

100 %  
EXOS

T<sup>le</sup> S

SVT

Spécifique & spécialité

NOUVEAU PROGRAMME

100 %  
réussite

Fiches de cours

180 exercices  
progressifs et minutés

Sujets de type bac

Tous les corrigés  
détaillés et commentés



Avec ce livre,  
un an d'abonnement

GRATUIT  
à [annabac.com](http://annabac.com)







Jean-Marc Coulais  
Professeur agrégé au lycée Vieljeux de La Rochelle

Hélène Hervé  
Professeur agrégée au lycée Dumont-d'Urville de Maurepas

Nadège Jeannin  
Professeur agrégée au lycée Dumont-d'Urville de Maurepas

**Maquette de principe :** Marie-Astrid Bailly-Maître

**Mise en pages :** Jouve

**Édition :** Anne Panaget

**Schémas :** Bernard Sullerot

**Iconographie :** Hatier Illustration

---

© Hatier, Paris, juin 2012

Toute représentation, traduction, adaptation ou reproduction, même partielle, par tous procédés, en tous pays, faite sans autorisation préalable, est illicite et exposerait le contrevenant à des poursuites judiciaires. Réf. : loi du 11 mars 1957, alinéas 2 et 3 de l'article 41. Une représentation ou reproduction sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris) constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

## Votre ouvrage 100 % exos

- Conforme au nouveau programme de SVT de T<sup>le</sup> S entré en vigueur à la rentrée 2012, ce « 100 % exos » vous propose une **méthode de travail** complète et un **entraînement intensif** sur mesure tout au long de l'année.
- Pour chaque thème du programme vous trouverez un **cours** structuré, les **savoir-faire** qu'il faut maîtriser, des **exercices** progressifs et leurs **corrigés** détaillés.
- Assortis d'**indications de solution**, de **commentaires** et de **conseils** des auteurs, tous les exercices corrigés vous permettent :
  - de **comprendre** les notions essentielles et de **maîtriser** le cours ;
  - de **progresser** et de vous **entraîner** à votre rythme ;
  - de vous **évaluer** et de **réussir** vos contrôles ;
  - de **viser** la mention au bac et l'entrée en classes prépas.

## Sur le site [www.annabac.com](http://www.annabac.com)

- L'achat de cet ouvrage vous permet de bénéficier d'un **ACCÈS GRATUIT** aux ressources d'annabac.com : fiches de cours, podcasts, quiz, exercices et sujets corrigés...
- Pour profiter de cette offre, rendez-vous sur [www.annabac.com](http://www.annabac.com), dans la rubrique « Vous avez acheté un ouvrage Hatier ? »\*



\* La saisie d'un mot-clé du livre (lors de votre première visite) vous permettra de créer un compte personnel.

# Sommaire

## ENSEIGNEMENT SPÉCIFIQUE

### La vie et l'évolution du vivant

<b>1</b>	<b>Brassage et diversité génétiques</b>	
	<b>COURS</b>	7
	<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement ..... 15 Exercices d'approfondissement ..... 20 Contrôles ..... 21
	<b>CORRIGÉS</b>	23
<b>2</b>	<b>Diversification des êtres vivants et évolution</b>	
	<b>COURS</b>	33
	<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement ..... 43 Exercices d'approfondissement ..... 49 Contrôles ..... 51
	<b>CORRIGÉS</b>	54
<b>3</b>	<b>Histoire évolutive de l'Homme</b>	
	<b>COURS</b>	63
	<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement ..... 70 Exercices d'approfondissement ..... 75 Contrôles ..... 78
	<b>CORRIGÉS</b>	81
<b>4</b>	<b>La vie fixée chez les plantes</b>	
	<b>COURS</b>	87
	<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement ..... 95 Exercices d'approfondissement ..... 99 Contrôles ..... 102
	<b>CORRIGÉS</b>	105
<b>5</b>	<b>La plante domestiquée</b>	
	<b>COURS</b>	111
	<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement ..... 118 Exercices d'approfondissement ..... 125 Contrôles ..... 127
	<b>CORRIGÉS</b>	129

## Domaine continental et géothermie

### 6 Caractéristiques de la croûte continentale

---

<b>COURS</b>	.....	137
<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement .....	145
	Exercices d'approfondissement .....	150
	Contrôles .....	152
<b>CORRIGÉS</b>	.....	154

### 7 Formation et recyclage de la croûte continentale

---

<b>COURS</b>	.....	159
<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement .....	169
	Exercices d'approfondissement .....	178
	Contrôles .....	180
<b>CORRIGÉS</b>	.....	182

### 8 Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

---

<b>COURS</b>	.....	191
<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement .....	197
	Exercices d'approfondissement .....	201
	Contrôles .....	206
<b>CORRIGÉS</b>	.....	211

## Corps humain et santé

### 9 Quelques aspects de la réaction immunitaire

---

<b>COURS</b>	.....	249
<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement .....	233
	Exercices d'approfondissement .....	239
	Contrôles .....	241
<b>CORRIGÉS</b>	.....	243

### 10 Le réflexe myotatique, un exemple de communication nerveuse

---

<b>COURS</b>	.....	251
<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement .....	261
	Exercices d'approfondissement .....	266
	Contrôles .....	268
<b>CORRIGÉS</b>	.....	271

## 11 Cortex, motricité et plasticité cérébrale

---

<b>COURS</b>	.....	279
<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement .....	286
	Exercices d'approfondissement.....	293
	Contrôles .....	295
<b>CORRIGÉS</b>	.....	298

## ENSEIGNEMENT DE SPÉCIALITÉ

## 12 Énergie et cellule vivante

---

<b>COURS</b>	.....	305
<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement .....	315
	Exercices d'approfondissement.....	321
	Contrôles .....	322
<b>CORRIGÉS</b>	.....	324

## 13 Atmosphère, hydrosphère, climats : du passé à l'avenir

---

<b>COURS</b>	.....	329
<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement .....	338
	Exercices d'approfondissement.....	343
	Contrôles .....	345
<b>CORRIGÉS</b>	.....	347

## 14 Glycémie et diabète

---

<b>COURS</b>	.....	353
<b>EXERCICES</b>	Exercices d'application • Exercices d'entraînement .....	361
	Exercices d'approfondissement.....	367
	Contrôles .....	368
<b>CORRIGÉS</b>	.....	371

## ANNEXE

<b>Méthodologie</b>	.....	377
---------------------	-------	-----



## 1

# Brassage et diversité génétiques

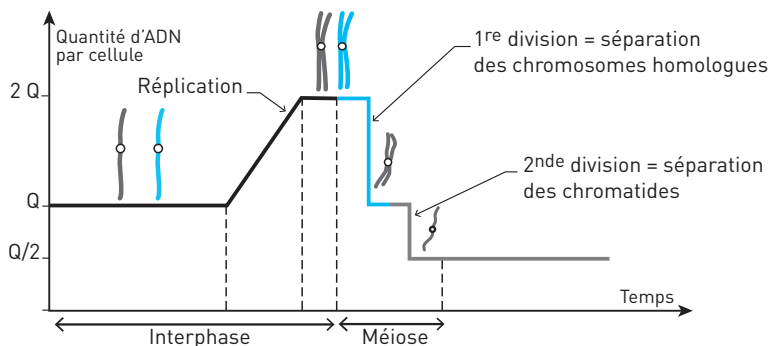
La transmission du matériel génétique par mitose au sein d'un organisme a été vue en première. Les mutations (erreurs de réplication) peuvent créer de nouveaux allèles et donc de la diversité génétique. Par exemple, dans l'espèce humaine, un tiers des gènes existent sous la forme de nombreux allèles, on dit qu'ils sont polymorphes. Cependant la diversité du vivant est principalement due au réarrangement du matériel génétique lors de la **reproduction sexuée**. Cette création de nouvelles combinaisons d'allèles se nomme le **brassage génétique**. Il se fait au niveau de la méiose et lors de la fécondation.

## I LA MÉIOSE

La méiose se déroule dans les organes sexuels, elle permet de produire les **gamètes haploïdes** (ayant un exemplaire de chaque chromosome, cellule à  $n$  chromosomes) à partir d'une cellule germinale **diploïde** (ayant des paires de chromosomes, cellule à  $2n$  chromosomes).

■ Avant la méiose, l'ADN est répliqué au cours de l'interphase, chaque chromosome possède après la réplication deux chromatides.

### Doc 1 Quantité d'ADN et état des chromosomes lors de la méiose



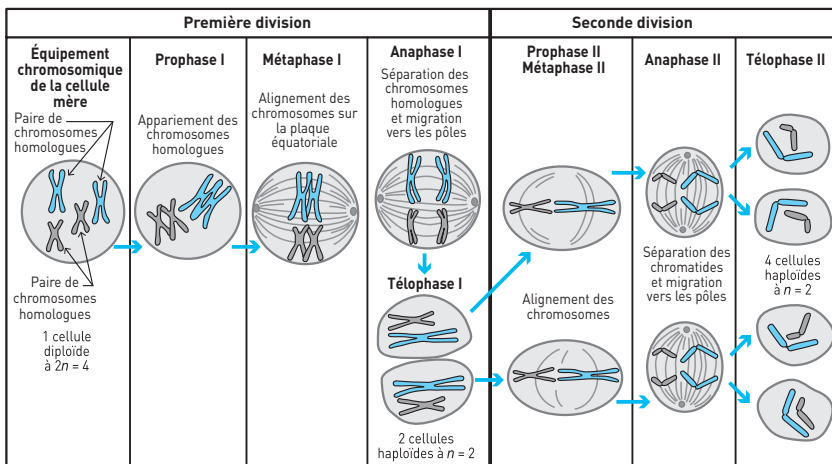
■ La méiose est la **succession de deux divisions cellulaires**. La première division consiste à séparer les chromosomes homologues au sein de chaque paire, la seconde à séparer les chromatides au sein de chaque chromosome.

*Remarque* : Il n'y a pas de réplication entre ces deux divisions.

À la fin de la méiose, chaque gamète possède  $n$  chromosomes, un chromosome de chaque paire.

**EXEMPLE :** Une cellule à  $2n = 4$  forme des gamètes qui possèdent chacun  $n = 2$  chromosomes. Une cellule à  $2n = 6$  forme des gamètes qui possèdent  $n = 3$  chromosomes.

## Doc 2 Les chromosomes au cours des étapes de la méiose après réplication



### L'essentiel

La méiose sépare dans un premier temps les chromosomes de chaque paire puis les chromatides de chaque chromosome. Il y a production de 4 cellules à  $n$  chromosomes à partir d'une cellule à  $2n$  chromosomes.

## II LES BRASSAGES DE LA MÉIOSE

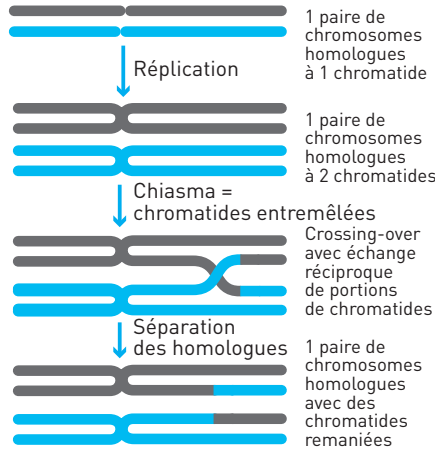
Les quatre gamètes produits à l'issue de la méiose sont différents par la combinaison des allèles qu'ils possèdent. Deux types de brassage sont à l'origine de cette diversité des gamètes.

### 1. Les échanges entre chromosomes homologues ou brassage intrachromosomique

#### ■ Crossing-over (CO)

Au cours de la prophase I de méiose, les chromatides des chromosomes homologues s'emmêlent au niveau des **chiasmats**. Des échanges de fragments de chromatides (crossing-over) peuvent se produire à ce niveau, entre chromosomes homologues d'une même paire.

## Doc 3 Crossing-over



■ Dans certains cas, un crossing-over inégal aboutit à l'ajout d'un gène sur un chromosome. Il y a alors présence de deux gènes identiques sur le même chromosome. Ce processus conduit à une **duplication de gènes**. Le gène est présent en deux exemplaires identiques sur la même chromatide. Ces deux séquences d'ADN subissent ensuite des mutations différentes pouvant conduire à la création de deux gènes différents codant pour deux protéines différentes. C'est l'un des mécanismes à l'origine des **familles multigéniques** comme celle des opsines vue l'année dernière.

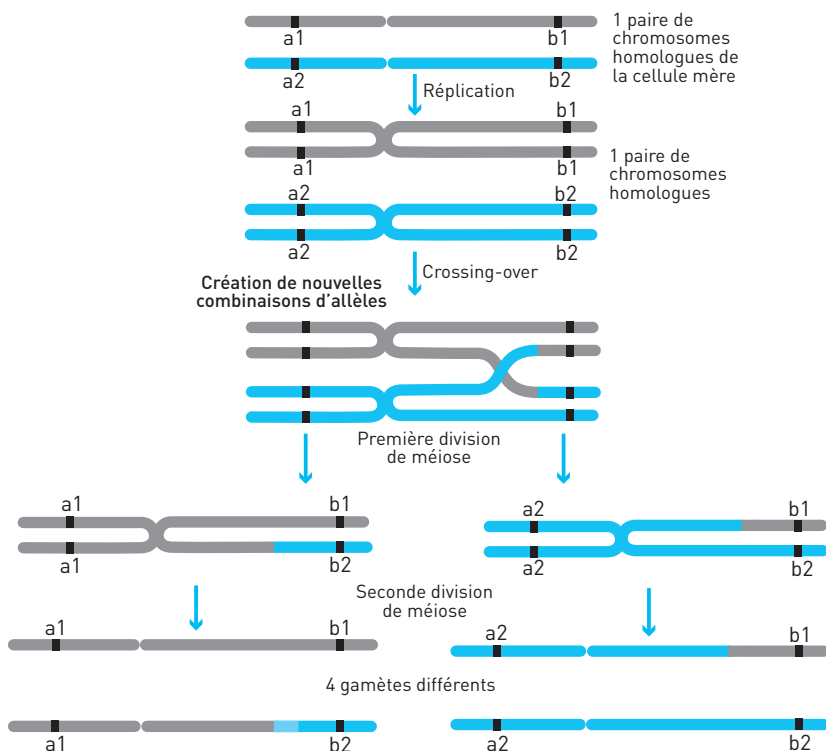
Dans ce dernier cas il y a avantage mais ces anomalies chromosomiques entraînent des **conséquences le plus souvent néfastes** (portions de chromosomes en plus ou en moins).

■ **Le brassage intrachromosomique : résultat du crossing-over**

Le crossing-over conduit à la création de chromosomes remaniés qui ne contiennent plus les mêmes associations d'allèles que les chromatides initiales. Il permet le **brassage d'allèles de gènes** présents sur une même paire de chromosomes homologues dits **gènes liés**.

On peut prendre l'exemple de deux gènes A et B présents sur le même chromosome et existant chacun sous deux formes ou allèles (document 4). On part d'une cellule hétérozygote pour ces deux gènes, de génotype (a1, b1 // a2, b2).

## Doc 4 Brassage intrachromosomique



Il existe alors plusieurs combinaisons possibles d'allèles : 4 pour deux gènes et  $2^x$  pour  $x$  gènes présents sur un même chromosome. Ces chromosomes remaniés vont ensuite subir la fin de la méiose.

La probabilité d'avoir un crossing-over entre deux gènes dépend de la distance qui les sépare sur le chromosome. Plus ils sont éloignés, plus il y a de chances qu'un CO se produise entre eux et plus il y a de chances qu'un brassage intrachromosomique se produise.

#### L'essentiel

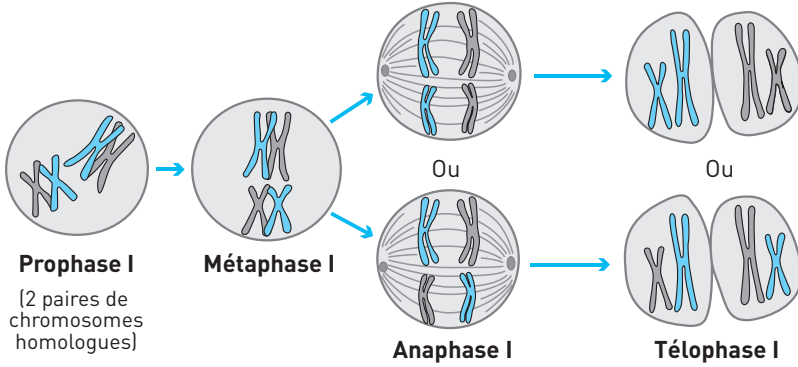
Le brassage intrachromosomique a lieu en prophase I de la méiose. Il y a échange réciproque de portions de chromatides entre chromosomes homologues (crossing-over), ce qui crée un brassage des allèles des gènes liés.

## 2. Les nouvelles associations de chromosomes ou brassage interchromosomique

### ■ La disjonction des chromosomes homologues

Lors de l'anaphase I il y a **séparation aléatoire des chromosomes** au sein de chaque paire, ce qui conduit à de nouvelles associations de chromosomes en fin de première division.

#### Doc 5 Disjonction aléatoire des paires de chromosomes homologues

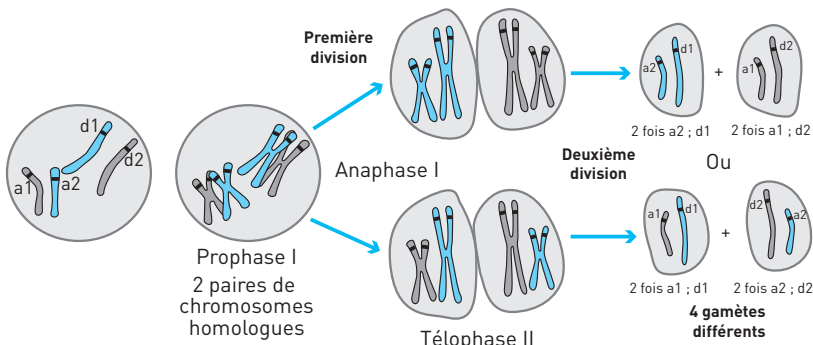


Il existe alors plusieurs combinaisons possibles de chromosomes : 4 pour 2 chromosomes et  $2^n$  pour  $n$  chromosomes différents.

### ■ Le brassage interchromosomique résultant

La disjonction aléatoire des chromosomes en anaphase I permet le brassage d'allèles de **gènes présents sur des chromosomes différents** ou **gènes indépendants**. On peut prendre l'exemple de deux gènes A et D présents sur deux paires de chromosomes différents et ayant chacun deux allèles (document 6). On part d'une cellule hétérozygote pour ces deux gènes, de génotype ( $a1//a2 ; d1//d2$ ).

#### Doc 6 Brassage interchromosomique



Le jeu du brassage des paires de chromosomes déjà remaniés conduit à une diversité potentiellement infinie de gamètes. Les deux brassages ont lieu, ce qui conduit à  $2^{2n}$  combinaisons d'allèles possibles dans les gamètes.

**EXEMPLE :** L'Homme possède 23 paires de chromosomes et environ 1 000 gènes par chromosome, ce qui donne  $2^{23\ 000}$  combinaisons de gamètes différentes pour l'Homme.

### L'essentiel

Le brassage interchromosomique a lieu en anaphase I de la méiose. Les paires de chromosomes homologues sont séparées de manière aléatoire de part et d'autre du plan équatorial. Cela entraîne une multitude d'associations possibles des  $n$  chromosomes réunis dans les cellules filles issues de la première division de méiose. Il y a brassage des allèles des gènes portés par les chromosomes non homologues (gènes indépendants).

## III LA FÉCONDATION

Au cours de la fécondation, un gamète mâle et un gamète femelle haploïdes s'unissent : leur fusion conduit à un **zygote** ou **cellule-œuf diploïde**. Il y a fusion des cellules, puis des matériels génétiques.

### 1. Le brassage génétique lié à la fécondation

■ Si deux individus produisent chacun 4 types de gamètes ayant des combinaisons d'allèles différentes, on a donc 16 combinaisons de zygotes différentes. Pour chaque gamète maternel on a 4 gamètes paternels possibles.

#### Doc 7 Tableau de recombinaison des gamètes

Combinaisons  
d'allèles  
maternelles

	a1 b1	a1 b2	a2 b2	a2 b1	
a1 b1	a1/a1 b1/b1	a1/a1 b1/b2	a1/a2 b1/b2	a1/a2 b1/b1	← Combinaisons d'allèles paternelles
a1 b2	a1/a1 b1/b2	a1/a1 b2/b2	a1/a2 b2/b2	a1/a2 b2/b1	
a2 b2	a2/a1 b2/b1	a2/a1 b2/b2	a2/a2 b2/b2	a2/a2 b2/b1	
a2 b1	a2/a1 b1/b1	a2/a1 b1/b2	a2/a2 b1/b2	a2/a2 b1/b1	

Combinaisons d'allèles  
des zygotes

La diversité génétique potentielle des zygotes est immense.

**EXEMPLE :** Pour l'espèce humaine on a donc  $(2^{23})^2$  combinaisons d'allèles dans les zygotes possibles, soit  $2^{46\ 000}$  ce qui est très supérieur aux 7 milliards d'humains.

■ Chaque zygote contient une combinaison unique et nouvelle d'allèles. Seule une fraction de ces zygotes est viable et se développe. Certaines combinaisons de génotypes ne permettent pas un développement embryonnaire normal ou la viabilité de l'individu qui les porte.

## 2. Origine des anomalies chromosomiques

■ Occasionnellement, une répartition anormale des chromosomes peut se produire lors de la méiose. Il y a alors un nombre anormal de chromosomes dans les gamètes produits : deux exemplaires ou aucun pour un chromosome. La fusion avec un gamète normal ayant un exemplaire de chaque chromosome donnera un **zygote trisomique** possédant trois exemplaires du chromosome ou **monosomique** s'il ne possède qu'un exemplaire.

■ La plupart de ces anomalies ne permettent pas le développement du zygote. Cependant, certaines comme la **trisomie 21** sont visibles chez des humains, car elles ne perturbent pas assez le développement et le fonctionnement de l'organisme pour être létales.

### L'essentiel

L'association au hasard des allèles de deux gamètes haploïdes chez le zygote renforce la diversité engendrée par les brassages dus à la méiose.

## SAVOIR-FAIRE

### Vocabulaire

■ **Gène et allèle** : Un gène est une portion de chromosome, donc une séquence d'ADN qui code pour une protéine. Cette séquence de nucléotides peut exister sous plusieurs formes ou allèles.

■ **Cellule haploïde** : Cellule ayant un seul exemplaire de chaque chromosome, on la note à  $n$  chromosomes. Ce sont les gamètes issus de la méiose dans l'espèce humaine.

