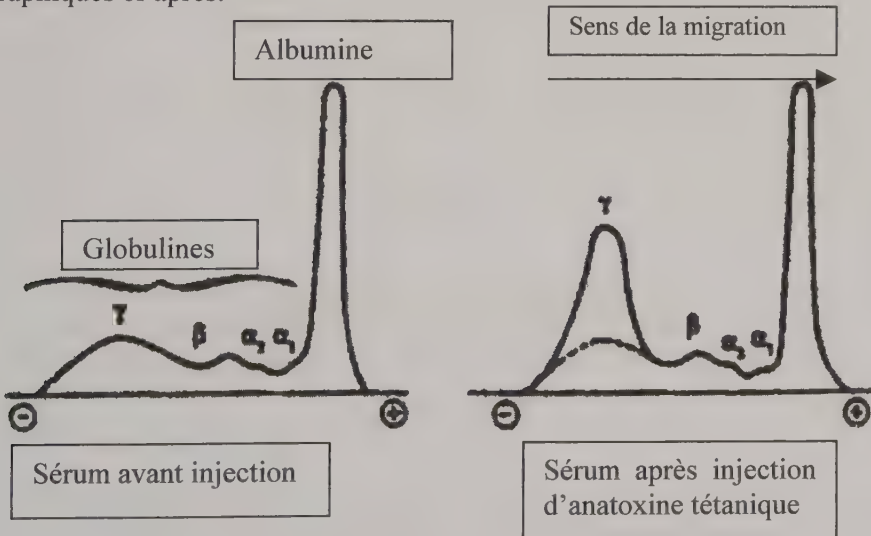
Question : A partir de l'étude de ces documents, indiquez quelles sont les grandes caractéristiques des réactions immunitaires présentées.

Document 1 : Première série d'expériences, protection dans le cas de la toxine tétanique.

*Première expérience : injection d'anatoxine tétanique à deux souris (Anatoxine = toxine atténuée par l'action combinée du formol et de la chaleur). Quinze jours plus tard, l'injection de la toxine tétanique, normalement mortelle, ne provoque aucune réaction, alors que l'injection de la toxine diphtérique à l'une des deux souris provoque la mort de celle-ci.

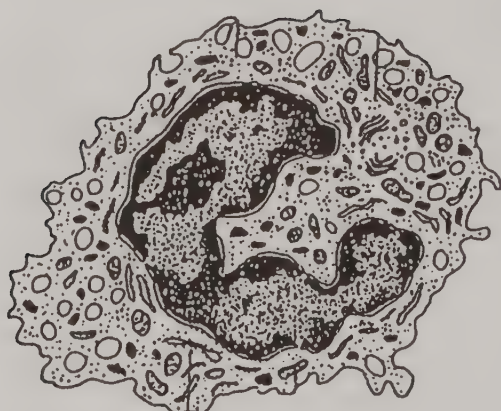
*Deuxième expérience : de la souris qui a survécu, on prélève le sérum que l'on injecte à une autre souris. Le même jour on lui inocule la toxine tétanique et elle survit.

*Troisième expérience : pour identifier la nature de la substance protectrice, on réalise l'électrophorèse du sérum d'une souris, avant et après l'injection d'anatoxine tétanique. Les résultats sont représentés sur les graphiques ci-après.

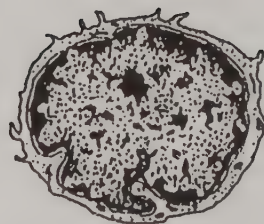


*Quatrième expérience : La numération globulaire du sang montre une augmentation du nombre des cellules A (du document 2), provenant d'une transformation d'une partie des cellules B qui se sont multipliées au cours d'une immunisation.

Document 2 : Cellules observables chez un individu (cellules A, au cours et après une immunisation, à partir des cellules B qui se multiplient).



Cellule A (x 6000)



Cellule B (x 8000)

Document 3 : Deuxième série d'expériences, protection contre la tuberculose.