■ **Cellule diploïde** : Cellule ayant deux exemplaires de chaque chromosome, on la note à  $2n$  chromosomes. Ce sont par exemple le zygote, puis toutes les cellules de l'organisme humain sauf les gamètes. Pour les paires de chromosomes homologues, chaque gène est présent deux fois, un gène par chromosome homologue. Il y a donc deux allèles du gène.

■ **Homozygote/hétérozygote** : Si les deux allèles d'un gène sont identiques, la cellule est dite **homozygote** pour le gène étudié. Si les deux allèles sont différents, la cellule est dite **hétérozygote** pour le gène étudié.

■ **Chromosome/chromatide** : Molécule d'ADN plus ou moins condensée. Un chromosome possède une chromatide dans une cellule en début d'interphase, il possède deux chromatides dans une cellule en début de mitose ou de méiose après la réplication.

## Compétence

### ■ Déterminer la position relative de deux gènes

Grâce à l'étude de croisements on peut localiser relativement des gènes, pris deux à deux : savoir s'ils sont sur des chromosomes différents (indépendants) ou sur le même (liés). Pour cela on étudie la descendance d'un individu hétérozygote pour les deux gènes (le plus souvent individu de F1) croisé avec un individu homozygote récessif pour les deux gènes (ce type de croisement est souvent appelé « test-cross »).

La proportion des phénotypes de ces descendants dépend uniquement de la proportion des combinaisons d'allèles des gamètes produits par les hétérozygotes (F1). Si les proportions sont en 1/4 pour les quatre phénotypes possibles, les F1 ont produit 4 types de gamètes en quantité égale, ce qui signifie que les gènes se comportent de manière indépendante et sont donc sur des chromosomes différents. Si les proportions ne sont pas en 1/4 pour les quatre phénotypes possibles, les combinaisons d'allèles identiques à celles des parents de la F1 sont plus représentées. Les combinaisons d'allèles sont peu remaniées car seuls les crossing-over peuvent provoquer des remaniements. Les gènes sont liés, donc sur le même chromosome.

(La survenue de crossing-over explique la création de nouvelles associations par brassage intrachromosomique.)

## Repères

### 1. Reconnaître les étapes de la méiose et être capable de les commenter

Savoir remettre des photographies d'étapes de méiose dans l'ordre chronologique et expliquer le comportement des chromosomes au cours des étapes.

### 2. Distinguer les trois types de brassage génétique

Brassages liés à la méiose :

- brassage intrachromosomique : réassocie les allèles portés par un même chromosome (gènes liés) ;
- brassage interchromosomique : réassocie les chromosomes entre eux, donc les allèles des gènes qu'ils portent (gènes indépendants), mélange des allèles portés par des chromosomes différents.

Brassage lié à la fécondation : rétablit la diploïdie et associe au hasard les multiples combinaisons alléliques des gamètes (accentue le brassage méiotique).



## EXERCICES D'APPLICATION

1 QCM

★ 10 min ▶ P. 23

**Repérez les affirmations correctes.**

Chaque série d'affirmations peut comporter une ou plusieurs réponses exactes.

**1. La méiose :**

- a. permet le passage de l'état diploïde à l'état haploïde.
- b. n'est pas précédée par une réplication.
- c. comporte deux divisions.
- d. produit les gamètes.

**2. La première division de méiose :**

- a. sépare les chromatides des chromosomes.
- b. sépare les chromosomes de chaque paire.
- c. est suivie d'une réplication.
- d. permet le brassage intrachromosomique.
- e. permet le brassage interchromosomique.

**3. La fécondation :**

- a. permet le passage de l'état diploïde à l'état haploïde.
- b. correspond à la fusion de deux noyaux haploïdes.
- c. produit un zygote diploïde.
- d. annule le brassage génétique de la méiose.

**4. Le crossing-over :**

- a. se déroule pendant l'anaphase I.
- b. se déroule pendant la prophase I.
- c. se réalise entre chromosomes homologues.
- d. permet le brassage des allèles de gènes indépendants.
- e. permet le brassage intrachromosomique.

**5. Les allèles d'un gène :**

- a. sont présents en deux exemplaires chez un diploïde.
- b. sont placés sur des chromosomes homologues.
- c. sont séparés lors de la première division de méiose.
- d. sont séparés lors de la seconde division de méiose.
- e. sont assemblés lors de la fécondation.

## 2 LES ÉTAPES DE LA MÉIOSE

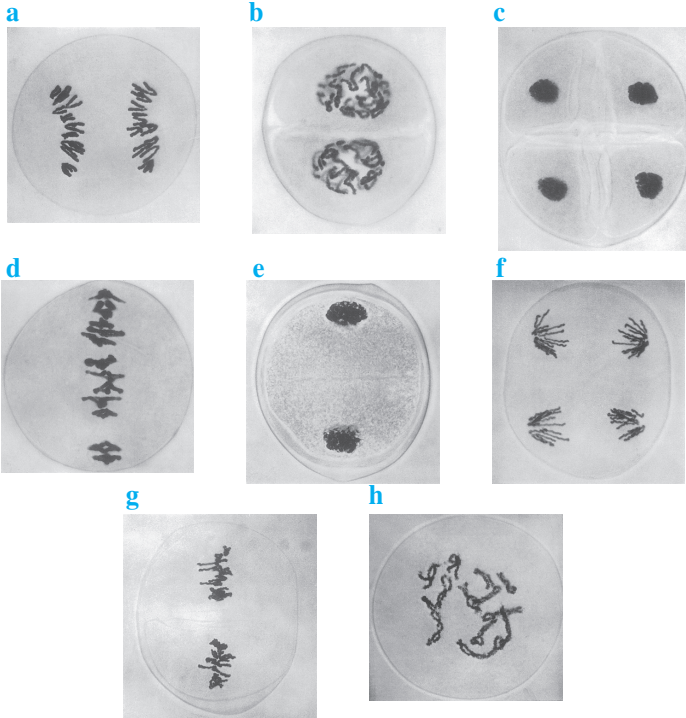


10 min



Ajoutez le nom des étapes et remplacez-les dans l'ordre chronologique.

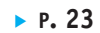
**Doc 8** Étapes de la méiose lors de la formation de grains de pollen d'une plante à fleurs  $2n = 24$



## 3 UNE ÉTAPE DE LA MÉIOSE

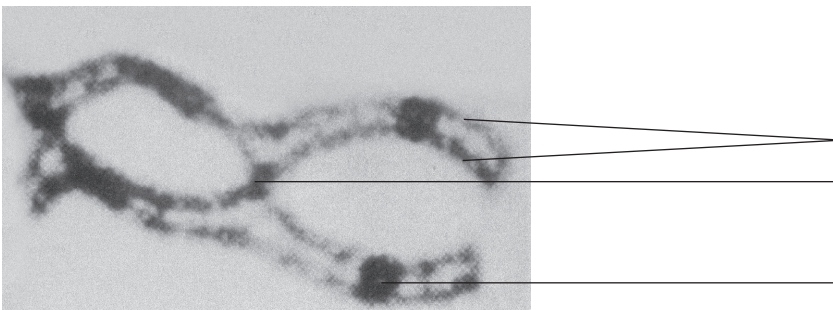


15 min



1. Annotez la photographie suivante. Nommez ces chromosomes.
2. Que se passe-t-il entre les deux chromosomes ?
3. Quel mécanisme de brassage est alors possible ?

**Doc 9** Photographie d'une paire de chromosomes en prophase I de méiose



## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

1

4

LE DÉTERMINISME GÉNÉTIQUE  
D'UN CARACTÈRE

★★

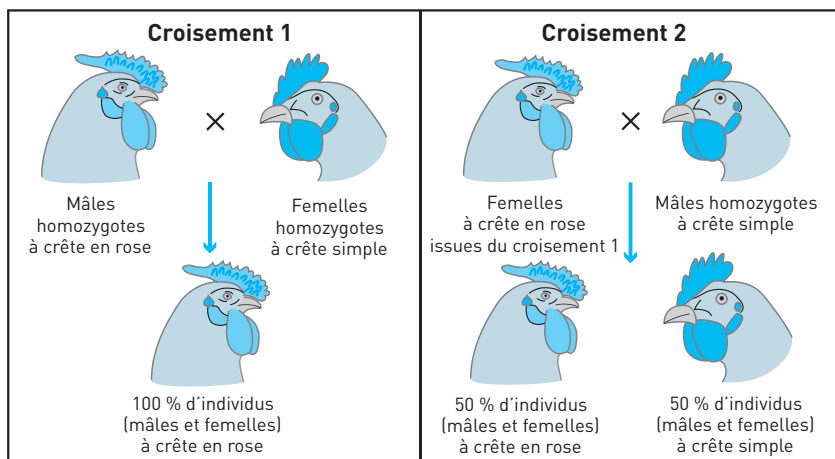
25 min

▶ P. 23

On formule l'hypothèse que chez la poule la forme de la crête est gouvernée par un seul couple d'allèles.

Étudiez les croisements présentés dans le document afin d'indiquer si les résultats obtenus permettent de valider cette hypothèse.

## Doc 10 Résultats de croisements effectués chez la poule



Dans les croisements réalisés, les résultats sont les mêmes en inversant le sexe des parents.

Il faut avancer dans l'analyse pas à pas : définir le couple d'allèles, les relations de dominance et récessivité, les génotypes des individus, enfin voir si l'hypothèse est justifiée par les descendants obtenus.

5

## DES ANOMALIES DE LA MÉIOSE

★★

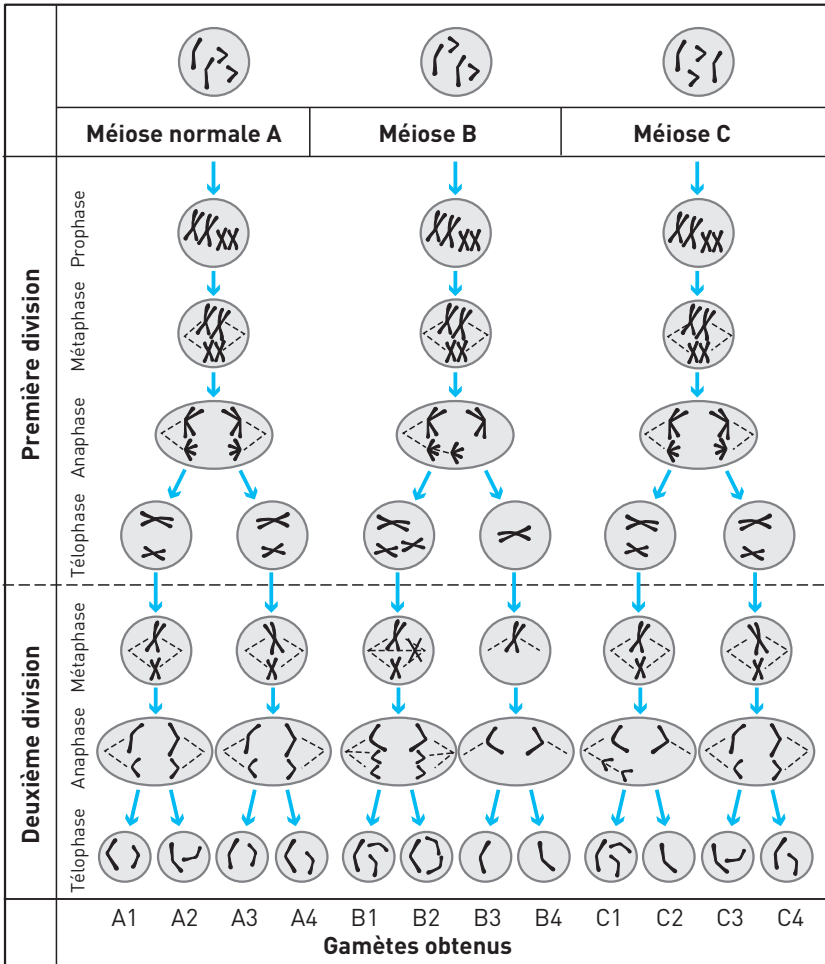
20 min

▶ P. 24

Repérez l'anomalie de certains gamètes des méioses B et C. Identifiez, dans chaque cas, les étapes de la méiose conduisant à la production de ces gamètes anormaux.

Il faut étudier chaque cas représenté pour repérer les anomalies éventuelles dans les gamètes et en déduire quelle étape de la méiose est anormale dans ce cas.

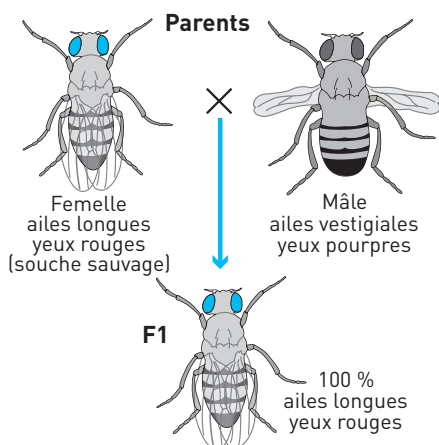
## Doc 11 Schéma de la garniture chromosomique des cellules



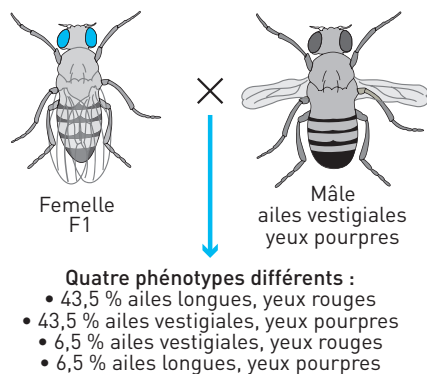
## 6 ÉTUDE DE DEUX GÈNES CHEZ LA DROSOPHILE ★★★ 40 min ► P. 25

On étudie chez la drosophile la transmission de deux couples d'allèles codant pour deux caractères : la couleur des yeux et la longueur des ailes. Les parents sont homozygotes pour les deux gènes étudiés.

## Doc 12 Premier croisement



## Doc 13 Deuxième croisement



1. Identifiez les gènes et allèles suivis.
2. Donnez les relations de dominance et de récessivité.
3. D'après les résultats du second croisement quelle est l'hypothèse sur la localisation des deux gènes suivis ? Sont-ils liés ou indépendants ?

Voir **Savoir-faire**, Compétence « Déterminer la position relative de deux gènes ».

4. Notez les génotypes des individus des deux croisements et démontrez votre hypothèse à l'aide de schémas des chromosomes.

## EXERCICES D'APPROFONDISSEMENT

**7 LES CAUSES POSSIBLES DE LA TRISOMIE 21** ★★★ 30 min ▶ P. 27

Méiose et fécondation participent à la stabilité du caryotype des individus de l'espèce. Pourtant, certains individus présentent un caryotype anormal : leurs cellules possèdent trois chromosomes 21.

Après avoir expliqué rapidement comment la méiose et la fécondation assurent la stabilité du caryotype, vous résumerez les perturbations du déroulement de la méiose qui conduisent à une trisomie 21.

*Remarque* : Le texte sera accompagné de schémas dans lesquels la formule chromosomique de la cellule sera simplifiée à  $2n = 4$ .

Dans un premier temps, vous devez faire un exposé court du rôle de la méiose et de la fécondation dans le maintien du caryotype (pas de notion de brassage à exposer !). Ensuite vous résumez les différentes causes de trisomie à l'aide d'un texte court accompagné d'un schéma bilan ou de plusieurs schémas. Ne développez pas trop.

**8 CROISEMENTS ET AMÉLIORATION DES ESPÈCES** ★★ 40 min ▶ P. 28

Chez le porc d'élevage, on étudie le gène responsable d'une sensibilité accrue au stress. Ce gène existe sous deux formes : allèles N et n.

**Doc 14 Effets du stress chez le porc d'élevage**

Le stress peut être facilement fatal aux porcs d'élevage. Un gène à l'origine de cette sensibilité a été identifié ; il existe sous deux formes : l'allèle n et l'allèle N. Il influence également la qualité de la viande.

Génotype	Sensibilité au stress	Qualité de la viande
N//N	faible	bonne
N//n	faible	très bonne
n//n	très forte (mortalité importante)	mauvaise

À partir de la comparaison des deux croisements ( $N//N \times n//n$  et  $N//n \times N//n$ ), déterminez quel est le croisement le plus judicieux pour obtenir des individus peu sensibles au stress et produisant une viande de très bonne qualité.

Il faut d'abord rechercher le génotype le plus intéressant pour l'éleveur, puis étudier les deux croisements pour déterminer le plus judicieux pour obtenir ce génotype.

## CONTRÔLE

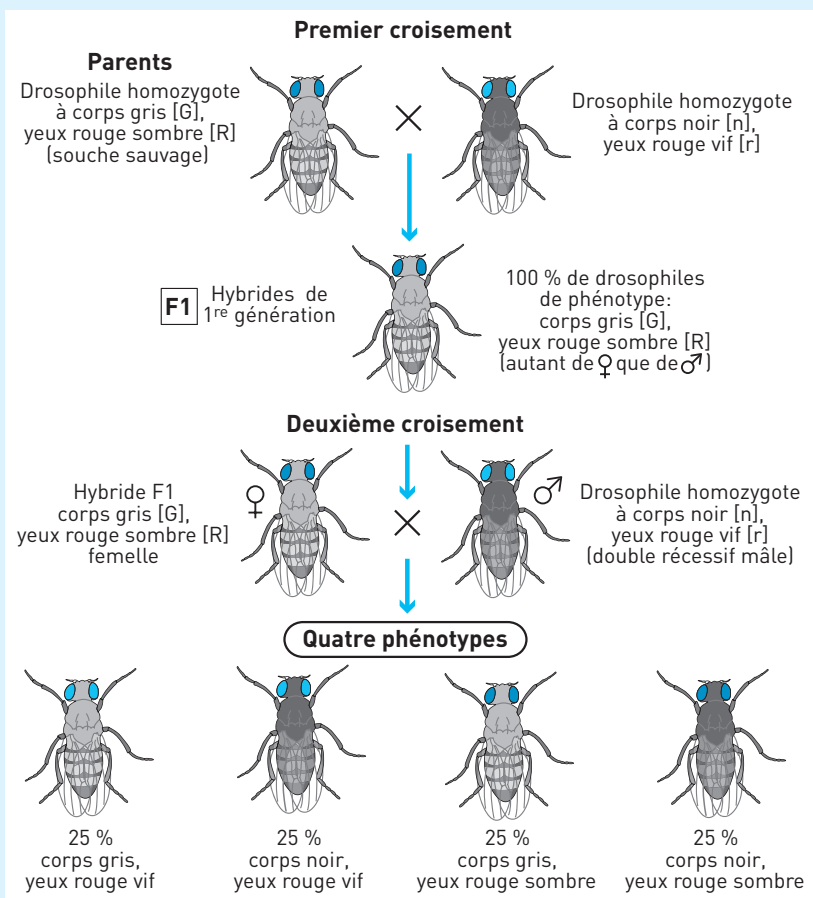
9

ÉTUDE DE DEUX GÈNES  
CHEZ LA DROSOPHILE

★★★ 40 min ▶ P. 29

On étudie chez la drosophile la transmission de deux couples d'allèles codant pour deux caractères : la couleur des yeux et la couleur du corps.

## Doc 15 Deux croisements chez la drosophile



D'après les résultats des croisements comment sont localisés les deux gènes suivis ? Sont-ils liés ou indépendants ? Vous devrez prouver votre hypothèse à l'aide de schémas montrant le comportement des chromosomes lors de ces deux croisements.

N'oubliez pas de définir les gènes, les relations de dominance et récessivité entre leurs allèles, avant de les suivre dans les croisements. Ensuite il faut regarder le résultat du test-cross pour avancer une hypothèse (gènes liés ou indépendants) en fonction des proportions de descendants. Finalement, l'étude du devenir des allèles dans ces croisement permet de valider ou non votre hypothèse.

## 10 REPRODUCTION SEXUÉE ET DIVERSITÉ DES GÉNOMES

★★★ | 60 min | ► P. 30

La reproduction sexuée crée de nouvelles combinaisons alléliques d'une génération à la suivante. Par une série de schémas, vous illustrerez les mécanismes assurant le brassage génétique.

Vous prendrez comme exemple la descendance de deux parents diploïdes hétérozygotes pour 3 gènes (A, B et C) de génotype :

$$\begin{array}{ccc} \underline{a^+ b^+} & \underline{c^+} & \\ a & b & c \end{array}$$

Vous organiserez votre réponse avec une introduction, un plan structuré et une conclusion.



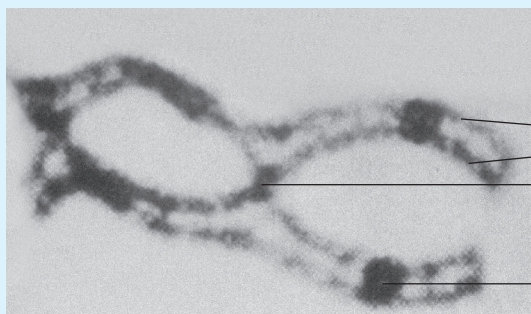
## CORRIGÉS

1

1. La méiose : a ; c ; d.    2. La première division de méiose : b ; d ; e.  
 3. La fécondation : b ; c.    4. Le crossing-over : b ; c ; e.  
 5. Les allèles d'un gène : a ; b ; d ; e

2 a : anaphase I ; b : prophase II ; c : télophase II ; d : métaphase I ; e : télophase I ; f : anaphase II ; g : métaphase II ; h : prophase I.  
 Chronologie : h – d – a – e – b – g – f – c.

## 3 Doc 16 Photographie annotée



2 chromatides

chiasma

centromère

1. Ces chromosomes forment une paire, ce sont donc des **chromosomes homologues**.  
 2. Il peut y avoir échange de portion de chromatides entre les deux chromosomes, donc un **crossing-over**.  
 3. Le mécanisme de brassage associé au crossing-over en prophase 1 est le **brassage intrachromosomique**.

4 On part de l'hypothèse que le caractère « forme de la crête » chez les poules est gouverné par un seul couple d'allèles, donc un seul gène.

▲ Dans un premier temps, on attend que vous nommiez le couple d'allèles puis les relations de dominance et récessivité.

On a un gène C qui code pour la forme de la crête chez les poules.

Il existe sous la forme de deux allèles :

- allèle r dont l'expression donne une crête en rose ;
- allèle s dont l'expression donne une crête simple.

On définit les relations de dominance et de récessivité à partir des hétérozygotes de F1. Les individus de F1 sont tous à crête en rose, ce qui est donc le caractère dominant. On en déduit que l'allèle r est dominant sur l'allèle s.

▲ Il est alors possible de donner les génotypes des individus et de voir si l'hypothèse est vérifiée.

## Analyse

### • Croisement 1

Mâle homozygote à crête en rose :  $r/r$

Femelle homozygote à crête simple :  $s/s$

F1 : Hétérozygotes à crête en rose :  $r/s$

### • Croisement 2

Femelle hétérozygote à crête en rose :  $r/s$  qui peut donner des gamètes portant l'allèle  $s$  ou  $r$  en égale quantité.

Mâle homozygote à crête simple :  $s/s$  qui ne peut donner que des gamètes portant l'allèle  $s$ .

On fait alors le tableau de recombinaison des gamètes.

		$r$	$s$	← Types de gamètes maternels
Types de gamètes paternels	$s$	$r/s$ crête en rose	$s/s$ crête simple	← Génotypes et phénotypes des zygotes

## Conclusion

On a bien comme dans l'exemple la moitié des descendants avec crête en rose et la moitié avec crête simple. Les résultats du croisement liés à l'hypothèse sont en accord avec les résultats, elle est donc bien validée.

**5** On a une cellule mère à  $2n = 4$ , chaque gamète doit être à  $n = 2$ , avec deux chromosomes différents.

**Ne pas oublier de conclure en répondant à la question posée pour chaque cas.**

### Méiose A

- Analyse : On a une cellule mère à  $2n = 4$ , chaque gamète doit être à  $n = 2$ , avec deux chromosomes différents.

- Conclusion : C'est une méiose normale, qui produit des gamètes haploïdes.

### Méiose B

- Analyse : Tous les gamètes sont anormaux. B1 et B2 ont trois chromosomes. Deux homologues (d'une même paire) et un différent. B3 et B4 ont un seul chromosome.

- Conclusion : L'anomalie de répartition des chromosomes se fait lors de la **première division**. On voit qu'en télophase I, une cellule contient trois chromosomes et l'autre un seul. Lors de l'anaphase I la disjonction des chromosomes homologues au sein d'une paire (paire de petits chromosome) ne se fait pas. Une cellule hérite des deux homologues et l'autre d'aucun. La seconde division en séparant les chromatides conserve cette mauvaise répartition.

### Méiose C

- Analyse : Les gamètes C3 et C4 sont normaux, C1 a 3 chromosomes et C2 un seul.

• Conclusion : L'anomalie de répartition des chromosomes se fait lors de la **seconde division**. On voit qu'en télophase II qui donne les cellules C1 et C2, la cellule C1 contient trois chromosomes et C2 un seul. Lors de l'anaphase II la disjonction des chromatides au sein d'un chromosome ne se fait pas correctement. Le plus grand chromosome se sépare normalement, pour le plus petit les deux chromatides migrent dans la même cellule fille.

6

Voir les remarques de l'exercice 4.

1. On note **A** le gène qui code pour la longueur des ailes.

Il existe sous la forme de deux allèles :

- allèle **L** qui détermine la présence d'ailes longues ;
- allèle **v** qui détermine la présence d'ailes vestigiales.

On note **Y** le gène qui code pour la couleur des yeux.

Il existe sous la forme de deux allèles :

- allèle **R** qui détermine la couleur rouge ;
- allèle **p** qui détermine la couleur pourpre.

2. Pour connaître les relations de dominance et récessivité entre allèles d'un même gène, il faut étudier le phénotype des hétérozygotes afin de savoir quel caractère s'exprime aux dépens de l'autre. On étudie donc le phénotype des F1 qui ont les deux allèles différents venant de chaque parent pour les deux gènes.

Ils ont tous des ailes longues, c'est donc le caractère dominant et on dit que l'allèle **L** est dominant sur **v**.

Ils ont tous des yeux rouges, c'est donc le caractère dominant et on dit que l'allèle **R** est dominant sur **p**.

3. Les résultats du 2<sup>e</sup> croisement ne sont pas en proportions équitables avec un quart pour chaque phénotype. Les phénotypes parentaux (ailes longues, yeux rouges et ailes vestigiales, yeux pourpres) représentent 87 % des descendants. Les gènes semblent donc être localisés sur le même chromosome car les associations d'allèles des parents se retrouvent très préférentiellement chez les descendants. Les **gènes** sont dits **liés**.

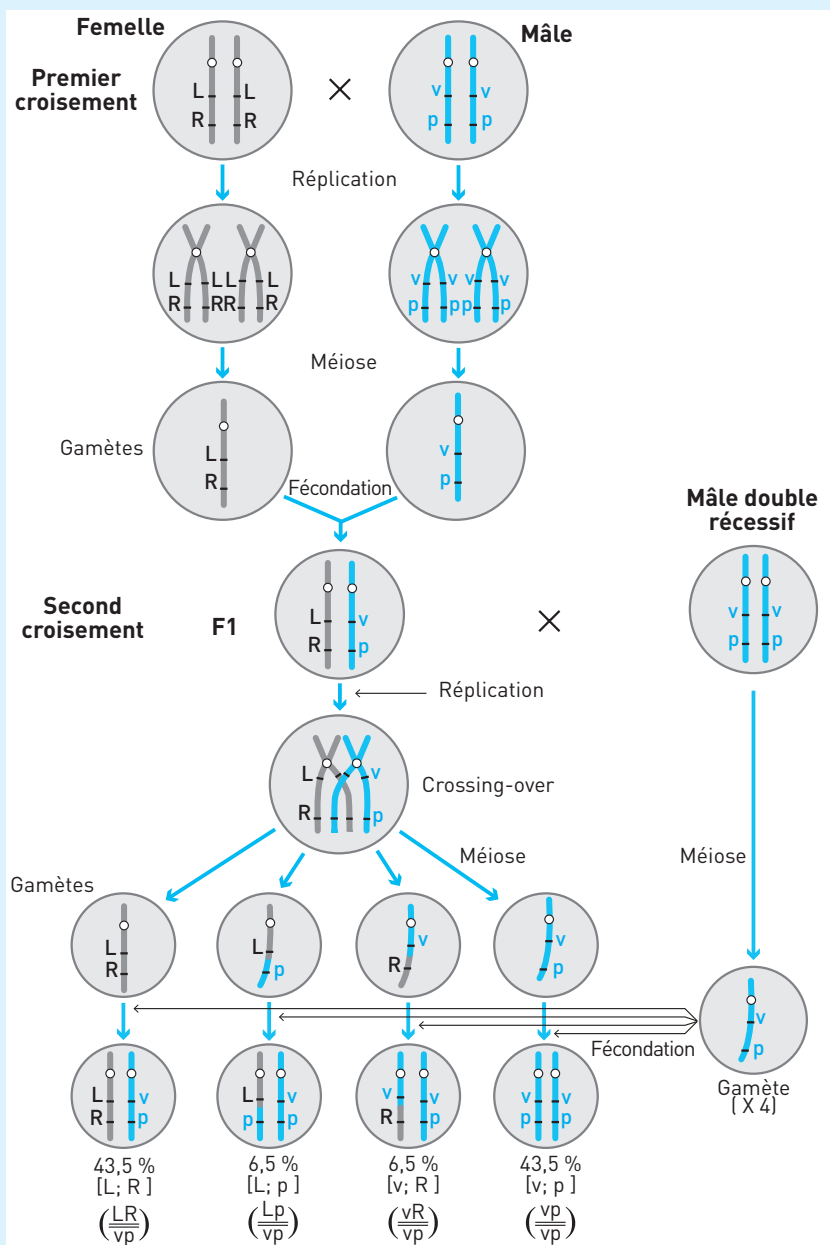
#### 4. Phénotypes et génotypes du croisement 1

- Femelle, ailes longues et yeux rouges, phénotype noté [L ; R] et lignée pure, donc homozygote pour les deux gènes : génotype (LR/LR).
- Mâle, ailes vestigiales et yeux pourpres, phénotype noté [v ; p] et donc génotype (vp/vp).
- F1, ailes longues et yeux rouges, phénotype noté [L ; R] et génotype (LR/vp) car hétérozygote pour les deux gènes.

#### Phénotypes et génotypes du croisement 2

- Femelle F1, ailes longues et yeux rouges, phénotype noté [L ; R] et génotype (LR/vp).
- Mâle F1, ailes vestigiales et yeux pourpres, phénotype noté [v ; p] et génotype (vp/vp).

## Doc 17 Représentation des chromosomes lors des croisements



**Conclusion.** On obtient plus de descendants issus des gamètes parentaux (87 %) que de descendants issus des gamètes recombinés (13 %). Notre hypothèse est vérifiée, les gènes A et Y sont bien sur le même chromosome, donc liés.

## 7 Méiose et fécondation assurent la stabilité du caryotype

La méiose est une suite de deux divisions précédées d'une seule réplication assurant le passage de la diploïdie à l'haploïdie à partir d'une cellule mère de gamètes.

La première division sépare les chromosomes homologues, donnant deux cellules filles à  $n$  chromosomes à deux chromatides.

La seconde division sépare des chromatides de chaque chromosome donnant des gamètes à  $n$  chromosomes à une chromatide (1 exemplaire de chaque chromosome).

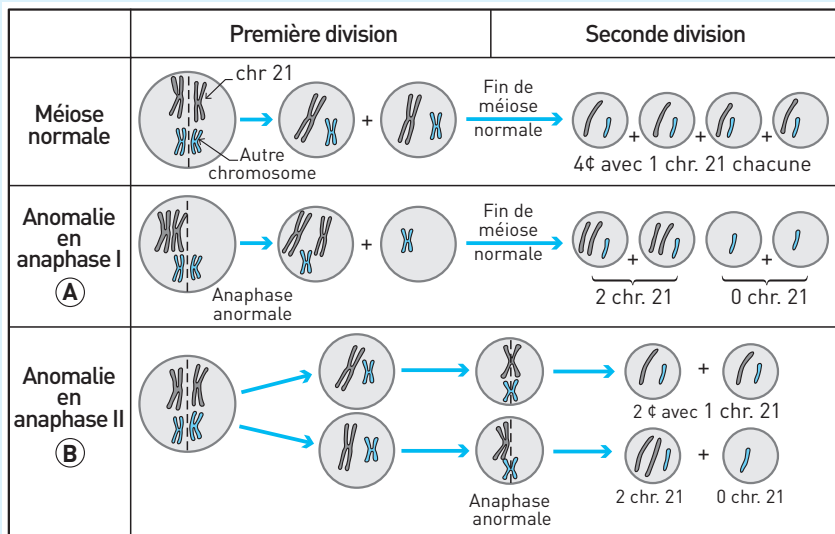
La fécondation est la fusion des deux gamètes haploïdes qui assure le retour à la diploïdie (2 exemplaires de chaque chromosome).

La méiose fournit des cellules haploïdes,  $n = 2$  et la fécondation rétablit le caryotype de départ. La méiose et la fécondation sont des mécanismes complémentaires.

### Perturbations de la méiose qui conduisent à une trisomie

- **Non-séparation des chromosomes homologues lors de la 1<sup>re</sup> division en anaphase I (A).** Une cellule fille hérite d'une paire de chromosomes 21, l'autre d'aucun. La seconde division donne deux cellules avec deux chromatides de chromosome 21 et deux autres sans chromosome 21.
- **Non-séparation des chromatides d'un chromosome 21 lors de la 2<sup>e</sup> division en anaphase II (B)** Une cellule fille hérite des deux chromatides du chromosome 21 et l'autre d'aucun. Les deux cellules filles de l'autre division II sont normales.

### Doc 18 Causes de la trisomie 21



chr. : chromosome ; ¢ : cellule

Certains gamètes contiennent **deux chromatides 21 homologues**. Lors de la fusion avec un gamète normal contenant une chromatide 21, on obtient un **zygote** ayant **trois exemplaires du chromosome 21**. Ce zygote donnera un individu atteint de trisomie 21.

**8** Il existe un gène responsable d'une sensibilité accrue au stress. Ce gène influence également la qualité de la viande. Il existe sous deux formes : allèles N et n.

Il faut d'abord rechercher le génotype le plus intéressant.

D'après l'analyse du tableau :

- les individus homozygotes N//N sont faiblement sensibles au stress et donnent une viande de bonne qualité ;
- les individus homozygotes n//n sont fortement sensibles au stress et donnent une viande de mauvaise qualité.

L'allèle N permettrait une faible sensibilité au stress et la production d'une viande de qualité.

L'allèle n entraînerait une forte sensibilité au stress et la production d'une viande de mauvaise qualité.

L'étude des hétérozygotes N//n révèle un avantage. Ils sont peu sensibles au stress comme les N//N, mais produisent une viande de meilleure qualité.

L'intérêt est donc de produire au maximum ces hétérozygotes peu sensibles au stress et produisant une viande de très bonne qualité.

On étudie deux croisements pour savoir lequel est le plus judicieux pour obtenir le plus de N//n dans la descendance.

- **Premier croisement** : femelle N//N et mâle n//n

Les gamètes possibles sont N pour la femelle et n pour le mâle.

Les descendants sont donc tous N//n.

- **Second croisement** : femelle N//n et mâle N//n

On obtient le tableau de recombinaison de gamètes suivant.

	N	n	← Gamètes paternels
N	N//N	N//n	
n	N//n	n//n	
↑ Gamètes maternels			← Descendants possibles

Il faut faire une conclusion répondant exactement à la question posée.

Le premier croisement avec les parents N//N et n//n est donc plus judicieux, car tous les descendants ont les caractères intéressants : faible sensibilité au stress et viande de très bonne qualité.

9

Voir les remarques de l'exercice 4.

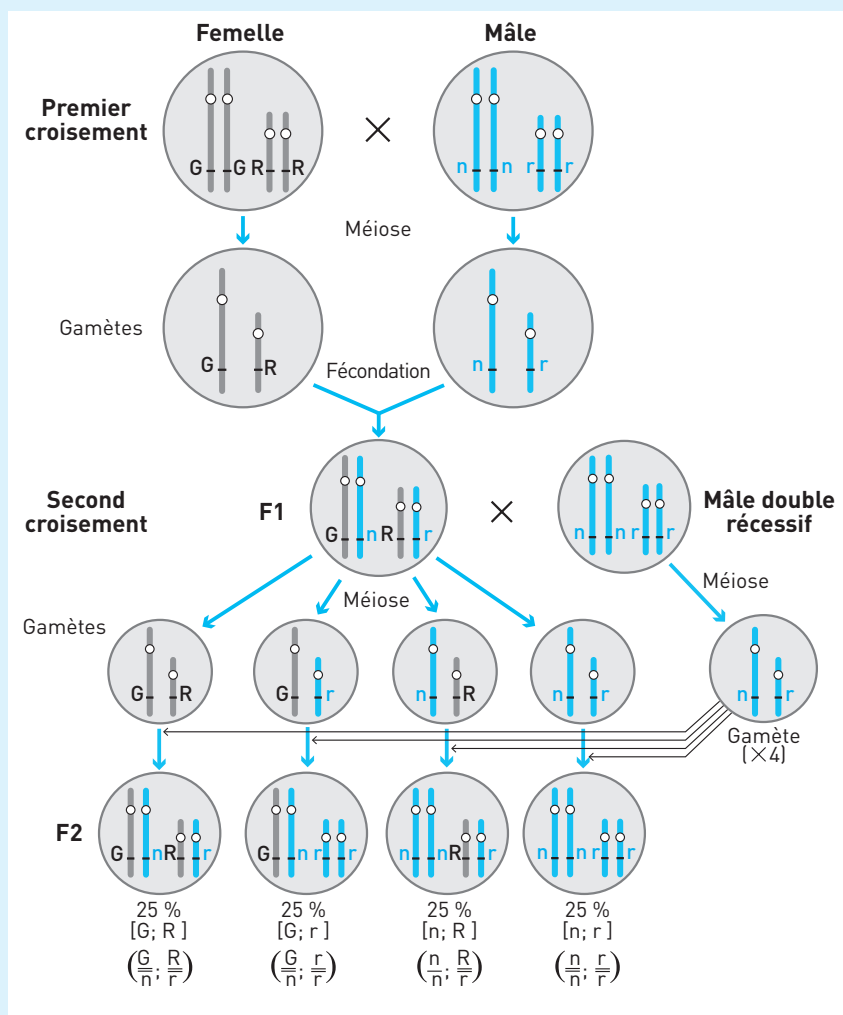
On note **C** le gène qui code pour la couleur du corps. Il existe sous la forme de deux allèles :

- allèle **G** qui détermine la couleur grise ;
- allèle **n** qui détermine la couleur noire.

On note **Y** le gène qui code pour la couleur des yeux. Il existe sous la forme de deux allèles :

- allèle **R** qui détermine la couleur rouge sombre ;
- allèle **r** qui détermine la couleur rouge vif.

### Doc 19 Représentation des chromosomes lors des deux croisements



1

On étudie le phénotype des F1 qui ont les deux allèles différents venant de chaque parent pour les deux gènes afin de déterminer les relations de dominance. Ils ont tous le corps gris, c'est donc le caractère dominant et on dit que l'allèle **G** est dominant sur **n**. Ils ont tous des yeux rouge sombre, c'est donc le caractère dominant et on dit que l'allèle **R** est dominant sur **r**.

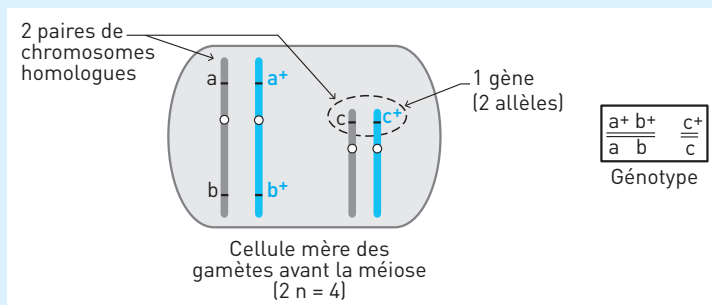
Les résultats du second croisement sont en proportions équitables avec un quart pour chaque phénotype. Les gènes semblent se comporter de manière indépendante. Ils sont localisés sur des chromosomes différents car les associations d'allèles des parents se retrouvent avec la même proportion que les nouvelles associations chez les descendants. Les **gènes** sont dits **indépendants (doc 19)**.

On obtient autant de descendants issus des gamètes parentaux (50 %) que de descendants issus des gamètes recombinés (50 %). Notre hypothèse est vérifiée, les gènes C et Y sont bien sur des chromosomes différents et donc indépendants.

**10 Introduction.** Les mutations sont à l'origine de nouveaux allèles au sein d'un gène et permettent une diversité des génomes. Cependant c'est la reproduction sexuée avec la **méiose** et la **fécondation** qui permet la création de **nouvelles combinaisons d'allèles**. On parle de **brassage génétique**.

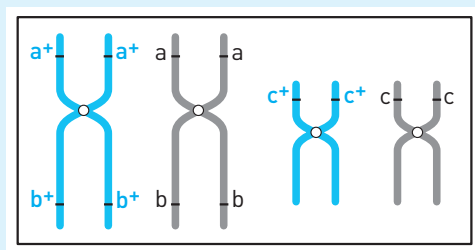
On prend l'exemple de deux parents diploïdes hétérozygotes pour trois gènes (A, B et C) de génotype :  $\frac{a^+ b^+}{a b} \frac{c^+}{c}$

### Doc 20 Représentation des cellules parentales



Ces cellules subissent la réplication avant la méiose pour que le nombre de chromatides double et que la répartition puisse avoir lieu lors de la méiose.

### Doc 21 Résultat de la réplication

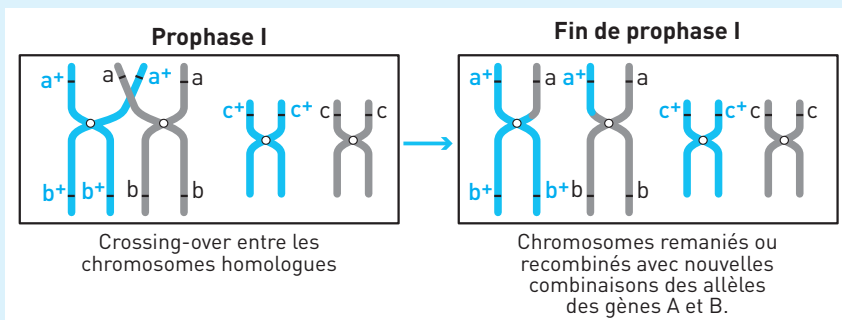




### 1. Le brassage intrachromosomique

Il a lieu en prophase I de méiose quand les chromosomes homologues s'apparient. Il y a échange réciproque de portions de chromatides entre chromosomes homologues uniquement. Cet échange se nomme le **crossing-over**. Il en résulte un brassage d'allèles de gènes liés portés par le même chromosome. Dans l'exemple, il y a brassage entre les allèles des gènes A et B.

#### Doc 22 Brassage intrachromosomique

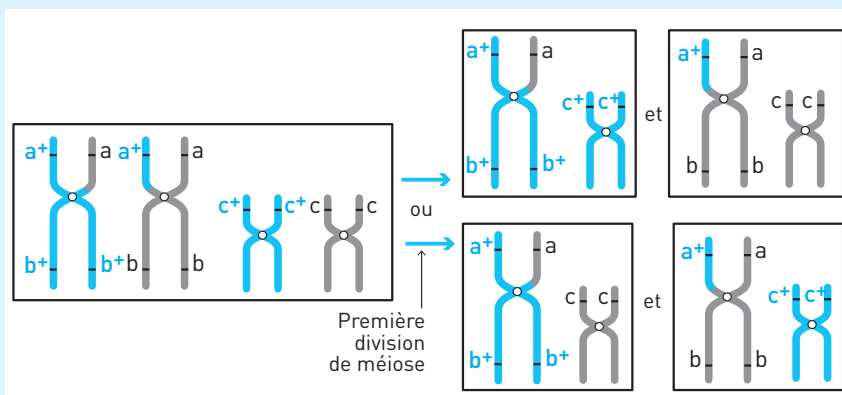


Les nouvelles combinaisons d'allèles dans les gamètes sont  $(a, b^+)$  et  $(a^+, b)$ .