L'injection de BCG (Bacille de Calmette et Guérin, vaccin contre la tuberculose, constitué de bacilles de Koch = BK, atténués) à un cobaye A le protège, après plus d'une semaine, contre le BK, normalement mortel.

*Première expérience : L'injection du sérum de ce cobaye A immunisé à un autre cobaye B ne le protège pas contre le BK virulent.

*Deuxième expérience : L'injection de lymphocytes vivants du cobaye A à un cobaye protège celui-ci contre le BK. En revanche, un tel animal C meurt si on lui injecte un autre bacille (bacille du charbon par exemple).

► Corrigé des exercices ▼

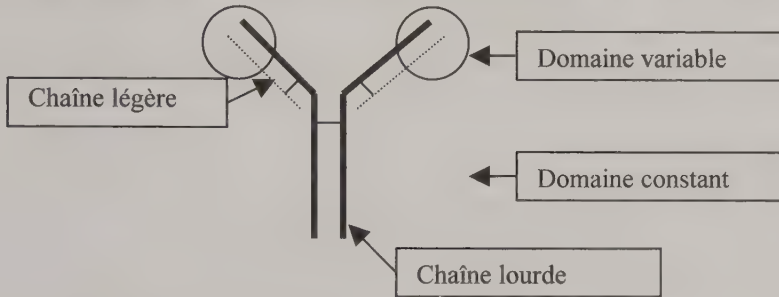
Corrigé 1

1 : SIDA ; 2 : ARN ; 3 : protéine CD4 ; 4 : LT4 ; 5 : anticorps anti-VIH ; 6 : séropositif pour le VIH ; 7 : LTc ; 8 : primo-infection ; 9 : séroconversion ; 10 : immunoglobulines spécifiques ; 11 : plasmocytes ; 12 : LB sélectionnés et activés ; 13 : antigène ; 14 : interleukines ; 15 : LT auxiliaires ; 16 : défense immunitaire ; 17 : immunodéficience ; 18 : asymptomatique ; 19 : maladies opportunistes ; 20 : de SIDA déclaré.

Corrigé 2

1. Le sérum anti-staphylocoque de souche 1 induit la phagocytose des bactéries. Le test d'Ouchterlony nous permet de mettre en évidence des arcs de précipitation qui résultent d'une immunoprécipitation. Celle-ci se produit

lorsque des complexes immuns trop gros pour pouvoir diffuser dans le gel se forment. Ces complexes immuns se forment eux-mêmes s'il y a rencontre entre un anticorps et l'antigène qui lui correspond. La disposition des arcs de précipitation nous permet de voir la spécificité de la formation des complexes immuns. Le sérum anti-souche 1 ne réagit qu'avec des antigènes de souche 1 et le sérum anti-souche 2 ne réagit qu'avec des antigènes de souche 2. Les molécules actives dans le sérum sont donc des anticorps. Ces anticorps sont produits par les plasmocytes et leur structure est la suivante :



2. Résultats de l'expérience de Woods

Nous pouvons tout d'abord constater qu'en absence d'anticorps, la phagocytose ne se produit pas. Les bactéries ne sont pas absorbées par le phagocyte.

En revanche, en présence d'un anticorps spécifique, la phagocytose se produit. La présence d'anti-staphylocoques de souche 1 permet la phagocytose des bactéries de souche 1 exclusivement. La présence d'un anti-staphylocoque de souche 2 ne permet pas de déclencher une phagocytose de staphylocoques de souche 1. Ceci est dû à la spécificité de réaction antigène-anticorps.

En se fixant sur les antigènes d'une part (via le domaine variable) et sur les phagocytes d'autre part (via le domaine constant), les anticorps induisent la phagocytose (en favorisant en particulier la phase d'adhésion) et ce, de manière spécifique.

Corrigé 3

L'agglutination résulte d'une interaction entre GRM et anticorps anti-GRM. Nous en déduisons que détecter une agglutination revient à détecter la présence d'anticorps anti-GRM et donc de plasmocytes sécréteurs de ces anticorps.