### 2. Le brassage interchromosomique

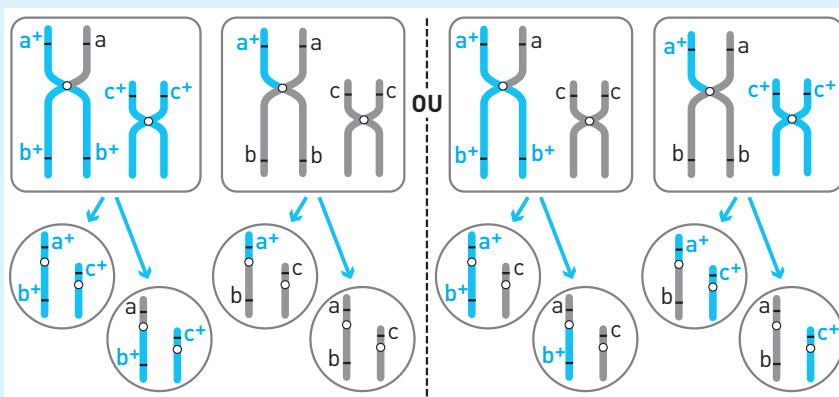
Il a lieu en anaphase I. Il y a disjonction et répartition aléatoire des chromosomes homologues. Cela crée de nouvelles combinaisons de chromosomes dans les cellules filles issues de la première division de méiose. Il y a brassage d'allèles de gènes indépendants portés par des chromosomes différents. Dans l'exemple, il y a brassage entre les allèles des gènes A et C ou B et C.

#### Doc 23 Brassage interchromosomique (suite de l'exemple du doc 22)



Ensuite, la deuxième division de la méiose sépare les chromatides de chaque chromosome, mais ne crée pas de brassage.

### Doc 24 Fin de méiose (8 gamètes différents obtenus)



En fait il y a brassage intra- puis interchromosomique qui donnent, dans l'exemple, 8 gamètes différents.

**La fécondation.** 8 gamètes mâles et 8 gamètes femelles possibles se rencontrant au hasard donnent  $8 \times 8 = 64$  zygotes différents.

La fécondation renforce donc le brassage dû à la méiose.

### Doc 25 Résultats de la fécondation

Gamètes parentaux	ab, c	ab, c <sup>+</sup>	ab <sup>+</sup> , c	ab <sup>+</sup> , c <sup>+</sup>	a <sup>+</sup> b, c	a <sup>+</sup> b, c <sup>+</sup>	a <sup>+</sup> b <sup>+</sup> , c	a <sup>+</sup> b <sup>+</sup> , c <sup>+</sup>
ab, c	$\frac{ab}{ab}, \frac{c}{c}$	$\frac{ab}{ab}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{ab^+}{ab}, \frac{c}{c}$	$\frac{ab^+}{ab}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{a^+b}{ab}, \frac{c}{c}$	$\frac{a^+b}{ab}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{a^+b^+}{ab}, \frac{c}{c}$	$\frac{a^+b^+}{ab}, \frac{c^+}{c}$
ab, c <sup>+</sup>	$\frac{ab}{ab}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{ab}{ab}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{ab^+}{ab}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{ab^+}{ab}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{a^+b}{ab}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{a^+b}{ab}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{a^+b^+}{ab}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{a^+b^+}{ab}, \frac{c^+}{c^+}$
ab <sup>+</sup> , c	$\frac{ab}{ab^+}, \frac{c}{c}$	$\frac{ab}{ab^+}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{ab^+}{ab^+}, \frac{c}{c}$	$\frac{ab^+}{ab^+}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{a^+b}{ab^+}, \frac{c}{c}$	$\frac{a^+b}{ab^+}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{a^+b^+}{ab^+}, \frac{c}{c}$	$\frac{a^+b^+}{ab^+}, \frac{c^+}{c}$
ab <sup>+</sup> , c <sup>+</sup>	$\frac{ab}{ab^+}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{ab}{ab^+}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{ab^+}{ab^+}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{ab^+}{ab^+}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{a^+b}{ab^+}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{a^+b}{ab^+}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{a^+b^+}{ab^+}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{a^+b^+}{ab^+}, \frac{c^+}{c^+}$
a <sup>+</sup> b, c	$\frac{ab}{a^+b}, \frac{c}{c}$	$\frac{ab}{a^+b}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{ab^+}{a^+b}, \frac{c}{c}$	$\frac{ab^+}{a^+b}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{a^+b}{a^+b}, \frac{c}{c}$	$\frac{a^+b}{a^+b}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{a^+b^+}{a^+b}, \frac{c}{c}$	$\frac{a^+b^+}{a^+b}, \frac{c^+}{c}$
a <sup>+</sup> b, c <sup>+</sup>	$\frac{ab}{a^+b}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{ab}{a^+b}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{ab^+}{a^+b}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{ab^+}{a^+b}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{a^+b}{a^+b}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{a^+b}{a^+b}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{a^+b^+}{a^+b}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{a^+b^+}{a^+b}, \frac{c^+}{c^+}$
a <sup>+</sup> b <sup>+</sup> , c	$\frac{ab}{a^+b^+}, \frac{c}{c}$	$\frac{ab}{a^+b^+}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{ab^+}{a^+b^+}, \frac{c}{c}$	$\frac{ab^+}{a^+b^+}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{a^+b}{a^+b^+}, \frac{c}{c}$	$\frac{a^+b}{a^+b^+}, \frac{c^+}{c}$	$\frac{a^+b^+}{a^+b^+}, \frac{c}{c}$	$\frac{a^+b^+}{a^+b^+}, \frac{c^+}{c}$
a <sup>+</sup> b <sup>+</sup> , c <sup>+</sup>	$\frac{ab}{a^+b^+}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{ab}{a^+b^+}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{ab^+}{a^+b^+}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{ab^+}{a^+b^+}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{a^+b}{a^+b^+}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{a^+b}{a^+b^+}, \frac{c^+}{c^+}$	$\frac{a^+b^+}{a^+b^+}, \frac{c}{c^+}$	$\frac{a^+b^+}{a^+b^+}, \frac{c^+}{c^+}$

### Conclusion

D'après l'étude de notre exemple, la méiose avec brassage intra puis interchromosomique et la fécondation permettent de créer de nouveaux génotypes (64) à partir d'un seul chez deux parents. La reproduction sexuée crée donc bien de nouvelles combinaisons alléliques d'une génération à la suivante.

## 2

## Diversification des êtres vivants et évolution

L'association des mutations qui créent de nouveaux allèles et du **brassage génétique** au cours de la méiose et de la fécondation ne suffit pas à expliquer la totalité de la diversification génétique des êtres vivants. Il existe d'autres mécanismes permettant de créer de nouveaux génomes et de permettre la diversification génétique.

### I LA DIVERSIFICATION GÉNÉTIQUE

#### 1. La duplication : création de nouveaux gènes

Plusieurs mécanismes, dont le crossing-over inégal étudié dans le chapitre 1, peuvent créer de nouveaux gènes par duplication d'un gène ancestral. Des mutations différentes surviennent au cours du temps sur les copies du gène dupliqué. Elles créent alors un **gène différent du gène initial**, celui-ci étant conservé, donc deux gènes dits « homologues ». Deux protéines différentes sont alors codées.

**EXEMPLE :** Les opsines, vues en première S, sont des pigments rétinien permettant aux cônes d'être sensibles aux couleurs. Ce sont des protéines dont les séquences sont très proches. Il en existe trois chez l'Homme, les opsines « rouge », « vert » et « bleu » qui sont codées par trois gènes différents. Ces gènes dérivent d'un même gène, présent dans une espèce ancêtre de l'Homme et de ses parents proches, qui a été copié en deux (duplication), puis trois exemplaires ayant évolué différemment par mutations.

Les gènes de l'opsine « rouge » et de l'opsine « vert » sont plus proches car ils ont moins de différences. Les molécules ayant des séquences proches et une même origine ancestrale sont appelées **molécules homologues**. Les opsines sont donc des protéines homologues. Les gènes qui codent ces molécules sont aussi appelés homologues et constituent une **famille multigénique** dont l'origine est commune. Ils ont été créés au cours de l'évolution à partir d'un unique gène ancestral par duplication suivie de mutations.

#### 2. Des mutations minimes des gènes du développement à l'origine de grandes modifications

Des formes vivantes très différentes peuvent résulter plus des conséquences de variations dans la chronologie et l'intensité d'expression de gènes que de différences génétiques importantes.

## ■ Mutations et innovations morphologiques

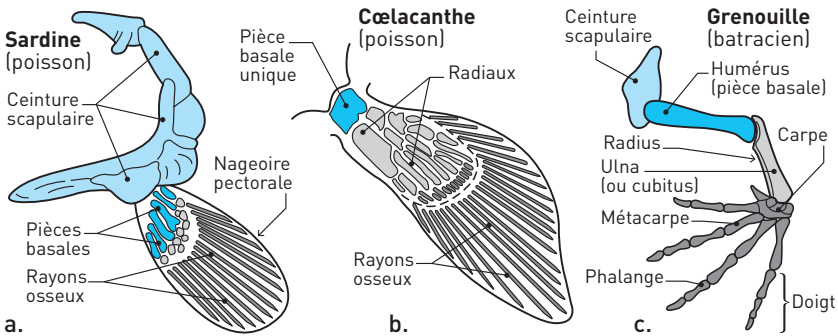
Les **gènes du développement** s'expriment dans une région déterminée de l'embryon et durant une période bien précise de son développement. Leur expression en contrôlant celles de nombreux autres gènes permet la mise en place de tissus ou organes (exemple du gène SRY des mâles, voir *100 % Exos, Première S*, chapitre 10).

Leur rôle est primordial dans l'élaboration du phénotype d'un individu suivant le plan de l'espèce.

Des mutations touchant ces gènes peuvent bloquer leur expression et empêcher la mise en place de certains organes ou au contraire leur permettre de s'exprimer dans une autre région de l'embryon, entraînant éventuellement l'acquisition d'une nouvelle fonction.

**EXEMPLE :** Chez les vertébrés il y a eu acquisition d'innovations morphologiques au cours de l'évolution par mutation des gènes du développement. C'est le cas du passage de la nageoire (a) au membre monobasal des tétrapodes (b et c). Cette mutation entraîne une modification importante du phénotype des descendants qui la portent (ils ont des pattes et peuvent marcher), et a permis la sortie du milieu aquatique.

### Doc 1 Membres antérieurs de deux poissons (a : sardine et b : cœlacanthe) et d'un batracien (c : grenouille)



## ■ Mutations et modification de la période de développement

La chronologie du développement embryonnaire est aussi sous contrôle génétique. Des mutations au niveau des gènes impliqués peuvent entraîner des différences importantes chez les individus qui les portent.

**EXEMPLE :** Les différences entre l'Homme et le chimpanzé. L'Homme semble être une « forme juvénile » du chimpanzé. On parle d'hétérochronie, c'est une modification de la durée et/ou de la vitesse de développement de l'organisme au cours de l'évolution. Le chapitre 3 montre les conséquences de ce décalage dans le développement et son intérêt évolutif.

Voir le document 2 du chapitre 3.

### 3. Les hybridations

Une hybridation est un croisement naturel ou artificiel entre deux individus de races, de variétés ou d'espèces différentes.

Une **espèce** est un groupe d'êtres vivants pouvant se reproduire entre eux (critère d'**interfécondité**) et dont la descendance est fertile. L'espèce est l'entité fondamentale des classifications, qui réunit les êtres vivants présentant un ensemble de caractéristiques morphologiques, anatomiques, physiologiques, biochimiques (critère phénotypique) et génétiques communes.

Tous les individus d'une espèce ont les mêmes chromosomes et les mêmes gènes. Une population d'individus identifiée comme constituant une espèce n'est définie que durant un laps de temps fini.

L'hybridation naturelle a presque toujours lieu entre espèces proches, le plus souvent présentes dans un même milieu. Les hybrides ainsi formés peuvent être fertiles notamment chez les végétaux, et donner lieu à la formation d'une espèce ou variété nouvelle ayant un génome nouveau et des caractéristiques spécifiques. Chez les animaux, la plupart du temps les hybrides sont viables, mais stériles (ex. : tigron et ligre produits par le croisement en captivité de tigres et de lions).

**EXEMPLE :** En effectuant des **hybridations** après **sélection** de variétés parentales intéressantes, on augmente la diversité et surtout on l'oriente. Ce principe est très utilisé en élevage et surtout en agriculture car les hybrides végétaux sont plus souvent fertiles.

Voir l'exercice 6 du chapitre 1.

### 4. La polyploïdisation

La plupart des espèces sont **diploïdes** : chaque chromosome est présent en deux exemplaires ( $2n$ ). De rares espèces sont **polyploïdes** : il y a plus de deux exemplaires de chaque chromosome. On parle d'espèce triploïde ( $3n$ ), tétraploïde ( $4n$ ), pentaploïde ( $5n$ )...

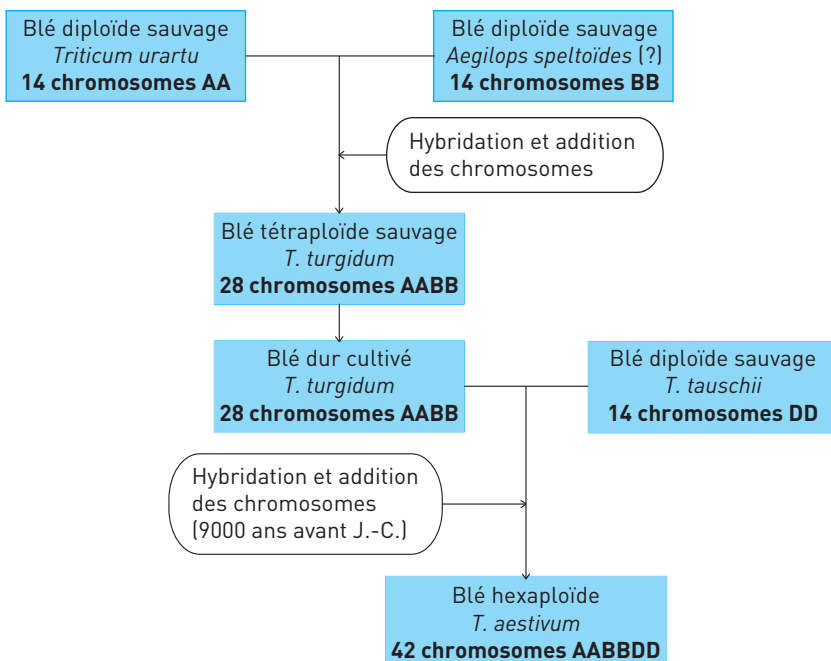
La polyploïdisation désigne la multiplication naturelle ou artificielle du nombre des chromosomes chez certaines plantes, aboutissant à l'état polyloïde.

Des gamètes anormaux peuvent être créés par erreur au cours de la méiose.

70 % des angiospermes (végétaux supérieurs) ont eu au moins un événement de **polyploïdisation** dans leur histoire, le plus souvent après une hybridation. Les descendants peuvent avoir les caractéristiques des deux parents.

Il peut y avoir **addition du matériel génétique** de deux variétés différentes, par association de matériel génétique diploïde lors de la fécondation au cours de l'hybridation associée (**allopolyploïdie** du prunier, du blé, du colza). Ce mécanisme peut se reproduire plusieurs fois au cours de l'histoire d'une espèce, comme c'est le cas pour le blé cultivé.

## Doc 2 Exemple de l'histoire évolutive du blé



La polyploïdisation entraîne un enrichissement du patrimoine génétique de l'espèce.

## 5. Le transfert de matériel génétique par voie virale

Le transfert de gènes par voie virale est un processus dans lequel un organisme intègre du matériel génétique provenant d'un virus.

**EXEMPLE : L'origine du placenta des mammifères.** Il est connu depuis longtemps qu'une part (environ 8 %) du patrimoine génétique humain contient des restes de gènes viraux. C'est le cas des gènes de **syncytines**, des protéines exprimées au niveau du placenta, et indispensables à sa formation. En effet, les syncytines en faisant fusionner les membranes entre elles, comme le fait un virus pour entrer dans une cellule, permettent la fabrication d'une « nappe cellulaire multinucléée », constituant essentiel du placenta.

Le rétrovirus (virus à ARN) à l'origine des syncytines aurait infecté un de nos ancêtres mammifères et le gène codant la protéine enveloppe aurait été intégré dans son génome. Si la transformation atteint des cellules germinales elle peut être transmise ensuite de génération en génération.

Par conséquent, une **contamination virale** pourrait avoir été un événement fondateur dans l'évolution entraînant le passage d'un développement embryonnaire externe, dans des œufs, à un mode interne, et donc l'apparition des **mammifères placentaires**.

### L'essentiel

Le matériel génétique d'une espèce peut être diversifié par mutation, ajout, amplification au cours du temps grâce à la reproduction sexuée. Il peut aussi y avoir acquisition de patrimoine d'une espèce différente (transfert viral). La diversité des génomes entraîne la diversité des êtres vivants.

## II LA DIVERSIFICATION NON GÉNÉTIQUE DES ÊTRES VIVANTS

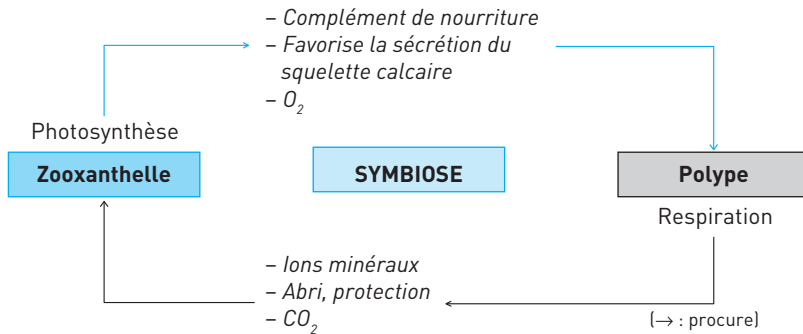
La diversification des êtres vivants peut aussi se produire sans modification du génome.

### 1. La symbiose

La **symbiose** est une association permanente entre deux organismes d'espèces différentes et qui se traduit par des **effets bénéfiques** aussi bien pour l'un que pour l'autre.

**EXEMPLE :** Les **coraux** sont des organismes animaux constitués d'unités appelées polypes, qui vivent dans des eaux chaudes peu profondes et produisent un squelette calcaire abondant sous forme de récif. À l'intérieur des polypes on trouve des algues unicellulaires photosynthétiques, les **zooxanthelles**.

#### Doc 3 Une association à bénéfices réciproques : zooxanthelles et polypes



Chaque organisme y trouve un avantage : apport de matière organique et de dioxygène produits par la photosynthèse des algues, pour le polype ; apport de

dioxyde de carbone et de déchets minéraux produits par le polype, et abri contre les variations des conditions du milieu et les prédateurs, pour les algues.

## 2. De nouveaux comportements

Chez les vertébrés, le développement de **comportements nouveaux**, transmis d'une génération à l'autre par apprentissage des petits, donc grâce à une voie non génétique est aussi source de diversité.

Cette notion sera importante pour comprendre **l'évolution de l'Homme** avec la transmission de la fabrication d'outils, de la maîtrise du feu et du langage.

**EXEMPLE :** Un individu peut acquérir une nouvelle technique de chasse, une nouvelle utilisation d'outils, une nouvelle base d'alimentation et les transmettre à ses descendants. Le plus souvent ces innovations se font au hasard et si elles sont bénéfiques elles sont conservées et transmises aux générations suivantes.

Chez les oiseaux chanteurs, le **chant n'est pas inné**, ils l'apprennent des autres oiseaux de leur espèce. Il est donc normal de constater, au fil des générations, une certaine évolution du langage chanté, comme c'est le cas pour les langages humains. Ce phénomène a été constaté par les chercheurs, mais il peut se manifester davantage chez certaines espèces.

### L'essentiel

La diversification du vivant est due à celle des génomes, mais aussi à l'association d'êtres vivants et l'acquisition de nouveaux comportements. Ceci permet la création des nouvelles formes de vie et donc la diversification et l'évolution des êtres vivants.

## III ÉVOLUTION DE LA BIODIVERSITÉ

Toutes les nouvelles formes d'êtres vivants ne sont pas maintenues au cours du temps. Ces organismes doivent être fertiles et se reproduire pour transmettre leur matériel génétique qui sera ainsi conservé au cours de l'évolution.

### 1. La dérive génétique

La **dérive génétique** est une modification aléatoire (donc au hasard) de la fréquence des allèles. Elle se produit de façon plus marquée lorsque l'effectif de la population est faible. Les allèles les moins représentés ont moins de chance d'être transmis, car ils sont présents dans peu de gamètes. Ils peuvent disparaître si le nombre de descendants est insuffisant.

### 2. La sélection naturelle

La sélection naturelle est une action non aléatoire du milieu de vie (**pression du milieu**) sur la répartition des allèles. En effet certains allèles confèrent des avantages aux individus qui les portent : ils vivent plus longtemps (meilleure résis-



tance à un facteur du milieu, aux prédateurs ; meilleur accès à la nourriture), se reproduisent davantage (plus grande attirance sexuelle exercée sur le partenaire, et plus de temps pour se reproduire). Les allèles qu'ils portent sont alors transmis et de plus en plus présents dans la population.

Les mutations n'entraînant ni avantage, ni inconvénient sont appelées **mutations neutres**. Les nouveaux allèles ne subissent pas la sélection naturelle mais seulement la dérive génétique.

Les innovations génétiques ou comportementales qui ont le plus de chances d'être conservées sont celles qui sont le plus représentées et/ou qui donnent un avantage de survie à l'individu qui les porte.

### 3. La spéciation

La sélection naturelle et la dérive génétique peuvent conduire à l'**apparition de nouvelles espèces**.

Voir la définition de l'**espèce** dans le paragraphe I.

Dans un milieu donné, les individus les plus adaptés se développent et leurs allèles deviennent majoritaires. Dans un autre milieu, la sélection est différente et d'autres allèles deviennent majoritaires. En cas d'isolement géographique, ces deux populations peuvent devenir si différentes génétiquement qu'elles ne pourront plus se reproduire entre elles ou donneront des hybrides stériles. Ces deux populations forment alors **deux espèces distinctes**.

Si le milieu de vie change, la sélection naturelle n'est plus la même. Des individus ou des populations peuvent ne plus être favorisés, car non adaptés et disparaître. Au contraire des populations peu adaptées auparavant peuvent devenir les plus résistantes et se développer.

**EXEMPLE :** Au cours des temps géologiques, il y a 65 millions d'années, les conditions climatiques ont changé, entraînant la disparition de nombreux êtres vivants dont les dinosaures. Les espèces survivantes, mieux adaptées ont profité de l'absence des animaux dominants pour se multiplier et se diversifier. La disparition des uns entraîne le développement des autres !

#### L'essentiel

Sous l'effet de la pression du milieu, de la concurrence entre êtres vivants et du hasard, la diversité des populations change au cours des générations, on parle d'évolution.

## SAVOIR-FAIRE

### Vocabulaire

- **Cellule germinale** : Cellule à l'origine des gamètes (elle peut subir la méiose).
- **Cellule somatique** : Cellule n'appartenant pas à la lignée germinale, ne subira jamais la méiose.
- **Duplication génique** : Doublement d'un gène dans un génome lors d'un crossing-over déséquilibré. Par sa répétition, elle est à l'origine des familles multigéniques qui, au sein d'une espèce, sont formées de gènes dérivant d'un même gène ancestral. Les duplications géniques sont responsables de la complexification des génomes au cours de l'évolution.
- **Gène du développement / Gène architecte / Gène homéotique** : Gène qui contrôle le fonctionnement d'autres gènes, et détermine la mise en place et l'organisation caractéristique d'une région précise d'un organisme. Ce gène s'exprime au cours du développement et conduit à la mise en place du plan d'organisation caractéristique d'une espèce.
- **Innovation génétique** : Mutation ponctuelle et/ou duplication de gènes ; l'innovation génétique se traduit donc par l'apparition d'un nouvel allèle ou d'un nouveau gène. Elle peut être à l'origine d'une innovation évolutive.
- **Innovation évolutive** : Nouveauté marquée par un changement morphologique, anatomique, embryonnaire, physiologique (ex. : ancêtre commun aux dinosaures et oiseaux ayant acquis la propriété de garder son corps à température constante « sang chaud ») ou moléculaire, qui se transmet de génération en génération, se répandant ainsi au sein des populations d'une espèce.

### Compétence

#### ■ Placer des innovations sur un arbre phylogénétique

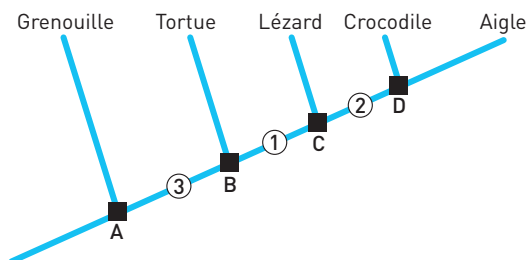
On peut représenter les liens de parenté et les innovations dans un arbre phylogénétique. Chaque embranchement permet de matérialiser une différenciation par rapport à un ancêtre commun. Sur une des branches on note l'innovation, l'acquisition faite par certains descendants. Pour chaque caractère étudié, il existe un **état ancestral** présent chez l'ancêtre commun et un **état dérivé** résultat d'une **innovation** présent seulement chez certains descendants.

Les fenêtres temporelles ne sont pas présentes chez la grenouille et la tortue, mais chez l'aigle, le crocodile et le lézard. L'acquisition des fenêtres temporelles a donc eu lieu chez un ancêtre de ces trois espèces. On place l'innovation sur la branche commune aux trois et pas aux deux autres. On peut avoir le même raisonnement pour les deux autres caractères (**doc. 4 et 5**).

**Doc 4 Tableau des états de quelques caractères chez 5 vertébrés**

Caractères	Groupes				
	Aigle	Crocodile	Grenouille	Lézard	Tortue
1 : fenêtres temporales	oui	oui	non	oui	non
2 : fenêtre mandibulaire	oui	oui	non	non	non
3 : griffes	oui	oui	non	oui	oui

Cases à fond blanc : état ancestral ; cases à fond gris : état dérivé.

**Doc 5 Arbre phylogénétique correspondant**

Les carrés noirs A à D représentent les derniers ancêtres communs hypothétiques. Les disques numérotés 1 à 3 représentent l'apparition de l'état dérivé (innovations évolutives) d'un caractère présenté dans le tableau.

Deux espèces sont d'autant plus proches dans l'évolution qu'elles partagent d'états dérivés et donc d'innovations en commun.

Ainsi le crocodile est plus proche de l'aigle (trois innovations en commun) que du lézard (deux innovations en commun). Le fait qu'ils partagent en plus l'innovation 1 montre leurs liens de parenté plus étroits.

**Repères****1. Distinguer duplication et mutation**

La mutation, qui est une erreur de copie lors de la réplication, donne une nouvelle version du gène, un nouvel allèle. Sa conséquence au niveau du phénotype et de l'évolution peut être importante, surtout si elle touche un gène du développement.

La duplication permet d'avoir un gène en deux exemplaires identiques principalement par crossing-over inégal. Ensuite ces deux exemplaires vont subir au cours du temps des mutations non identiques qui vont conduire à la présence de deux gènes différents. La conséquence est le codage d'une protéine en plus.

## 2. Connaître l'existence d'autres causes de diversité des êtres vivants

Causes génétiques : hybridation, polyploïdisation, transfert viral.

Causes non génétiques : symbiose, nouveaux comportements.

## 3. Distinguer sélection naturelle et dérive génétique

Ces deux mécanismes modifient la fréquence des allèles dans une population.

La **dérive génétique** agit sur la répartition de **tous les allèles** des gènes. Elle est **aléatoire** et d'autant plus importante que le nombre d'individus qui portent l'allèle est faible (elle dépend de la probabilité pour un allèle d'être présent dans les gamètes et transmis à la génération suivante) et que l'effectif de la population est réduit.

La **sélection naturelle** n'agit que sur certains allèles qui confèrent aux individus qui les portent soit un avantage soit un inconvénient. Le **taux de survie** des individus sera différent et leurs allèles seront plus ou moins transmis à la génération suivante. Le milieu de vie va exercer une pression sélective sur les individus en fonction de la prédation, de l'accès à la nourriture, de la sensibilité à une maladie ou à un traitement chimique... Il y a **tri des innovations favorables à la survie de l'espèce**.

## EXERCICES D'APPLICATION

2

## 1 MOTS-CROISÉS

★ 10 min ▶ P. 54

Remplissez la grille avec les termes correspondant aux définitions suivantes.

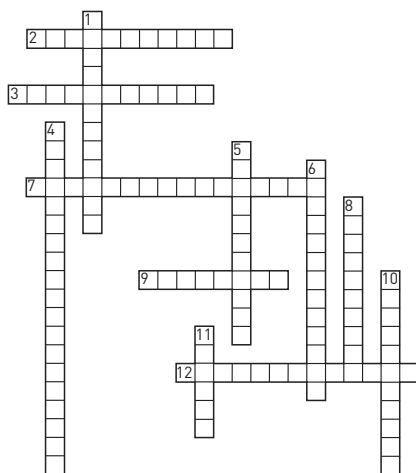
**Horizontalement**

2. Croisement entre organismes d'espèces différentes.
3. Association d'êtres vivants ne profitant qu'à l'un d'entre eux.
7. Mécanisme modifiant la fréquence d'un allèle dans une population de manière aléatoire.
9. Association d'êtres vivants à avantages réciproques.
12. Permet de transmettre des comportements de génération en génération.

**Verticalement**

1. Transfert d'une portion d'ADN par un virus d'une bactérie à une autre.
4. Mécanisme modifiant la fréquence d'un allèle dans une population de manière non aléatoire.
5. Qualificatif pour une cellule ayant quatre exemplaires de chaque chromosome.
6. Modification de la vitesse ou de la durée du développement d'un organisme.
8. Définit des gènes ayant des séquences proches et dérivant d'un gène ancestral.
10. Transfert d'un gène d'un organisme à un autre.
11. Ensemble d'individus capables de se reproduire entre eux.

## Doc 6



## 2 RELATION ENTRE ESCARGOTS ET GRIVE MUSICIENNE

★ 15 min ▶ P. 54

À partir des seules informations tirées du document, relevez les affirmations exactes et corrigez celles qui sont erronées.

**Doc 7 L'escargot d'Europe**

L'escargot d'Europe, *Cepaea nemoralis*, présente des coquilles avec des colorations très variables. On peut distinguer deux populations, l'une à coquille claire, l'autre à coquille sombre. Les prédateurs de ces escargots sont nombreux, en particulier la grive musicienne. Celle-ci casse la coquille sur des cailloux et mange les parties molles. Dans une forêt, milieu sombre et fermé, il est alors possible de comparer au

même moment le nombre des individus mangés et celui des vivants. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Escargots	Coquilles claires		Coquilles sombres	
	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
Mangés (coquilles brisées)	107	62,2	80	46,5
Vivants	65	37,8	92	53,5

1. Les escargots à coquille sombre et à coquille claire font partie de la même espèce.
2. Les escargots de couleur claire survivent plus dans le milieu forestier.
3. L'action prédatrice de la grive musicienne agit sur la proportion des escargots des deux couleurs.
4. Les observations sur la composition des populations d'escargots dans un milieu donné peuvent s'expliquer par un phénomène de sélection naturelle.
5. À terme, on peut imaginer que la population d'escargots à coquille foncée sera de plus en plus minoritaire.

**Diviser** l'étude du document en éléments simples : identifier le paramètre variable (couleur de la coquille) dans les deux situations puis commencer par exemple par l'étude de la partie correspondant aux escargots clairs.

**Identifier** le paramètre qui est observé et enregistré (nombre d'escargots qui survivent dans la forêt sombre).

**Lier** : En déduire une **relation de cause à effet** probable entre la forêt, la couleur et le taux de mortalité des escargots.

Appliquer la même démarche sur la 2<sup>e</sup> partie et **comparer** les deux situations.

## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

### 3 INNOVATIONS GÉNÉTIQUES

★★ | 30 min | ► P. 54

La **HCG** est une hormone produite par l'embryon chez les primates et les équidés (groupe des chevaux et zèbres), dont les plus anciens fossiles connus ont environ 55 millions d'années. C'est cette hormone qui permet le maintien de la gestation. Elle est codée par un gène présent sur le chromosome 19.

La **LH** est une hormone hypophysaire qui chez les femelles est responsable de l'ovulation. Chez les mâles elle stimule la production de testostérone par les testicules. Elle existe chez tous les vertébrés apparus il y a environ 500 millions d'années. Elle est codée également par un gène présent sur le chromosome 19.

### Doc 8 Comparaison des séquences des 395 premiers triplets de nucléotides des gènes de la LH et de la HCG humaines

```

↓1                               ↓49
LH ATG GAG ATG CTC CAG GGG CTG CTG CTG TTG ... GGG GCA TGG GCA TCC AGG ...
HCG --- T-----A-----A-----

↓79
LH CCA TGG TGC CAC CCC ATC AAT GCC ATC CTG GCT GTG GAG AAG GAG GGC TGC ...
HCG --- C-----G-----C-----

↓157 ↓175
LH ATC ... ACC ATG ATG CGC GTG CTG CAG GCG GTC CTG CCG CCC CTG CCT CAG ...
HCG --- ... ---CC-----G-----G-----

↓235 ↓271
LH TAC CGT GAT GTG ... GGC TGC CCG CGT GGC GTG GAC CCC GTG GTC TCC TTC ...
HCG --- C-----C-----A-----A-----

↓313 ↓325 ↓346
LH GCT ... CGC TGT GGA CCC TGC ... AGC ACC TCC GAC TGT GGG GGT CCC AAA ...
HCG --- ... -AA --- -C- -T- ... --- A-T --- -C-----G ...

↓391
LH GAC CAC CCC CAA CTC
HCG --T G-----G---T

```

- identité de nucléotides

↓175 localisation et numérotation du triplet de nucléotides

Au total on a 79,1 % d'homologie entre les séquences nucléiques des deux gènes.

1. D'après ces documents justifiez les affirmations suivantes.

- Les gènes de la LH et de la HCG ont des séquences proches.
- Une duplication d'un gène ancestral peut expliquer la présence de ces deux gènes peu différents.
- Le gène de la LH était présent avant celui de la HCG.
- Les différences entre ces séquences sont dues à des mutations.

2. Résumez l'histoire évolutive possible de ces gènes.

#### 4 L'ÉVOLUTION D'ESPÈCES INSULAIRES

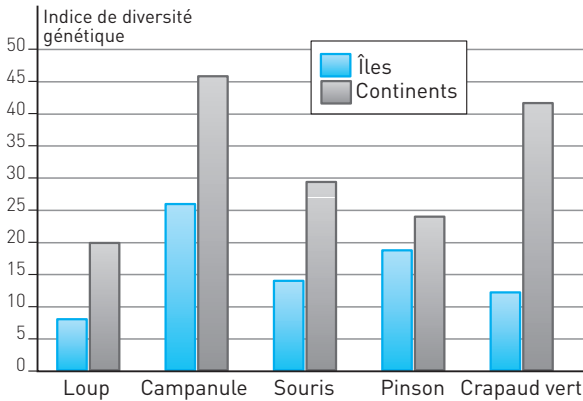
★★ | 20 min | ► P. 55

Les îles renferment une biodiversité originale avec de nombreuses espèces endémiques (locales). Lors de sa formation une île volcanique est totalement vide de vie. Des individus venant du continent voisin vont rapidement la coloniser et se développer.

On étudie la biodiversité sur l'île volcanique de Surtsey, près de l'Islande. Cette île s'est formée en 1963 à la suite d'une éruption volcanique. L'indice de diversité génétique calculé à partir de l'étude des allèles de certains gènes est d'autant plus élevé que le nombre d'allèles est grand.

## Doc 9 Comparaison de la diversité génétique des populations continentales et insulaires

Plus l'indice est élevé, plus il y a d'allèles différents dans la population.



1. Comparez la diversité génétique entre l'île et le continent. Comment expliquer cette différence ?
2. Identifiez en quoi les pinsons représentent un cas particulier à partir du document. Comment expliquer cette particularité ?

### 5 ÉVOLUTION DES MEMBRES DES VERTÉBRÉS | ★★ | 25 min | ► P. 55

On étudie le squelette de plusieurs vertébrés pour mettre en évidence leurs liens de parenté et l'évolution des membres et de la locomotion au cours de l'évolution (doc 10).

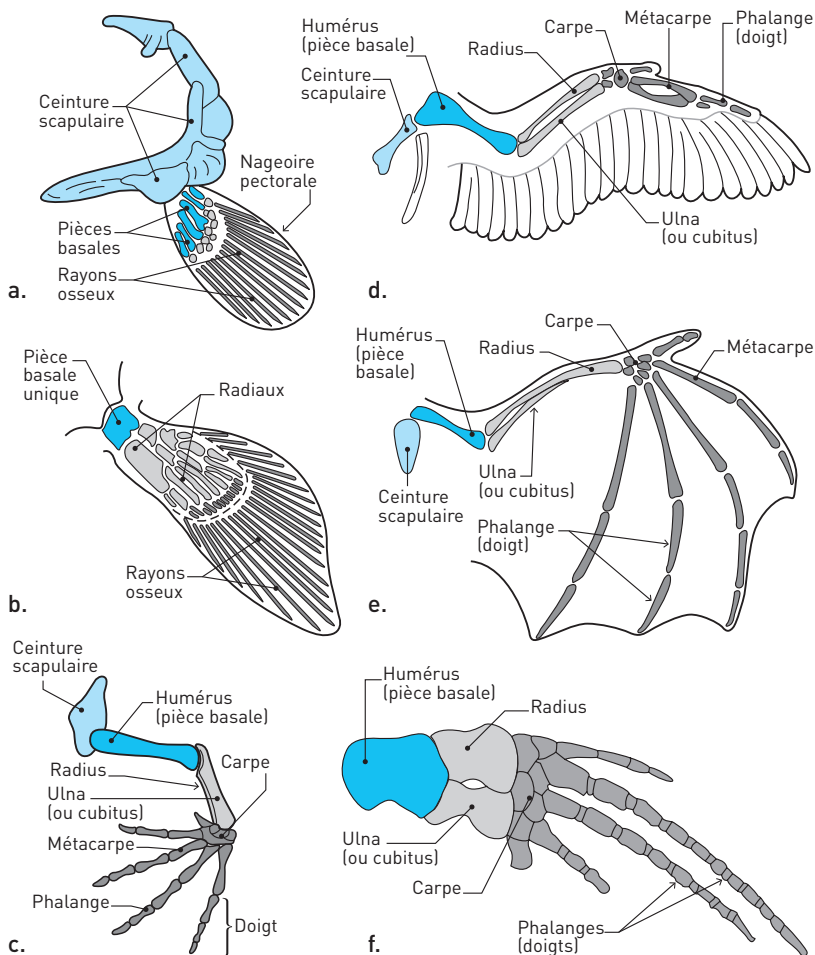
Le terme de chiridien caractérise le membre relié au reste du squelette par une seule pièce basale, permettant une plus grande mobilité du membre par rapport à l'axe du corps.

1. Chez qui est-il présent ?
2. Chez quel animal y a-t-il une organisation différente du membre ?
3. Comment expliquer l'apparition de la nouveauté membre chiridien dans l'évolution ?
4. Le membre chiridien a-t-il toujours la même structure (organisation des os du squelette) ?
5. Le membre chiridien a-t-il toujours la même forme ? D'après vos connaissances sur ces animaux, de quoi dépend cette forme ?



**Doc 10 Membres antérieurs de plusieurs vertébrés**

(a : sardine (poisson) ; b : cœlacanthe (poisson) ; c : grenouille (batracien) ; d : mésange (oiseau) ; e : chauve-souris (mammifère) ; f : baleine (mammifère).)

**6 MOUSTIQUES ET INSECTICIDES**

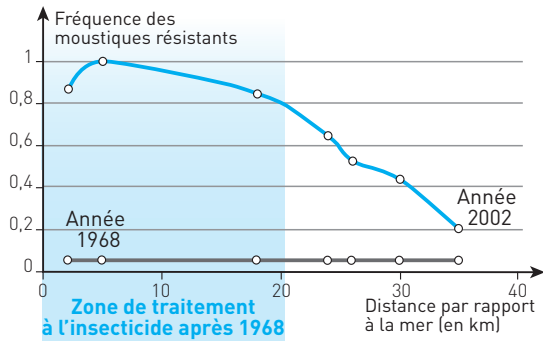
★★★ 30 min ▶ P. 56

À l'heure actuelle, certains organismes nuisibles à l'espèce humaine deviennent résistants et survivent à des traitements qui les éliminaient auparavant. On s'intéresse à la résistance du moustique *Culex pipiens* aux insecticides.

**1. Étude dans la région de Montpellier**

Après 1968, un traitement par insecticides est réalisé par épandage en bord de mer. Des prélèvements de larves de moustiques sont réalisés en 1968, avant le traitement, puis en 2002 dans les mêmes zones qu'en 1968. On étudie ensuite, chez les moustiques prélevés, la résistance aux insecticides organophosphorés.

### Doc 11 Fréquence de moustiques résistants par rapport à la distance à la zone traitée



Comment expliquer ces résultats ?

Il faut d'abord identifier les paramètres étudiés qui sont la résistance des moustiques aux insecticides, l'épandage d'insecticides dans la région et la distance à la mer. Ensuite trouver une relation de cause à conséquence entre eux et comparer les évolutions 1968-2002. (Il faudra simplifier l'évolution 2002.)

## 2. Résistance aux insecticides et estérase

On cherche à expliquer les origines possibles de cette résistance. Pour lutter contre le moustique *Culex pipiens*, on utilise des insecticides organophosphorés. L'étude du génome du moustique a montré qu'il possédait deux gènes A et B codant des enzymes (estérases) permettant la dégradation des composés organophosphorés. On a observé par ailleurs que la quantité d'estérases était 500 fois plus importante chez un moustique résistant que chez un moustique sensible. On compare l'organisation d'une partie du génome d'un moustique sensible et d'un moustique résistant aux insecticides organophosphorés. À l'aide du **document 12** proposez une explication à l'apparition d'individus résistants.

### Doc 12 Comparaison de moustiques sensibles ou résistants

Représentation schématique d'une portion chromosomique d'un moustique **sensible** aux insecticides organo-phosphorés.



Représentation schématique d'une portion chromosomique d'un moustique **résistant** aux insecticides organo-phosphorés.



**Diviser** l'ensemble des données en éléments simples : le texte et le schéma.

**Texte** : Soulignez les informations de natures différentes avec des couleurs différentes (informations relatives à la lutte contre le moustique, à leurs gènes, à la concentration en estérase dans leur organisme).

**Schéma** : Identifier les paramètres (résistance aux insecticides, nombre de gènes de l'estérase). **Lier** : Établir une relation de causalité entre ces deux paramètres.

## EXERCICES D'APPROFONDISSEMENT

## 7 DES HÛÎTRES TRIPLOÏDES

★★★ 30 min ▶ P. 57

Ces huîtres sont issues de naissains (coquillages juvéniles fixés sur un support à la fin de leur phase larvaire) produits dans des écloséries (installations destinées à produire des œufs et des larves, vendus aux ostréiculteurs).

En plus, elles sont obtenues par la technique dite de **polypléidisation** qui leur accorde une curieuse propriété génétique : celle d'avoir des triplets de chromosomes ( $3n = 30$ ) et non 10 paires ( $2n = 20$ ) comme les huîtres sauvages.

Leur nombre anormal de chromosomes les rendant stériles, elles ne produisent pas de laitance durant l'été (période de reproduction) et restent donc dans les critères de goût des Français toute l'année. Les huîtres laiteuses sont peu appréciées et la récolte des sauvages ne se fait donc pas l'été. De plus, une huître diploïde met trois ans pour parvenir à maturité, alors qu'une triploïde n'en met que deux. Pourtant la triploïde n'a jamais fait l'unanimité chez les éleveurs.

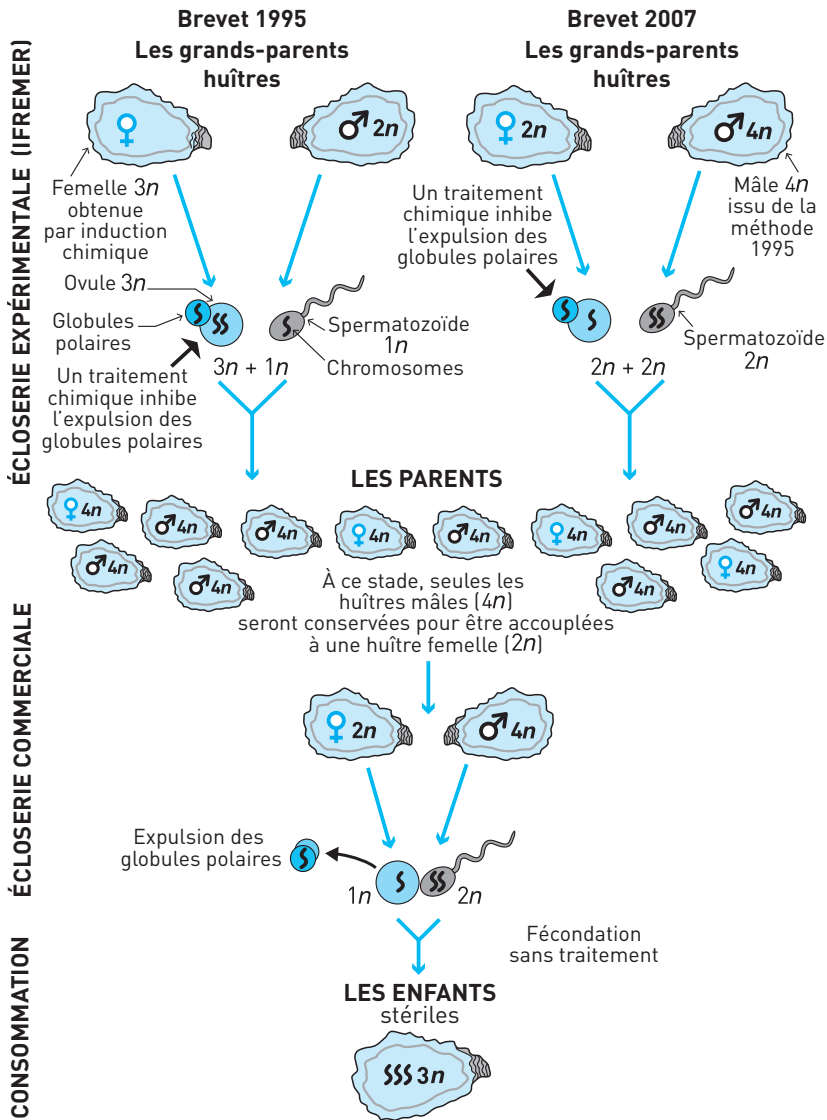
Il n'y a pas de doutes sanitaires : les huîtres triploïdes n'ont posé jusqu'à maintenant aucun problème de santé humaine et elles sont excellentes à déguster.