Premier lot : les cellules de thymus (Lymphocytes T) seules, ne sont pas capables d'induire une agglutination et ne sont donc pas capables de produire des anticorps.

Deuxième lot : les cellules de moelle osseuse (lymphocytes B) peuvent, seules, induire une légère agglutination. Elles sont donc capables de produire des anticorps, mais en quantité faible.

Troisième lot : en mettant en présence des lymphocytes B, producteurs d'anticorps, et des lymphocytes T, une forte agglutination est obtenue. Il y a donc eu production en nombre important, d'anticorps anti-GRM. Cette production, pour être satisfaisante, nécessite donc des lymphocytes B et des lymphocytes T, au sein d'une étroite coopération cellulaire.

Remarque (ne pouvant être tirée des documents) : cette coopération est assurée par les interleukines, sécrétées par les LT4, et activatrices de l'ensemble de la réponse immunitaire et, en particulier ici, de la multiplication des lymphocytes B, de la transformation de ceux-ci en plasmocytes et de la sécrétion par ces derniers d'anticorps.

Corrigé 4

1. Le VIH est le Virus de l'Immunodéficience Humaine
Le SIDA est le Syndrome d'ImmunoDéficience Acquise.

2. Les maladies opportunistes sont des maladies (d'origine virale, bactérienne ou tumorale) habituellement bien combattues par l'organisme mais qui peuvent se développer en profitant d'une immunodéficience, laquelle se traduit ici par une chute du nombre des T4 et une baisse de la quantité d'anticorps anti-VIH.

3. Un individu est dit séropositif pour le VIH, lorsqu'on peut détecter dans son sang des anticorps spécifiquement dirigés contre des antigènes caractéristiques de ce virus. Ces anticorps sont des immunoglobulines (protéines) circulantes, formées de deux chaînes lourdes identiques et de deux chaînes légères identiques. Schéma : cf. corrigé 2.

4. Les cibles du VIH sont les cellules portant le marqueur CD4 (auquel il se fixe grâce à sa gp120). Il s'agit en particulier des LT4, régulateurs centraux de l'ensemble de la défense immunitaire. Leur disparition entraîne une chute du taux d'interleukines, ce qui se traduit par une moindre stimulation des défenses immunitaires (= immunodéficience).

5. Le VIH se fixe sur des LB porteurs d'anticorps spécifiques d'antigènes du virus (ces LB préexistent à la pénétration du virus dans l'organisme, mais sont inactifs en absence d'un premier contact). Ce premier contact sélectionne quelques lymphocytes B. Par ailleurs, des LT4, également spécifiques, sont sélectionnés et activés par des cellules modifiées par le virus (et donc devenues anormales). Ces LT4 se multiplient, se transforment en LT auxiliaires sécréteurs d'interleukines qui agissent sur les LB sensibilisés (sélectionnés). Ces derniers se multiplient et beaucoup se transforment en plasmocytes sécréteurs d'anticorps spécifiques des antigènes

du virus. Des anticorps anti-VIH apparaissent alors dans le sang de l'individu qui devient alors séropositif pour le VIH.

6. Les éléments mis en évidence par le test de dépistage sont les anticorps anti-VIH. Il s'agit d'immunoglobulines, constituées de quatre chaînes protéiques identiques deux à deux et formant des régions variables, susceptibles de se fixer spécifiquement sur les antigènes, et des régions constantes, capables de se fixer sur des récepteurs membranaires portés par les phagocytes. (Schéma exercices précédents).

7. L'enfant est ici un « faux-séropositif » à la naissance. La disparition des anti-VIH de son sang au troisième mois montre que cet enfant n'est pas lui-même atteint par le virus. Ce qui a été détecté à la naissance, ce sont les anti-VIH maternels qui ont franchi la barrière placentaire. Ces anticorps maternels ont une durée de vie maximale de quelques mois.

8. Le SIDA se transmet selon trois modes principaux : voie sexuelle (c'est le mode de transmission le plus répandu), voie sanguine et transmission mère-enfant (ce qui n'a pas été le cas ici).