Certains défendent l'authenticité et récoltent leurs larves en mer à partir d'huîtres sauvages. Ils cherchent plutôt à développer des appellations contrôlées et apposent la mention « huître née en mer » sur leurs produits.

En 2009, les juvéniles ont été ravagés par un virus (l'herpès virus OsHV-1). Ce virus a décimé 73 % des triploïdes et seulement 35 % des diploïdes. Les huîtres triploïdes descendant toutes d'une même population de mâles tétraploïdes ont une grande homogénéité génétique qui constitue un facteur de fragilité par rapport à l'environnement. C'est leur biodiversité réduite qui fait leur faiblesse.

1. Quels sont les avantages et les inconvénients de l'élevage d'huîtres triploïdes ?
2. En temps normal les huîtres diploïdes produisent des gamètes haploïdes lors de la méiose. Décrivez et comparez les deux techniques pour obtenir des tétraploïdes en laboratoire.
3. Comment obtient-on des huîtres triploïdes en éclosérie commerciale ?
4. Chaque année depuis 15 ans, 200 reproducteurs tétraploïdes sont fabriqués dans la station Ifremer de la Tremblade pour être vendus à des écloséries qui les utilisent pour obtenir des huîtres triploïdes. Chaque géniteur est équipé d'une puce électronique afin d'assurer sa traçabilité, et il est renvoyé au laboratoire après utilisation pour éviter toute dispersion dans la nature.  
Pourquoi récupérer les pères tétraploïdes ?

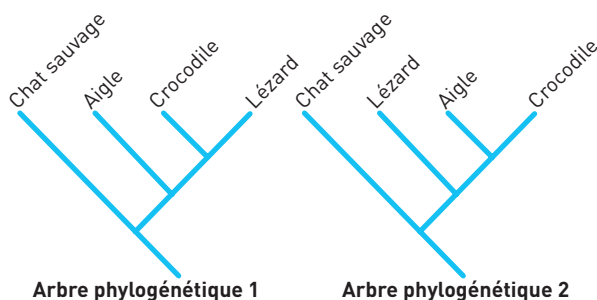
**Doc 13** Comment obtient-on des huîtres triploïdes ?



**8 ARBRE PHYLOGÉNÉTIQUE** ★★★ 30 min ▶ P. 57

Le document 14 présente deux hypothèses pour la classification phylogénétique de quatre vertébrés. Placez les innovations génétiques sur les arbres à l'aide des informations fournies par la matrice taxons/caractères du document 15. Choisissez, en la justifiant, l'hypothèse la plus probable.

## Doc 14 Document de référence



## Doc 15 Matrice taxons / caractères des quatre vertébrés

Ce tableau présente les états ancestraux et des états dérivés pour trois caractères exprimés chez quatre vertébrés. Les états dérivés sont écrits en gras.

Caractères Taxons	Formations épidermiques	Mode de reproduction	Fenêtre mandibulaire
Aigle	<b>Plumes</b> + écailles	Ovipare	<b>Présente</b>
Chat sauvage	<b>Poils</b>	<b>Vivipare</b>	Absente
Lézard	Écailles	Ovipare	Absente
Crocodile	Écailles	Ovipare	<b>Présente</b>

**Diviser** un problème complexe en situations simples : étudier séparément des caractères puis faire un bilan.

**Lier** présence de l'état dérivé d'un caractère et une innovation génétique. Placer cette innovation sur l'arbre. Choisir l'arbre le plus économe en innovations, le plus simple.

Voir Savoir-faire, Compétence « Placer des innovations sur un arbre généalogique ».

## CONTRÔLE

## 9 DRÉPANOCYTOSE ET PALUDISME

★★★ 60 min ▶ P. 58

À partir des quatre documents proposés, montrez comment un gène muté peut conférer un avantage sélectif à une population donnée et se maintenir, voire devenir plus fréquent au sein de cette même population.

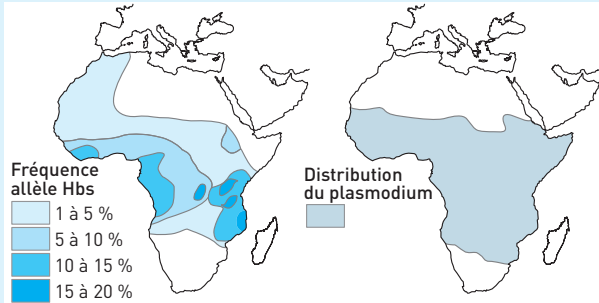
Il faut dans un premier temps identifier le problème posé à l'aide du vocabulaire (allèle muté, avantage sélectif, fréquence dans une population), puis étudier chaque document, en tirer des informations précises et faire des conclusions partielles. Enfin faire une conclusion globale répondant à la question posée. Voir Savoir-faire, Repère 3.

### Doc 16 Drépanocytose et paludisme

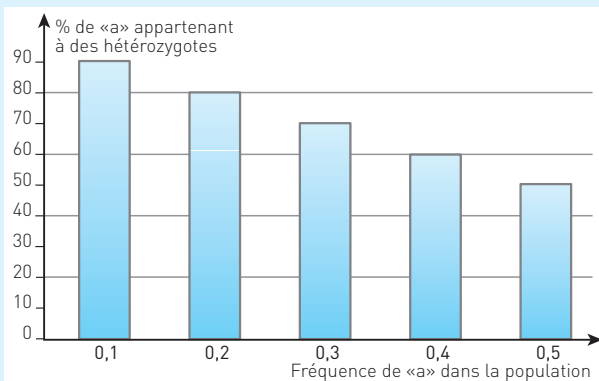
La **drépanocytose** est une maladie récessive liée à une anomalie de l'hémoglobine. Chez les personnes atteintes, on met en évidence la présence d'une hémoglobine anormale HbS différant de l'hémoglobine normale HbA par la présence d'une valine (acide aminé) remplaçant un acide glutamique en position 6 sur la chaîne peptidique de la bêtaglobine. Cette simple modification entraîne un défaut de transport du dioxygène et de la plasticité des globules rouges qui prennent la forme de faucilles et sont détruits au cours de crises hémolytiques.

Le **paludisme** est dû à un parasite, le plasmodium, qui se multiplie activement dans les globules rouges des sujets normaux, mais beaucoup plus rarement dans les globules rouges des sujets de génotype hétérozygote pour la drépanocytose.

### Doc 17 Répartition comparée de l'allèle HbS, responsable de la drépanocytose, et du paludisme



### Doc 18 Hétérozygotes et maintien de la variabilité génétique



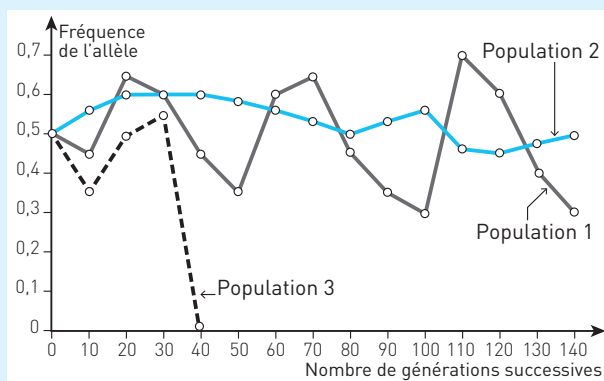
« a » ne représente aucun allèle particulier, cet exemple est une simulation.

Les allèles défavorables « a » que la sélection tend à éliminer en jouant contre les homozygotes, persistent chez les hétérozygotes d'une population.

Attention l'axe des abscisses ne représente pas le temps mais les valeurs de la fréquence des allèles « a » dans la population. La fréquence d'un allèle d'un gène dans une population ou fréquence allélique est la fréquence à laquelle se trouve cet allèle pour un gène dans une population. Habituellement, on l'exprime comme une proportion ou un pourcentage de cet allèle par rapport à l'ensemble des allèles de ce gène. La somme des fréquences alléliques de tous les allèles d'un gène dans une population est donc par définition égale à 1. La fréquence 0,5 de « a » montre que cet allèle « a » représente la moitié des allèles du gène dans la population.

### Doc 19 Simulation d'évolution de la fréquence de l'allèle « a »

On simule par ordinateur le comportement d'un allèle défavorable transmis au fil des générations dans des populations qui diffèrent par leur effectif. Les résultats sont consignés dans le graphique ci-dessous.



La population 1 comprend 200 individus. La population 2 en comporte 2 000. La population 3 seulement 25.

## 10 INNOVATIONS GÉNÉTIQUES ET ÉVOLUTION ★★★ 60 min ▶ P. 60

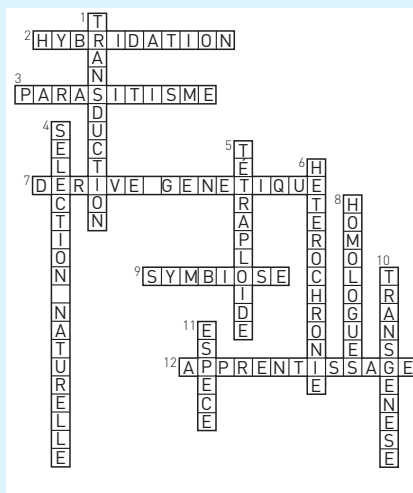
L'innovation génétique conditionne l'évolution des êtres vivants.

Exposez les principaux événements génétiques, source de ces innovations et de la biodiversité. Puis expliquez dans quel(s) cas ces innovations sont conservées et participent à l'évolution.

Votre devoir comportera une introduction, un plan structuré apparent et une conclusion.

## CORRIGÉS

## 1 Doc 20 Grille corrigée



2 1. Vrai : Les escargots à coquille sombre et à coquille claire font partie de la même espèce *Cepaea nemoralis*.

2. Faux : Les escargots de couleur foncée survivent plus dans le milieu forestier, car seulement 46,5 % sont mangés au lieu de 62,2 % pour les escargots clairs.

3. Vrai : L'action prédatrice de la grive musicienne agit sur la proportion des escargots des deux couleurs, puisqu'elle mange préférentiellement les escargots clairs.

4. Vrai : Les observations sur la composition des populations d'escargots dans un milieu donné peuvent s'expliquer par un phénomène de sélection naturelle. Il y a sélection des populations à coquille foncée car les escargots clairs, plus visibles, sont préférentiellement capturés et mangés.

5. Faux : On peut imaginer que la population d'escargots à coquille foncée sera de plus en plus **majoritaire**, car ces escargots survivent plus, se reproduisent plus et transmettent plus leur caractère coquille foncée à leurs descendants. Ceci même si au départ il semble y avoir plus d'escargots clairs.

3 1. a. La comparaison des séquences de nucléotides des deux gènes montre de nombreuses similitudes représentées par les pointillés sur le document 8. Au total il est noté qu'il y a 79,1 % de ressemblance. Les gènes de la LH et de la HCG ont des séquences proches. On parle de gènes homologues.

b. Une duplication est une anomalie de méiose qui entraîne la présence de deux exemplaires du même gène sur un chromosome, le plus souvent lors d'un crossing-over inégal. Les gènes de la LH et de la HCG sont bien présents sur le même chromosome. Le fait que leurs séquences soient très proches montre qu'ils ont une origine commune.



c. Le gène de la LH était présent avant celui de la HCG car il existe chez tous les vertébrés, donc chez un de leurs ancêtres présent avant 500 millions d'années. Le gène de la HCG présent uniquement chez les primates et les équidés, est apparu vers 50 millions d'années chez un ancêtre commun.

d. Les différences de nucléotides entre ces séquences sont des mutations différentes pour chacun des gènes au cours de l'évolution. Les nucléotides (représentés par des lettres) marqués dans la séquence de la HCG montrent des substitutions au moins dans un des gènes par rapport à la séquence du gène ancestral. Les différences entre ces séquences sont dues à des mutations différentes au cours de l'évolution dans chacun des exemplaires du gène.

2. Avant 500 millions d'années, un gène ancestral est présent sur le chromosome 19 qui code pour la LH. Ce gène est dupliqué vers 50 millions d'années, ce qui crée deux exemplaires sur le chromosome 19. Ils accumulent des mutations différentes pour donner deux gènes différents : un codant pour la HCG, un autre pour la LH.

**4** 1. La diversité génétique des espèces continentales est toujours plus élevée que celles des insulaires : presque 4 fois plus pour le crapaud vert, environ 3 fois plus pour le loup, le double pour la campanule et la souris, et d'un quart en plus pour le pinson. Interprétation : La diversité allélique est l'une des causes de la diversité génétique.

**Sur le continent**, les mutations qui se sont produites au cours du temps ont créé des allèles qui se sont accumulés sur une longue période.

**Sur l'île**, la faible diversité génétique peut s'expliquer par l'action conjuguée de plusieurs mécanismes. Tous les individus descendent des quelques individus pionniers qui ont colonisé le milieu dans les années 1970. Il y a dès le départ une variété d'allèles sans doute plus faible, car les individus pionniers ne portaient pas obligatoirement tous les allèles des continentaux. Enfin la colonisation de l'île est récente : la diversification allélique liée à l'action des mutations a été réduite dans le temps. De plus la faible population entraîne une **dérive génétique** plus importante. En effet, étant donné qu'il y a peu d'animaux, ils ont moins de chance de se reproduire entre eux et des allèles peu représentés auront tendance à disparaître rapidement.

2. Le cas du pinson est un peu différent, sa diversité allélique est presque la même sur l'île que sur le continent.

Interprétation : Les pinsons se déplacent beaucoup plus facilement et plus loin que les autres espèces étudiées. Des pinsons du continent continuent à venir sur l'île, s'y reproduisent et permettent un apport de nouveaux allèles.

La dérive génétique est donc beaucoup plus faible pour les pinsons.

**5** 1. Le membre chiridien est caractérisé par la présence d'une seule pièce basale. On note sa présence chez le coelacanthe, la grenouille, la mésange, la baleine et la chauve-souris. Elle constitue l'humérus chez les tétrapodes.

2. Seule la sardine a un membre avec une organisation différente. Il y a plusieurs pièces basales qui relient la nageoire au reste du squelette. Tous les autres ont la même organisation du membre antérieur (membre chiridien).

3. Il y a sans doute eu une innovation génétique chez un ancêtre commun au coelacanthe, à la grenouille, la mésange, la baleine et la chauve-souris. Peut-être une

mutation au niveau d'un gène du développement qui a permis de donner un nouvel allèle organisant différemment le squelette des membres.

4. Le membre chiridien a toujours la même structure, même si elle varie un peu chez le coelacanthé. Il y a toujours une pièce basale (humérus), puis deux os (radius et cubitus), puis les os du carpe, du métacarpe et les phalanges.

5. Les formes sont différentes et dépendent du milieu de vie. Les animaux aquatiques ont développé un membre nageoire chez la sardine comme chez la baleine. Les animaux aériens ont développé une aile chez la mésange comme chez la chauve-souris, même si ce sont des os différents qui ont pris de l'importance. Il y a une **adaptation** au milieu de vie.

**6** 1. **Document 11** : En 1968, avant l'utilisation des insecticides, la fréquence de moustiques résistants est de l'ordre de 5 % (0,05 pour 1) et identique quel que soit l'endroit. Il existait déjà des moustiques résistants mais en très faible proportion. En 2002, après traitement massif, les chiffres sont très différents. La proportion de moustiques résistants dans la zone traitée est entre 80 et 100 % ! Mais cette fréquence diminue quand on s'éloigne de la zone traitée pour atteindre 20 % à 35 km de la mer et 15 km de la zone traitée.

Interprétation : L'utilisation des insecticides a entraîné une augmentation de la fréquence des résistants. Ceci s'explique par la disparition des moustiques sensibles à l'insecticide et la survie des résistants devenant ainsi de plus en plus fréquents dans la population.

Conclusion : L'utilisation d'insecticides a effectué une **sélection des individus résistants**. C'est un phénomène de **sélection « naturelle »**. Dans la zone non traitée, les moustiques résistants sont plus fréquents qu'en 1968, car ils peuvent se déplacer et se développer même s'ils n'ont pas d'avantage particulier à cet endroit.

2. Les moustiques résistants produisent 500 fois plus d'estérases qui sont des enzymes permettant la dégradation des insecticides organophosphorés.

Interprétation : Ils peuvent donc éliminer les insecticides de manière beaucoup plus importante que les moustiques non résistants et survivre aux traitements.

**Document 12** : Un moustique sensible possède deux gènes A et B codant pour des estérases en un exemplaire chacun, alors que le moustique résistant en possède plusieurs exemplaires. Au moins trois exemplaires de chaque gène d'après le document.

Interprétation : Il y a eu **duplication** des gènes A et B chez les moustiques résistants, ils sont présents en plusieurs exemplaires sur le même chromosome.

Conclusion : Chez les moustiques ayant plusieurs exemplaires de chaque gène A et B codant pour les estérases, la production des estérases est plus importante et permet de détruire les insecticides organophosphorés. Ces moustiques sont alors résistants au traitement. C'est donc une innovation génétique par duplication qui est à l'origine de l'apparition de la résistance chez certains moustiques.

**Bilan.** Des duplications ont eu lieu dans le génome des moustiques. La présence de plusieurs exemplaires du gène permet la synthèse de beaucoup plus d'estérases et les moustiques peuvent détruire l'insecticide et devenir résistants. La présence d'insecticide dans la zone traitée entraîne une sélection des moustiques ayant l'innovation génétique. La fréquence des moustiques résistants augmente dans la population près de la mer, mais reste faible en zone non traitée.

**7** 1. Les avantages de l'élevage d'huîtres triploïdes sont d'ordre économique. En effet elles se développent plus vite (deux ans au lieu de trois) et permettent donc une production plus rapide. Elles sont stériles et ne produisent pas de laitance qui empêche la récolte en été chez les sauvages. Elles peuvent donc être récoltées même en été. Elles sont excellentes au goût.

Les inconvénients sont que, descendant d'une même population d'individus tétraploïdes, elles ont une faible biodiversité et sont plus sensibles, particulièrement au virus OsHV-1, qui peut anéantir la production (perte de 73 % des jeunes huîtres).

2. Avec le brevet 1995, on prend une femelle à  $3n$  obtenue par induction chimique et on bloque sa méiose pour obtenir des ovules à  $3n$ . La fécondation avec des spermatozoïdes normaux à  $1n$  issus de la méiose chez des mâles sauvages ( $2n$ ) donne un zygote à  $4n$  donc tétraploïde. Avec le brevet 2006, on utilise les mâles tétraploïdes qui donnent des spermatozoïdes diploïdes et des femelles sauvages diploïdes dont on bloque la méiose. On obtient des spermatozoïdes à  $2n$  et des ovules à  $2n$ , et la fécondation donne un zygote à  $4n$  donc tétraploïde.

3. Les mâles tétraploïdes donnent par méiose des spermatozoïdes à  $2n$  et les femelles sauvages des ovules à  $1n$ , la fécondation donne des individus à  $3n$  donc triploïdes.

4. On doit récupérer les pères tétraploïdes car ils sont fertiles et pourraient se reproduire dans le milieu aquatique. Dans ce cas la production de triploïdes ne serait plus maîtrisée et on ne connaît pas les conséquences qu'aurait une colonisation du milieu.

**8** **Étude du document 15** : D'après les données anatomiques présentées dans la matrice, on peut comparer l'état des caractères étudiés pour les quatre espèces. Deux espèces ont d'autant plus de liens de parenté qu'elles **partagent d'états dérivés** et donc qu'elles ont **d'innovations en commun**.

• **Caractère « formations épidermiques »**

Analyse : Seul l'aigle possède l'état dérivé plumes.

Conclusion : L'innovation plumes est apparue sur la branche propre à l'aigle pour les deux hypothèses.

Analyse : Seul le chat possède l'état dérivé poils.

Conclusion : L'innovation génétique poils est apparue sur la branche propre au chat pour les deux hypothèses.

• **Caractère « mode de reproduction »**

Analyse : Seul le chat sauvage possède l'état dérivé vivipare, les trois autres espèces ont l'état ancestral : ovipare.

Conclusion : L'innovation vivipare est apparue sur la branche propre au chat pour les deux hypothèses.

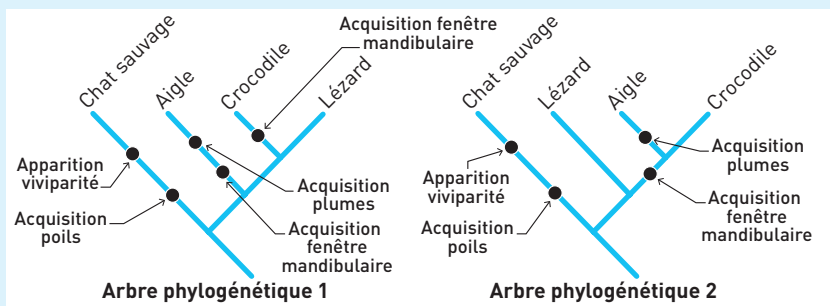
• **Caractère « fenêtre mandibulaire »**

Analyse : Seuls l'aigle et le crocodile possèdent l'état dérivé « présence d'une fenêtre mandibulaire ».

Conclusion : Pour l'arbre 1, cette innovation doit être placée sur la branche propre à l'aigle, mais aussi sur la branche propre au crocodile, car le lézard ne possède pas cette innovation. Deux innovations seraient donc apparues de manière indépendante.

Pour l'arbre 2, cette innovation est apparue chez un ancêtre commun à l'aigle et au crocodile. Cette innovation ne serait apparue qu'une seule fois.

### Doc 21 Arbres phylogénétiques complétés



**Bilan.** L'arbre phylogénétique 1 présente cinq événements alors que l'arbre 2 n'en présente que quatre. L'arbre 2 est plus simple, plus « économe » : c'est le plus probable. L'aigle et le crocodile ont un état dérivé en commun (présence de la fenêtre mandibulaire), les autres seulement des états ancestraux. Ils sont donc plus proches et ont un ancêtre commun ayant déjà cet état, l'innovation n'aurait eu lieu que dans leur branche.

9

Vous devez, après avoir lu attentivement le sujet et parcouru les documents, avoir en tête que le sujet porte sur un exemple de **sélection naturelle**. Il s'agit donc d'identifier l'agent sélectif du milieu qui favorise la transmission de l'allèle HbS au sein des populations africaines concernées puis de démontrer son action à l'aide des documents.

### Étude du document 17

Pour analyser le document 17, il faut d'abord identifier les paramètres représentés sur les deux cartes : fréquence de HbS et distribution du plasmodium à l'origine du paludisme. Ensuite il faut **comparer** ces deux répartitions et enfin les lier entre elles, c'est-à-dire établir une **corrélation**.

En Afrique, dans les zones impaludées (où le paludisme est présent), la fréquence de l'allèle S est de 5 à 20 %, donc plus élevée que ce que l'on observe ailleurs.

Il existe une corrélation entre la distribution du plasmodium responsable du paludisme et une fréquence de HbS supérieure à 1 %.

**Conclusion :** Cette corrélation pose le problème de la relation de causalité entre ces deux maladies qui n'ont en apparence aucun lien, et de la nécessité d'une étude plus approfondie de ces deux pathologies.

### Étude du document 16

- **La drépanocytose** est une maladie génétique récessive liée à une anomalie de l'hémoglobine. La présence d'un allèle normal (A) permet la production d'hémoglo-

bine normale HbA. La présence d'un allèle anormal (s) produit une hémoglobine anormale HbS qui est responsable d'une anomalie de transport du dioxygène dans le sang et d'une rigidité des globules rouges qui sont déformés (en faucille) et moins nombreux car détruits.

Les homozygotes s/s sont atteints de drépanocytose. Ils meurent jeunes, sans descendance. Les hétérozygotes A/s sont sains car la maladie est récessive.

Conclusion : La fréquence de l'allèle défavorable a tendance à diminuer dans la population. En général, un **allèle qui confère un désavantage sélectif a tendance à disparaître**.

• Le parasite *Plasmodium*, responsable du **paludisme**, se multiplie activement dans les globules rouges des sujets normaux, mais plus rarement dans ceux des hétérozygotes pour la drépanocytose.

**Interprétation** : Le paludisme provoque une mortalité plus importante chez les homozygotes plus infectés par le plasmodium que chez les hétérozygotes moins infectés. Le plasmodium réalise ici une sélection génétique des hétérozygotes.

**Bilan**. Il existerait donc un double mécanisme qui agirait sur la fréquence des allèles A et s. La fréquence de l'allèle s diminue par l'élimination des homozygotes (s/s) atteints par la drépanocytose. La fréquence de l'allèle A diminue par l'élimination des homozygotes (A/A) atteints par le paludisme. Cette double pression sélective favorise les hétérozygotes (A/s).

Si on suit l'ordre des questions dans l'énoncé, il faut d'abord traiter le maintien puis l'augmentation de la fréquence de l'allèle.

### Étude du document 18

Plus la fréquence d'un allèle défavorable est faible dans la population, plus les hétérozygotes sont nombreux par rapport aux autres génotypes. Pour une fréquence d'allèle a de 0,1 il y a 90 % de a chez les hétérozygotes, pour 0,5 il n'en reste que 50 % chez les hétérozygotes. Ainsi, plus les homozygotes sont éliminés et plus la proportion d'hétérozygotes est importante.

**Interprétation** : Un allèle défavorable peut se maintenir dans une population même quand les homozygotes sont éliminés.

L'allèle se maintient donc malgré sa basse fréquence puisque chaque hétérozygote produit moitié de gamètes qui le portent, et peut le transmettre à ses descendants.

### Étude du document 19

#### Stratégie d'analyse

- **Identifier** les paramètres mesurés : fréquence de l'allèle défavorable, effectif de la population, nombre de générations.
- **Regrouper** les évolutions semblables de la fréquence de l'allèle défavorable : populations 1 et 2.
- **Comparer** les évolutions de l'allèle pour la population 3 avec l'évolution qui décrit celle des populations 1 et 2.
- **Lier** : Identifier une relation de cause à effet.

On suit le comportement théorique d'un allèle défavorable transmis au fil des générations dans des populations qui diffèrent par leur effectif.

Dans la population 3 qui ne contient que 25 individus, l'allèle diminue et disparaît totalement en 40 générations.

Dans les populations 1 et 2 qui contiennent respectivement 200 et 2000 individus, l'allèle n'est pas éliminé, sa fréquence varie entre 0,3 et 0,7.

### Interprétation

La fréquence d'un allèle défavorable reste stable dans une population si celle-ci a un effectif suffisant, ce qui confirme qu'un allèle défavorable se maintient.

Toutefois, la taille de la population a une très grande importance. Un allèle peut être éliminé par **dérive génétique** (le faible effectif de la population ne permet qu'un faible échantillonnage des différents types de gamètes possibles à chaque génération). Dans ce cas, le hasard peut conduire à la disparition d'un allèle indépendamment de toute sélection comme c'est le cas pour la population 3.

### Bilan

L'allèle HbS à l'état **homozygote** provoque une maladie génétique sévère donc un **désavantage sélectif** fort pour l'individu. Mais il entraîne à l'état **hétérozygote** une résistance accrue au paludisme donc un **avantage sélectif** dans les régions impaludées, ce qui favorise son maintien et même son expansion dans la population.

**10** Lorsqu'on observe le monde vivant, c'est son énorme diversité qui frappe au premier abord : diversité des **phénotypes** au sein d'une espèce, diversité des espèces vivantes. Pourtant toutes les espèces possèdent des caractéristiques communes qui témoignent de leur parenté. En effet, les espèces dérivent par transformation, évolution, d'espèces ancestrales communes. L'évolution des espèces existe grâce aux **innovations génétiques** qui sont des modifications du programme génétique de certains individus d'une espèce.

Après avoir noté les innovations génétiques possibles, nous verrons les conditions nécessaires pour qu'elles puissent avoir un impact évolutif (donc, pour qu'elles soient transmises et conservées au cours du temps).

## I. La création de nouveaux allèles et la biodiversité

### 1. Les mutations

Une mutation est un changement dans la séquence de nucléotides de l'ADN. Elle se produit lors de la réplication de l'ADN d'une cellule, donc avant une division cellulaire. C'est un phénomène qui a lieu au hasard et qui est relativement rare (fréquence de 1 sur 1 000 000 répliquations).

Le résultat d'une mutation est l'apparition d'un nouvel allèle d'un gène, donc d'une nouvelle version du gène. Il peut ainsi apparaître de nombreux allèles de gènes, mais qui ne seront pas forcément conservés au cours des générations.

### 2. Mutations et biodiversité

De nouveaux allèles naissent à partir d'allèles préexistants. Si ces allèles se fixent dans les populations, ils sont à l'origine de l'apparition de nouveaux phénotypes (moléculaires – donc cellulaires et macroscopiques).

L'évolution des espèces existe grâce aux **innovations génétiques** à l'origine des **innovations évolutives**.

Une innovation évolutive peut correspondre à une diversification des phénotypes associés à un caractère (diversification au sein de l'espèce) ou à la transformation d'un caractère (ce qui peut donner naissance à une nouvelle espèce), à l'apparition d'une nouvelle fonction, voire d'un nouveau caractère. Les mutations ont d'autant plus d'impact qu'elles touchent les **gènes du développement** (appelés aussi gènes architectes). Ces gènes s'expriment très tôt au cours de la vie embryonnaire et sont à l'origine de la mise en place du plan d'organisation des espèces.

Ainsi les mutations à l'origine de la fabrication de polypeptides non fonctionnels, si elles touchent ces gènes, peuvent empêcher toute une série d'autres gènes de s'exprimer lors du développement de l'individu, et **changer complètement son phénotype**. Ce type de mutation est à l'origine de l'apparition du membre chiridien qui permet la marche.

Ainsi, si ces mutations se fixent et se transmettent, de nouvelles espèces peuvent apparaître, voire de nouveaux embranchements (ex. : apparition des tétrapodes).

Des mutations peuvent aussi perturber la chronologie du développement si elles affectent les gènes de régulation.

Il y a **hétérochronie**, qui est une modification de la durée ou/et de la vitesse de développement de l'organisme au cours de l'évolution et qui expliquerait le développement de l'encéphale humain par rapport à celui du chimpanzé.

## II. Autres causes d'innovations génétiques

### 1. Les duplications géniques et la complexification des génomes

Les mutations ponctuelles ne créent pas de nouveaux gènes, seulement de nouveaux allèles. Or l'évolution des espèces ne se fait pas seulement par transformation de caractères préexistants, elle est aussi permise grâce à l'apparition de nouveaux caractères (ex. : apparition de l'amnios chez les amniotes).

Ces nouveaux caractères sont liés à l'apparition de nouveaux gènes, qui vont coder pour de nouvelles protéines, donc pour de nouvelles fonctions.

Le mécanisme essentiel qui permet la formation de nouveaux gènes est la **duplication génique**.

Il se forme sur un chromosome deux gènes identiques à partir d'un seul. Tant que ces deux copies restent identiques, la conséquence sur le phénotype est due à la surproduction de la protéine codée par le gène. Cependant, au cours du temps, des mutations ponctuelles affectent chacune des deux copies. Les deux gènes vont donc progressivement se différencier. Après des générations, une des deux copies peut coder pour une nouvelle protéine aux fonctions différentes, donc être à l'origine de l'apparition d'un nouveau caractère. On a alors deux gènes différents.

### 2. La polyploïdisation liée à l'hybridisme

Des anomalies lors de la méiose peuvent conduire à la production de gamètes **diploïdes**, qui ont alors la totalité du matériel génétique du parent. La fécondation de deux gamètes diploïdes va permettre l'**addition du génome de chaque parent** au lieu de transmettre seulement la moitié de chacun.

Ce principe est utilisé surtout en recherche agronome pour créer de nouvelles variétés végétales alliant les qualités des parents eux-mêmes de variétés différentes.

Il consiste à produire des gamètes diploïdes en perturbant la méiose (le plus souvent par traitement chimique), puis à faire une hybridation avec les gamètes anormaux produits. Les descendants ont le double de matériel génétique, somme de ceux des deux parents. Ils peuvent avoir en conséquence les qualités des deux, d'où leur intérêt pour l'agriculture.

### 3. Le transfert de gènes viraux

Certains de nos gènes sont très proches de ceux des virus !

Les virus sont incapables, seuls, de copier leur génome et produire des molécules afin de créer de nouveaux virus. Ils ont besoin pour se reproduire d'injecter leur matériel génétique dans une cellule hôte qui va le faire à leur place. Les gènes viraux sont intégrés dans le génome de la cellule infectée qui produit alors des protéines et du matériel génétique viraux.

Si ces gènes viraux intégrés sont transmis aux descendants de l'individu infecté par le biais des gamètes, ils pourront être conservés dans l'espèce. C'est le cas des gènes des syncytines à l'origine du placenta des mammifères.

## III. La conservation des innovations

### 1. La transmission aux descendants

Les innovations génétiques doivent être présentes dans les gamètes pour être transmises à la génération suivante. Mutations et duplications doivent donc toucher les cellules germinales, pour que lors de la méiose les innovations soient réparties dans le matériel génétique des gamètes.

### 2. La sélection naturelle

Pour qu'une innovation génétique ait un impact évolutif, il faut qu'elle se transmette et se répande parmi une ou plusieurs populations de l'espèce. Pour cela, les individus qui en sont porteurs doivent se reproduire. Or l'environnement exerce une **pression (de sélection)** sur la reproduction des individus. Ainsi s'ils sont porteurs d'une innovation qui les défavorise dans leur environnement, ils peuvent mourir avant d'avoir pu se reproduire, ce qui les empêche de transmettre leur innovation. En revanche les individus favorisés par cette innovation, vivent plus longtemps et peuvent donc se reproduire plus facilement et plus longtemps. Leur innovation génétique se répand.

### 3. La dérive génétique

Certaines innovations génétiques, à l'origine de nouveaux allèles peuvent être neutres : elles n'entraînent aucun avantage ou désavantage sélectif pour les individus qui les portent. Le hasard permet ou non leur fixation au sein d'une population.

### Conclusion

Les mutations ponctuelles et les duplications sont donc à l'origine de la diversification génétique des êtres vivants. Ces innovations génétiques créent de nouveaux allèles ou de nouveaux gènes permettant l'acquisition de nouveaux caractères évolutifs ou innovations évolutives. Il peut aussi y avoir ajout de matériel génétique par polyploïdisation et transfert viral. La conservation et la transmission de ces innovations se fait par le biais des gamètes de manière aléatoire, bien que les nouveautés donnant un avantage à l'individu qui les porte soient sélectionnées et plus conservées.



## 3

# Histoire évolutive de l'Homme

L'Homme a évolué et évolue encore comme n'importe quelle autre espèce. Son histoire fait partie de celle, plus générale, des **primates**. L'espèce la plus proche est celle du chimpanzé. Qu'est-ce qui nous différencie ? Quand et comment s'est différenciée la lignée humaine ?

## I COMPARAISON HOMME-CHIMPANZÉ

### 1. Comparaison des phénotypes

#### ■ Comparaison anatomique et développement prénatal

La comparaison des squelettes de l'Homme et du chimpanzé permet de mettre en évidence de nombreuses **similitudes** dues à un **ancêtre commun proche** ayant ces caractéristiques, mais aussi des **différences (doc 1)**.

Certaines caractéristiques permettent de comprendre les différences dans leurs modes de locomotion : quadrupédie prédominante pour le chimpanzé et **bipédie exclusive pour l'Homme**.

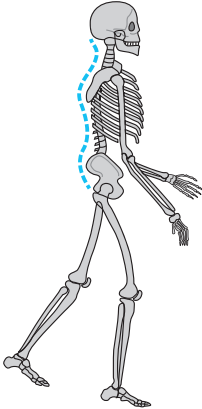
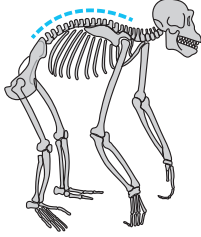


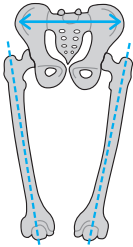
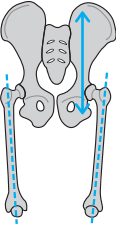
L'Homme semble être une « forme juvénile » du chimpanzé. Son développement embryonnaire est quatre fois plus long, ce qui permet une multiplication plus importante des neurones et donc le développement de l'encéphale. L'allongement de la période juvénile permet chez l'Homme de conserver un trou occipital centré et donc la capacité d'une bipédie franche (**doc 2**).

#### ■ Comparaison comportementale

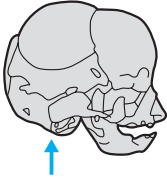
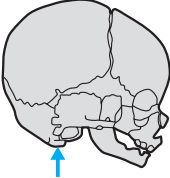
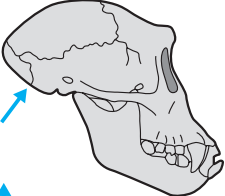
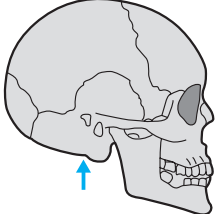
Il y a très peu de différences, car les chimpanzés vivent en communauté, communiquent entre eux, utilisent des outils simples (pierres comme percuteurs, branches effeuillées pour chercher des fourmis...), soignent leurs petits et leur transmettent leur savoir.

Cependant l'Homme a en plus un langage articulé, il maîtrise le feu et l'art ; il fabrique et utilise des outils élaborés, adaptés à un usage, ce qui traduit l'existence d'un projet... L'acquisition du langage articulé se fait grâce au développement d'une partie du cortex cérébral (aires de Broca ou aires du langage) et à l'abaissement du larynx (position de l'os hyoïde). Elle est donc liée à des modifications touchant des gènes du développement. L'apprentissage chez les humains est plus long (développement postnatal plus long).

## Doc 1 Comparaison des squelettes de l'Homme et du chimpanzé

	HOMME		CHIMPANZÉ	
<b>Colonne vertébrale</b>	4 courbures		1 courbure	
<b>Membres</b>	Bras plus courts que les jambes		Bras plus longs que les jambes	
<b>Trou occipital</b>	Centré		En arrière	
<b>Volume cérébral</b>	1 300 cm <sup>3</sup> à 1 500 cm <sup>3</sup>		320 cm <sup>3</sup> à 450 cm <sup>3</sup>	
<b>Bassin</b>	Court et large		Long et étroit	
<b>Fémurs</b>	Obliques		Droits	

## Doc 2 Comparaison des crânes de l'Homme et du chimpanzé

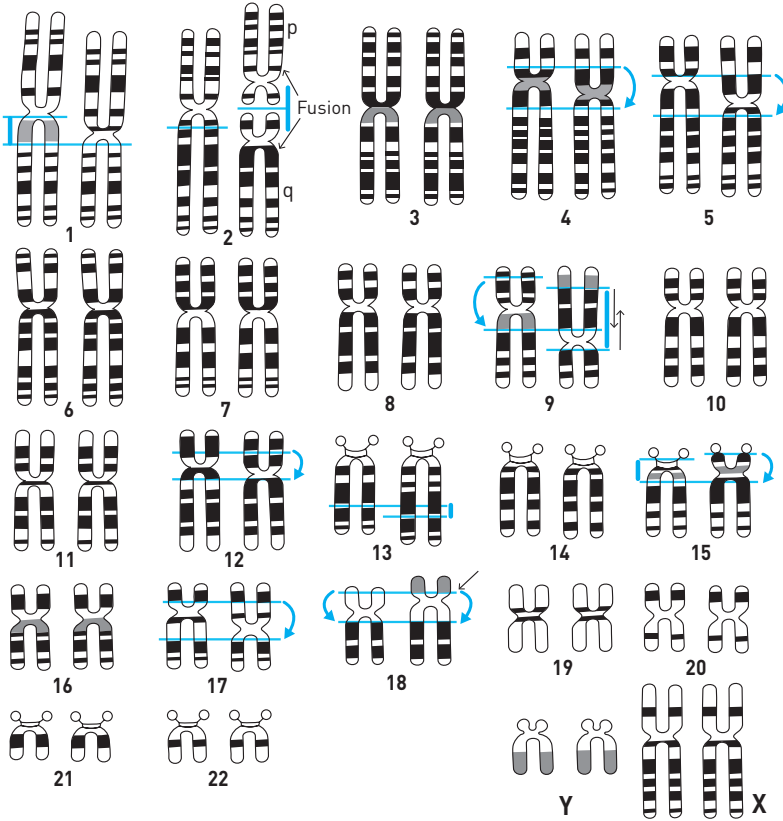
	Chimpanzé	Homme
<b>Stade fœtal</b>		
<b>Stade adulte</b>		
	↑ Position du trou occipital	

## 2. Comparaison génétique

### ■ Caryotypes

L'Homme a 23 paires de chromosomes et le chimpanzé 24. La différence n'est pas si importante, car le chromosome 2 humain correspond à la fusion de deux chromosomes du singe (p et q). Les caryotypes de l'Homme et du chimpanzé sont très proches, il y a seulement des modifications de la position de fragments de chromosomes, donc de gènes (document 3).

#### Doc 3 Caryotypes comparés de l'Homme et du chimpanzé



Ce document présente en parallèle un chromosome de chaque espèce. Pour chaque « paire », le chromosome de gauche est celui de l'Homme, celui de droite est celui du chimpanzé. Les flèches incurvées montrent les changements de position de fragments de chromosomes appelés **inversions**. Les flèches droites montrent d'autres changements comme des ajouts ou des pertes de fragments de chromosomes.

### ■ Gènes

La comparaison des deux séquences d'ADN révèle qu'elles sont **identiques sur 99 %** de leur longueur !

### 3. Expression du phénotype : génétique + environnement

■ Des biologistes américains ont comparé 10 000 gènes du cortex cérébral de l'Homme, du chimpanzé et du macaque. Ils ont remarqué que, pour la quasi-totalité, la différence consistait en une surexpression chez l'Homme. Les différences anatomiques présentées dans le document 2 par exemple s'expliquent par une **hétérochronie**, c'est-à-dire une modification de la durée ou/et de la vitesse de développement de l'organisme au cours de l'évolution. Elle est certainement due à une expression plus importante ou plus longue des gènes de développement chez l'Homme.

■ Le **phénotype humain**, comme celui des grands singes proches, s'acquiert au cours du développement pré et postnatal, sous l'effet de l'interaction entre **l'expression de l'information génétique et l'environnement** (dont la relation aux autres individus). Voir le programme de première S.

#### L'essentiel

L'Homme actuel se caractérise par une face réduite, un volume crânien important, des particularités squelettiques liées à la bipédie permanente, des pratiques culturelles (outils, art...). Génétiquement il est très proche du chimpanzé.