Corrigé 5

1. Le sérum antitétanique contient des anticorps spécifiquement dirigés contre la toxine tétanique.

2. Le vaccin antitétanique contient de l'anatoxine tétanique, substance non pathogène fabriquée en traitant la toxine tétanique par le formol et la chaleur.

3. En règle générale, un enfant bénéficie d'une protection assurée par les anticorps que lui a transmis sa mère avant la naissance. Il n'est alors protégé que contre les antigènes contre lesquels la mère est elle-même protégée. Comme le plupart des gens sont efficacement vaccinés contre le tétanos, la mère doit être vaccinée et l'enfant bénéficie de cette protection.

4. Le rôle du sérum est d'apporter une protection efficace de manière immédiate. En effet, quelques heures après l'injection, le taux d'anti-toxine tétanique atteint la valeur de sécurité. Ces anticorps injectés ont donc un effet protecteur immédiat, mais non durable puisque, quelques semaines après l'injection, le taux d'anticorps injectés tombe en dessous de la valeur minimale. L'individu n'est alors plus protégé. Il faut noter que la protection apportée ici est purement passive (une défense « toute prête » a été apportée à l'organisme).

5. Les injections vaccinales ont pour but de mettre en place une réponse immunitaire de la part de l'organisme lui-même, réponse qui sera mémorisée

(grâce à l'existence de cellules mémoires : LBm et LT4m). Les rappels permettent de renforcer le stock des cellules mémoires spécifiques de la toxine tétanique. La réponse ainsi induite est durable (plusieurs années), mais elle est lente à se mettre en place (trois semaines avant d'atteindre le taux minimum de protection).

6. Le médecin choisit ces deux types d'injection pour bénéficier de leurs avantages, sans en subir les inconvénients. Avec le sérum, il procure une immunité immédiate et efficace au patient, tandis qu'avec le vaccin, il lui procure une immunité durable (et également efficace).

Le graphique indique bien que, dès la première injection, le patient a un taux d'antitoxines qui est au dessus du taux minimum, et qui le reste durablement.

Corrigé 6

1. Nous pouvons constater que dans un seul cas une agglutination des bactéries a été obtenue (c'est-à-dire qu'il y a eu formation de complexes immuns). Il s'agit de la lame sur laquelle les bactéries ont été mises en contact de sérum provenant d'une vache atteinte de brucellose. Nous en déduisons que :

- L'immunité intervenant ici est donc contenue dans le sérum, elle fait intervenir les immunoglobulines.

- Cette immunité n'est pas innée. Elle n'est présente, dans le sérum, que lorsque l'animal a été mis en contact de l'antigène. Il s'agit donc d'une immunité acquise.

2. Lors d'un premier contact avec l'antigène, la disparition totale de l'antigène est lente : il faut 8 jours environ pour que cette disparition se produise. Le taux d'immunoglobulines libres augmente seulement à partir de ce moment (ce qui signifie que des immunoglobulines ont été produites auparavant, mais en nombre peu important, si bien que toutes les immunoglobulines produites sont utilisées au fur et à mesure pour neutraliser les antigènes présents. Ce n'est que lorsque ceux-ci ont entièrement disparu que des immunoglobulines en excès sont produites).

Lors d'un second contact, le taux d'antigène diminue plus rapidement et, en 3 jours environ, ils sont tous neutralisés. La production d'immunoglobulines est également plus importante. Le taux de ces immunoglobulines n'est pas nul au départ et il y a production en permanence d'immunoglobulines en excès. La réponse lors du second contact est donc plus rapide et plus intense. La réponse au premier contact a donc été mémorisée.

3. Première application : la vaccination, qui consiste à donner aux animaux un premier contact sans risque avec l'antigène. Comme l'indiquent les graphiques précédents, la réponse sera plus efficace en cas de contact ultérieur.

Seconde application : la sérothérapie, c'est-à-dire l'administration de sérum aux animaux non vaccinés atteints de brucellose. Le document 1 montre que le sérum d'un animal immunisé a un rôle protecteur en provoquant l'agglutination des antigènes.

4. L'expérience confirme le rôle protecteur du sérum, contrairement aux lymphocytes. De plus, nous pouvons constater qu'un animal immunisé contre un antigène n'est pas immunisé contre tous les antigènes possibles. La protection assurée par le sérum est spécifique.

.....■ CORRIGE DES CONTROLES ■.....

Exercice 1

Il ne s'agit pas de décrire l'ensemble du fonctionnement du système immunitaire. Néanmoins, l'intervention des LT4 doit impérativement être mentionnée, car sans elle, il n'y a pas de production satisfaisante d'anti-VIH, ce qui définit la séropositivité. Les rôles des anticorps ne sont pas à développer.

Proposition de plan :

Lors d'une infection par le VIH (Virus de l'Immunodéficience Humaine), les patients passent tout d'abord par une phase de primo-infection, au cours de laquelle se produit une séroconversion. C'est-à-dire que dans le sang de ces individus, apparaissent (au bout de 2 à 8 semaines) des molécules nommées anticorps anti-VIH, qui témoignent de la réponse du système immunitaire à l'infection virale. Les patients deviennent alors séropositifs pour le VIH. Quelles sont ces molécules et comment sont-elles produites ?

I) Les anticorps

Les anticorps sont des protéines circulantes (famille des immunoglobulines), constituées de quatre chaînes, 2 lourdes et 2 légères, identiques deux à deux. Chaque chaîne comporte un domaine variable et un domaine constant. La molécule d'anticorps possède deux sites de reconnaissance et de fixation spécifiques pour les antigènes.

Un schéma légendé d'immunoglobuline est attendu.

Les anticorps sont produits par des cellules sécrétrices spécialisées, les plasmocytes.

II) Mécanismes immunitaires mis en jeu lors de la sécrétion des anticorps

Phase de sélection clonale : parmi les nombreux clones de lymphocytes B possédant chacun un type d'anticorps membranaire, sont sélectionnés les clones dont les anticorps membranaires sont complémentaires des antigènes du virus.

Phase d'amplification et de différenciation : les lymphocytes B sélectionnés se multiplient et se différencient en plasmocytes sécréteurs d'anticorps de

même spécificité que les anticorps membranaires des lymphocytes B dont ils sont issus.

Pour que cette réaction puisse se dérouler, il faut que des clones de lymphocytes T4 spécifiques de l'antigène soient sélectionnés et que des interleukines soient alors sécrétées par ces LT4 activés. Ces interleukines activent la multiplication et la différenciation des LB sélectionnés.

L'apparition de la séropositivité au VIH témoigne d'une réponse du système immunitaire à la pénétration du virus dans l'organisme. Cette réponse repose en grande partie sur une coopération cellulaire entre les LB sélectionnés et les LT4 sécrétants d'interleukines, activatrices de l'ensemble de la réponse. C'est la chute de ces LT4, détruits par le VIH, qui entraînera l'immunodéficience à l'origine du développement des maladies opportunistes.

Exercice 2

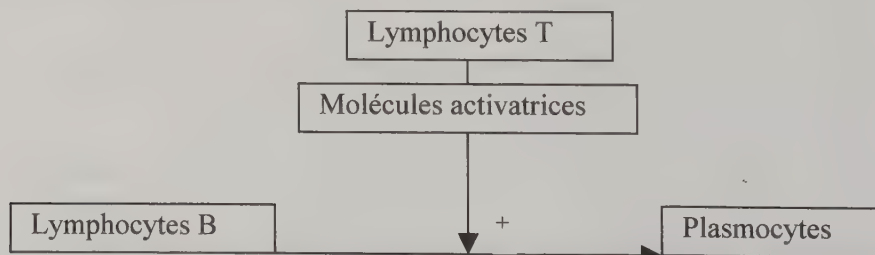
Analysons les expériences présentées, utilisant la chambre de Marbrook.

Lorsque des lymphocytes B sont utilisés seuls (2^{ème} ligne du tableau de résultats), il y a peu de plasmocytes qui apparaissent (72 pour un million de cellules). Il y a donc peu d'anticorps pouvant être synthétisés.

Lorsque des lymphocytes B et T sont réunis dans la chambre inférieure, une production nettement plus importante de plasmocytes est observée (environ 13 fois plus). La présence des lymphocytes T est donc indispensable pour une bonne production de plasmocytes.

Une coopération cellulaire est donc indéniablement mise en évidence.

Dans la dernière expérience, une production importante de plasmocytes est observée (14 fois plus que dans la première expérience, soit environ autant que dans la deuxième expérience). Or les lymphocytes T ne sont pas en contact direct avec les lymphocytes B. En effet, d'après le schéma de montage qui nous est présenté, aucune cellule ne peut passer de la chambre supérieure à la chambre inférieure. Ce sont donc des molécules qui interviennent ici. Nous pouvons donc admettre, à l'issue de ces expériences, le schéma fonctionnel suivant :



Évitez de répéter les valeurs expérimentales dans vos analyses, mais donnez plutôt des ordres de grandeur des variations observées (10 fois plus, 50 % de moins,...).

Exercice 3

Analysons les documents proposés pour déterminer quelles sont les grandes caractéristiques des réactions immunitaires présentées.

Document 1 : L'injection de toxine tétanique à un animal montre que celui-ci ne possède pas de défense efficace innée contre cet agent pathogène. La survie d'un animal auquel on avait préalablement injecté de l'anatoxine tétanique montre qu'une défense peut être acquise, à condition que soit donné un premier contact avec l'antigène (et à condition que ce premier contact ne tue pas l'animal !). De plus cette défense est spécifique : un animal protégé contre la toxine tétanique ne l'est pas contre la toxine diphtérique. Les résultats de l'expérience 2 montrent que cette défense acquise passe par le sérum, elle est donc ici assurée par des molécules. Les résultats de l'électrophorèse indiquent que ces substances protectrices sont des gamma-globulines (immunoglobulines), puisque ces molécules sont les seules dont le taux augmente de manière significative après une immunisation.

Document 2 : au cours de l'immunisation des lymphocytes B (cellules B) se transforment en plasmocytes (cellules A) qui ont une structure caractéristique de cellules sécrétrices de protéines (réticulum, appareil de Golgi, vésicules très développés).

Document 3 : la protection contre la tuberculose ne semble pas tout à fait fonctionner de manière identique. En effet, si cette immunité est également acquise (le BCG jouant ici le rôle d'antigène atténué apportant un premier contact sans risque), il ne semble pas que ce soient des molécules présentes dans le sérum qui apportent cette protection.

En revanche, des lymphocytes sont ici directement impliqués dans la protection acquise contre le BK. Il s'agit ici de lymphocytes T principalement et, tout particulièrement, de LT cytotoxiques.

Cette défense acquise, faisant intervenir des LT est également spécifique, la protection contre le BK n'agit pas contre les autres bactéries (celle du charbon en l'occurrence).

En résumé, il y a donc existence d'une défense acquise, spécifique, qui peut faire intervenir, selon les cas, deux types d'effecteurs différents :

- * Immunoglobulines, c'est-à-dire anticorps, sécrétés par les plasmocytes, issus de la transformation de lymphocytes B.

- * Lymphocytes T cytotoxiques.

7,50 €

Achevé d'imprimer en avril 2005
sur les presses de Normandie Roto Impression s.a.s.
à Lonrai (Orne)

N° d'imprimeur : 05-0833

Dépôt légal : avril 2005

Imprimé en France

Dans les ouvrages de la collection **CONTRÔLE CONTINU** vous trouverez :

- des **résumés de cours**, pour réviser rapidement
- des **exercices corrigés, variés et progressifs** pour vous entraîner et tester vos connaissances
- des **problèmes avec résolution** pour se préparer efficacement aux **contrôles écrits** de votre classe.