## II INFORMATIONS APPORTÉES PAR LES FOSSILES ET HISTOIRE ÉVOLUTIVE DES PRIMATES

### 1. Comparaison des principaux fossiles

#### Doc 4 Tableau comparatif des différents *Homo*

Espèces	Période (millions d'années)	Localisation	Taille adulte (m)	Volume cérébral (cm <sup>3</sup> )	Industrie	Maîtrise feu	Langage articulé
<i>H. habilis</i>	2,5 à 1,5	Afrique	1,0 à 1,4	550 à 700	galets aménagés	non	non
<i>H. ergaster</i>	1,9 à 1,2	Est et Sud de l'Afrique	1,5 à 1,7	700 à 850	bifaces	oui	non
<i>H. erectus</i>	2 à 0,7	Afrique, Asie, Europe	1,5 à 1,7	850 à 1 100	nombreux en pierre	oui	oui
<i>H. sapiens neanderthalensis</i>	0,15 à 0,028	Europe, Ouest de l'Asie	1,6	1 500 à 1 750	nombreux	oui	oui
<i>H. sapiens sapiens</i>	Depuis 0,16 au moins	monde	1,4 à 1,9	1 300 à 1 500	nombreux et de matière variée	oui	oui

## 2. Des premiers primates à la divergence de la lignée humaine

- Les **premiers primates** fossiles datent de **– 65 à – 50 millions d'années**. Ils sont variés et ne sont identiques ni à l'Homme actuel, ni aux singes actuels. Aucun ne peut être à coup sûr considéré comme un ancêtre de l'Homme et/ou du chimpanzé.
- La **lignée humaine**, caractérisée par la bipédie (groupe des **homininés**), semble être apparue il y a environ **7 millions d'années** en Afrique. C'est en effet l'âge du fossile de primate bipède connu le plus ancien. **Toumaï** (*Sahelantropus tchadensis*) n'est qu'un crâne de capacité de 350 cm<sup>3</sup> avec un trou occipital avancé et un émail dentaire plus épais que celui du chimpanzé, mais moins que celui de l'Homme.
- Ensuite on trouve les **australopithèques** (genre *Australopithecus*) très diversifiés en Afrique, qui sont devenus de plus en plus bipèdes, plus grands et dont l'encéphale s'est développé.
- Un groupe de ces primates a certainement subi des modifications génétiques pour donner naissance il y a environ 2,5 millions d'années au **genre Homo**. La grande diversité de ces grands primates, connue par les fossiles, est aujourd'hui réduite car il n'existe plus qu'une seule espèce : la nôtre, ***Homo sapiens sapiens*** !

## 3. Évolution au sein du genre Homo

- Au cours de l'évolution des *Homo*, l'aptitude à la marche et à la course à pied s'est développée, l'encéphale est devenu plus volumineux. La libération de la main par la bipédie, le développement du cerveau, l'allongement de la période d'apprentissage, l'acquisition d'un langage articulé ont permis la transmission de savoirs de génération en génération. C'est la base de l'élaboration des outils de plus en plus sophistiqués et de pratiques culturelles comme la maîtrise du feu, le culte des morts et l'art.
- Cependant la phylogénie au sein de ce groupe dont nous sommes l'unique survivant est difficile à faire. En effet on a peu de fossiles et certains sont très dégradés (on ne peut étudier qu'un membre, un crâne, une dent...). L'ADN se conserve très mal et seul le matériel génétique des Néanderthaliens peut être comparé au nôtre.
- On est presque certains que *Homo erectus* est notre ancêtre, mais plus on remonte le temps, plus la probabilité que des fossiles soient conservés diminue. Par conséquent, au-delà de quelques milliers d'années, on ne peut savoir si un fossile est notre ancêtre direct ou une espèce proche (« cousine »).
- Au sein de la lignée humaine comme au sein des *Homo sapiens*, la sélection naturelle et la dérive génétique ont permis le développement de certaines populations ayant un avantage et survivant plus. Leur génome a été conservé dans l'évolution. L'acquisition d'une industrie a permis l'élaboration d'armes de plus

en plus sophistiquées qui ont donné un avantage sélectif certain à ceux qui pouvaient les utiliser, pour la chasse par exemple.

### L'essentiel

L'étude des fossiles permet de mettre en évidence une acquisition des caractéristiques du genre humain au cours de milliers d'années, on parle d'hominisation. L'Homme a évolué et évolue encore comme n'importe quelle autre espèce.

## SAVOIR-FAIRE

### Vocabulaire

■ **Primate** : Mammifère caractérisé par des yeux frontaux permettant une vision binoculaire à mettre en rapport avec un développement important des aires visuelles cérébrales ; des membres à cinq doigts terminés par un ongle plat ; des mains préhensiles (qui peuvent saisir des objets) avec les pouces opposables.

■ **Homininés** : « Lignée humaine », ensemble des primates avec bipédie franche, regroupant les Australopithèques et les *Homo*. Ce ne sont pas seulement nos ancêtres mais aussi nos cousins. Il existait une grande biodiversité au sein de ce groupe. À une époque donnée, ont coexisté des espèces différentes d'homininés en un même lieu. Actuellement, il n'existe plus qu'un seul représentant : nous.

■ **Genre *Homo*** : Ensemble d'espèces au sein des homininés qui ont la capacité de fabriquer des outils, d'élaborer une culture principalement grâce au développement de leur encéphale et de leur période d'apprentissage.

■ **Hominisation** : Ensemble des processus évolutifs engendrant la lignée des homininés à partir de celle des primates. L'acquisition de la bipédie et la disparition des caractères simiens sont les étapes les plus importantes.

### Compétences

#### 1. Positionner un primate actuel ou fossile dans un arbre phylogénétique

À partir de données génétiques ou morphologiques, on peut placer une espèce dans un arbre phylogénétique. Celles qui ont des acquisitions (états dérivés) en commun sont plus proches entre elles que des autres.

Voir le Savoir-faire du chapitre 2.

Sont plus proches également celles qui ont des séquences de nucléotides (ADN) ou d'acides aminés (protéines) les plus semblables. Plus le nombre de différences dans les séquences est élevé plus les espèces étudiées sont éloignées. L'ancêtre commun à deux espèces porte les états dérivés, les séquences qu'ils ont en commun.

## 2. Comparer chimpanzé et Homme

Il faut mettre en évidence les points communs pour montrer des liens de parenté ou les différences pour montrer les caractères propres à l'Homme.

## 3. Placer *Homo* dans les primates

### Repères

#### 1. Connaître les caractéristiques des fossiles du genre *Homo*

La comparaison de l'Homme actuel et des autres primates permet de dégager les caractéristiques propres au genre *Homo*, autrement dit ses innovations évolutives.

– Critères anatomiques liés à la station bipède permanente : colonne à quatre courbures, bassin court et large, fémurs convergents, trou occipital central, pouce du pied non opposable et voûte plantaire.

Voir le document 1 du cours.

– Critères liés au développement de l'encéphale : développement du volume intracrânien avec en parallèle celui de l'encéphale.

– Critères industriels et culturels : fabrication d'outils de plus en plus sophistiqués au cours du temps, maîtrise du feu, art et culte des morts ; acquisition du langage articulé à partir d'*Homo erectus*.

Voir le paragraphe II.3 du cours.

– Critères crâniens : face courte et redressée, arcade dentaire parabolique (en U chez les singes), régression des canines et épaississement de l'émail avec un régime alimentaire de plus en plus omnivore.

Voir le document 1 du cours.

#### 2. Connaître quelques fossiles repères du genre *Homo*

Il faut connaître leur période d'existence, les innovations principales qui les caractérisent en rapport avec la bipédie, le développement de l'encéphale et les pratiques culturelles.

## EXERCICES D'APPLICATION

1 QCM

★ 10 min ▶ P. 81

Chaque série d'affirmations peut comporter une ou plusieurs suites exactes.

**Relevez les affirmations correctes et corrigez celles qui sont fausses.**

**1. L'évolution de l'Homme :**

- a. est due à des mutations de gènes de développement.
- b. n'est pas dépendante de la sélection naturelle.
- c. n'a commencé qu'il y a 10 000 ans.
- d. est stoppée de nos jours.

**2. Les Primates :**

- a. sont tous bipèdes.
- b. sont des mammifères.
- c. sont des tétrapodes.
- d. ne contiennent pas le groupe des australopithèques.
- e. sont caractérisés par un pouce opposable.

**3. *Homo erectus* :**

- a. était uniquement africain.
- b. maîtrisait le feu.
- c. a colonisé une grande partie du globe.
- d. avait un langage articulé.

**4. L'Homme de Néanderthal :**

- a. appartient à la lignée humaine.
- b. appartient au genre *Homo*.
- c. a un encéphale moins développé que *Homo sapiens sapiens*.
- d. a colonisé l'Europe.
- e. n'a pas croisé *Homo sapiens sapiens*.

2 L'ADOLESCENT DE TURKANA

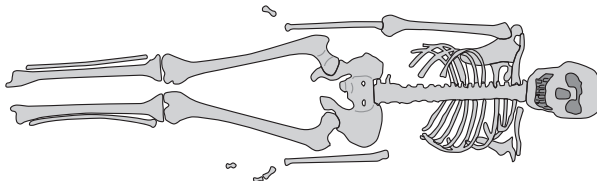
★★ 15 min ▶ P. 81

En 1984, aux abords du lac Turkana au nord du Kenya, des paléontologues ont découvert un fossile particulièrement bien conservé (**doc 5**). Il est daté de 1,6 million d'années et le volume de sa boîte crânienne est de 900 cm<sup>3</sup>.

▶ Voir Savoir-faire, Repère 1.

1. Pourquoi a-t-on rangé ce fossile dans la lignée humaine ?
2. Quelles particularités révèlent que ce fossile est un *Homo* ?

**Doc 5 Schéma du fossile trouvé à Turkana**





## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

3

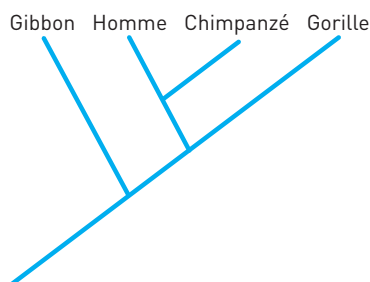
### 3 LECTURE D'UN ARBRE PHYLOGÉNÉTIQUE DE PRIMATES

★★ 15 min ▶ P. 81

À partir des seules informations des documents :

- placez sur l'arbre phylogénétique les innovations évolutives à l'origine des caractères dérivés du tableau ;
- placez l'orang-outan sur l'arbre phylogénétique et précisez le degré de parenté entre l'orang-outan et chacune des autres espèces de l'arbre ;
- citez les caractéristiques du plus récent ancêtre commun à l'Homme, au chimpanzé et au gorille.

#### Doc 6 Arbre phylogénétique de quelques espèces de primates actuels



Voir Savoir-faire, Compétence 1.

#### Doc 7 Tableau des caractères dérivés

Caractères dérivés	Espèce				
	Gibbon	Homme	Chimpanzé	Gorille	Orang-outan
Absence de queue	+	+	+	+	+
Fusion prénatale des os du poignet	-	+	+	+	-
Présence d'un sinus frontal	-	+	+	+	+
Bipédie permanente	-	+	-	-	-

Le signe + signifie que le caractère dérivé est présent, le signe - signifie qu'il est absent.

### 4 LA PARENTÉ CHEZ LES PRIMATES

★★ 25 min ▶ P. 82

Montrez que les deux documents concourent à identifier le même primate comme étant le plus proche parent de l'Homme.

Voir Savoir-faire, Compétence 1.

**Doc 8 État de quelques caractères anatomiques pour quatre primates**

Caractères	Bonobo	Homme	Gorille	Gibbon
Omoplate dorsale et allongée	1	1	1	1
Fusion prénatale entre l'os central et l'os scaphoïde	1	1	1	0
Suture incisive entre le maxillaire et le prémaxillaire effacée chez l'adulte	1	1	0	0
Bassin large et court	0	1	0	0

0 : état ancestral du caractère

1 : état dérivé du caractère

(L'os scaphoïde est un os du poignet.)

On ne peut établir un lien de parenté que sur le partage d'états dérivés, ainsi un des caractères anatomiques présentés ici est inutile dans cette optique.

**Doc 9 Comparaison des séquences de nucléotides du gène de l'involucrine\* chez quelques primates**

Le tableau ci-après représente des valeurs exprimées en pourcentage de ressemblances entre les séquences comparées deux à deux.

\*L'involucrine est une protéine présente dans les cellules de l'épiderme.

	Homme	Gorille	Bonobo	Gibbon
Homme	100	88,7	94,1	85,3
Gorille		100	97,4	86,1
Bonobo			100	85,7
Gibbon				100

Le pourcentage de ressemblances traduit le temps qui sépare deux espèces de leur ancêtre commun : plus le pourcentage est élevé, plus cet ancêtre est proche dans le temps.

**5 APPORT DES DONNÉES COMPORTEMENTALES  
DANS L'ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION**

★★★ 30 min | ► P. 82

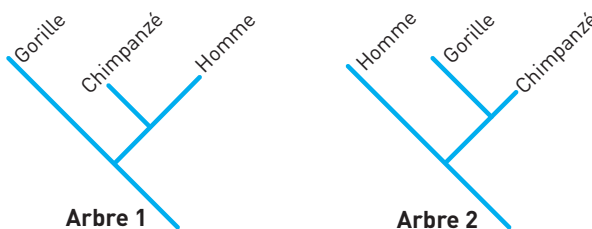
Les propositions suivantes sont-elles justes ? Justifiez votre choix à partir de l'étude des documents proposés.

- Dans l'arbre 1 du document 10, l'Homme et le chimpanzé sont les espèces les plus proches, car leur dernier ancêtre commun est plus récent.
- Dans l'arbre 2 du document 10, l'Homme et le gorille sont les espèces les plus proches.
- Le document 11 présente le résultat de la comparaison des génomes des trois espèces.

4. D'après le document 11, Homme et chimpanzé ont 89 % de différences entre les séquences de leur gène de la NADH déshydrogénase.
5. Les séquences de l'Homme et du gorille du document 11 ne sont pas homologues.
6. Le document 11 montre que l'ancêtre commun au chimpanzé et à l'Homme est plus récent que celui du chimpanzé et du gorille.
7. Le document 12 valide l'arbre 2.
8. Les documents 11 et 12 mis en relation concordent pour valider l'arbre 1.

Pour chaque point, il faut trouver une ou plusieurs informations dans les documents afin de confirmer ou infirmer la proposition. Attention aux négations et aux relations de cause et conséquence.

### Doc 10 Deux arbres phylogénétiques possibles entre trois primates



D'après logiciel Phylogène

### Doc 11 Données génétiques : pourcentage de ressemblance du gène de la NADH déshydrogénase chez trois espèces (Homme, chimpanzé et gorille)

	Homme	Chimpanzé	Gorille
Homme	100	89	86,5
Chimpanzé		100	87,8
Gorille			100

### Doc 12 Données sur les comportements et la locomotion

Les primatologues s'approchent sans bruit d'une clairière dans la forêt de Taï en Côte d'Ivoire. Ils entendent des bruits sourds et des craquements répétés. Ils ont l'impression qu'un petit groupe s'affaire en ces lieux. Sans doute utilisent-ils des outils rudimentaires à une tâche quotidienne. Entrant dans la clairière, ils découvrent plusieurs individus occupés à casser, avec des marteaux de bois et des enclumes, des noix de Coula, presque aussi dures que de la pierre, mais bien nourrissantes. (...). À bien des égards, ce groupe ressemble à une famille en quête de nourriture. Les marteaux et les enclumes qu'il laisse derrière lui, et dont certains sont en pierre, exciteraient l'imagination de tout anthropologue qui cherche les signes d'une civilisation primitive. Pourtant, les habitants de cette forêt sont non pas des Hommes, mais des chimpanzés ! (...) Ces comportements placent les chimpanzés dans une classe à part car ils ont des coutumes plus élaborées que n'importe quel autre animal déjà étudié.

D'après Whiten et Boesch, *La Culture des chimpanzés*, dossier *Pour la science* n° 57, octobre 2007

**6 PLACE DU GENRE *HOMO* DANS L'ÉVOLUTION** ★★★ 30 min ▶ P. 83

Le genre *Homo* regroupe l'Homme actuel et des fossiles ayant des caractères proches.

**Doc 13 Tableau de caractères morpho-anatomiques au sein des primates**

	Épaisseur de l'émail des dents	Gros orteil	Os iliaque*	Prognathisme**	Position du trou occipital	Saillie des pommettes
Chimpanzé	Fin	Écarté	Allongé	Marqué	En arrière	Peu saillante
Australopithèque des Afars	Épais	Écarté	Court	Marqué	Intermédiaire	Saillante
Homme de Néanderthal	Épais	Rapproché	Court	Absent	Avancé	Peu saillante
Homme de Cromagnon	Épais	Rapproché	Court	Absent	Avancé	Peu saillante

(dérivés = innovants : cases grises ; ancestraux : cases blanches)

\* os du bassin

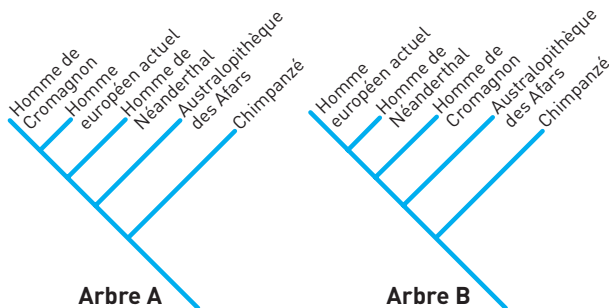
\*\* mâchoire en avant

**Doc 14 Matrice des différences entre des fragments d'ADN homologues, chez quatre espèces d'hominoïdes**

	Homme de Néanderthal	Homme de Cromagnon ( <i>Homo sapiens</i> )	Homme européen actuel ( <i>Homo sapiens</i> )	Chimpanzé
Homme de Néanderthal	0	22	23	59
Homme de Cromagnon		0	1	58
Homme européen actuel			0	58
Chimpanzé				0

Attention ce sont ici les différences qui sont comptabilisées entre les séquences. Le pourcentage de différences traduit le temps qui sépare deux espèces de leur ancêtre commun : plus le pourcentage est élevé, plus cet ancêtre est éloigné dans le temps.

### Doc 15 Deux propositions d'arbres phylogénétiques établissant les parentés au sein des primates



1. Citez les cinq espèces d'*Homo* que vous connaissez.
2. D'après le document 13 quels sont les caractères morpho-anatomiques dérivés (ou innovants) propres au genre *Homo* ?
3. En utilisant les informations des documents 13 et 14, précisez quel arbre du document 15 rend compte de la façon la plus exacte de l'évolution de la lignée humaine.

Argumentez votre réponse.

 Voir Savoir-faire, Compétence 1.

## EXERCICE D'APPROFONDISSEMENT

7

### HOMO FLORESIENSIS, UNE POLÉMIQUE

AU SEIN DE LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE

★★★

40 min

▶ P. 83



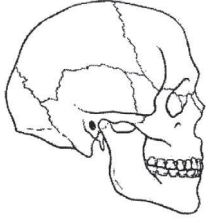

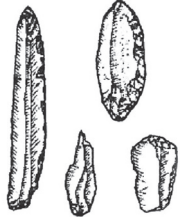
Une équipe australo-indonésienne a découvert en 2003 un fossile très complet d'Homininé (nommé LB1) dans une grotte de l'île de Florès en Indonésie. Cette découverte a été complétée peu après par la mise à jour, dans la même grotte, des restes de cinq autres individus de la même espèce.

1. Justifiez, par une analyse détaillée des documents 16 et 17, pourquoi les découvreurs du fossile LB1 proposent de créer une nouvelle espèce baptisée *Homo floresiensis*, rangée dans le genre *Homo* et considérée comme descendant d'*Homo erectus* sur l'île de Florès.

2. Les *Homo floresiensis* auraient vécu sur l'île de Florès entre – 95 000 et – 12 000 ans environ, LB1 est daté de 18 000 ans.

Que remettent en cause les informations du document 18 ?

### Doc 16 Données relatives à *Australopithecus*, *Homo erectus* et *Homo sapiens*

	<i>Australopithecus</i>	<i>Homo erectus</i>	<i>Homo sapiens</i>
Forme du crâne			
Boîte crânienne	Épaisse	Épaisse	Fine
Volume crânien	450 à 530 cm <sup>3</sup>	800 à 1 200 cm <sup>3</sup>	1 300 à 1 500 cm <sup>3</sup>
Taille adulte	1,05 à 1,30 m	1,55 à 1,65 m	1,60 à 1,80 m
Outils produits	Aucune fabrication d'outils de pierre n'est avérée		
Maîtrise du feu	Non	Oui	Oui
Langage articulé	Non	Probable	Oui

### Doc 17 Caractéristiques du fossile nommé LB1 (une femelle adulte) trouvé sur l'île de Florès

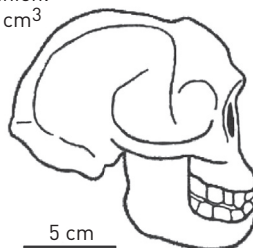
[...] lors des fouilles qui ont mis à jour *Homo floresiensis*, des outils bien plus élaborés ont été trouvés au milieu de restes d'éléphants nains [...]. Pour les découvreurs, cela suggère que *Homo floresiensis* était un chasseur d'éléphants nains. S'il est possible qu'un seul individu ait pu venir à bout d'un jeune éléphant nain, les restes de spécimens adultes pesant jusqu'à une demi-tonne laissent penser que les petits hommes de Florès pratiquaient une chasse coordonnée, une activité qui [...] nécessitait un langage. Des restes d'animaux carbonisés ont aussi été retrouvés dans la caverne : la cuisine faisait partie du répertoire culturel d'*Homo floresiensis*.

D'après Kate Wong, « *Homo floresiensis*, le plus petit hominidé »,  
*Pour la Science*, mars 2005

**Aspect physique**

Boîte crânienne épaisse  
Taille : entre 1,06 et 1,20 m

Volume crânien:  
380 à 530 cm<sup>3</sup>

**Outils trouvés avec LB1**

Pointe



Poinçon



Lame

La difficulté de l'exercice est de **comparer** les données du document 17 à celles du document 16, sans décrire celui-ci seul.

**Doc 18 Une autre hypothèse**

Mais à qui appartient le petit squelette mis au jour en septembre 2003 par une équipe australo-indonésienne dans la grotte de Liang Bua, sur l'île de Florès ? Depuis l'annonce de la découverte, la polémique n'a jamais cessé.

Pour ses découvreurs, il s'agit clairement d'un représentant d'une nouvelle espèce d'Homme, *Homo floresiensis*, issue de l'*Homo erectus*.

Mais cette interprétation n'est pas partagée par tous. Quelques jours seulement après l'annonce de la découverte, Marciej Henneberg de l'université d'Adélaïde faisait déjà part de ses doutes sur l'identité du squelette : l'Homme de Florès lui rappelait un *Homo sapiens* vieux de 4000 ans découvert en Crète souffrant de microcéphalie, une anomalie morphologique caractérisée par une tête et un encéphale anormalement petits, généralement accompagnée de capacités intellectuelles réduites...

D'après Olivier Boulanger, « *Homo floresiensis* : polémique autour d'un (trop) petit cerveau », *universciens.fr*, juin 2006

# CONTRÔLE

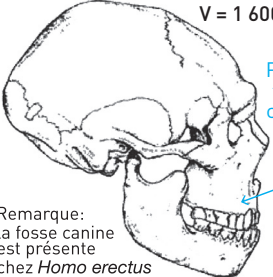
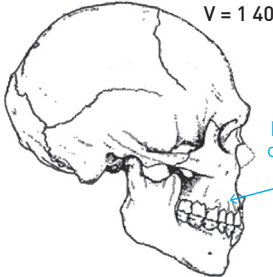
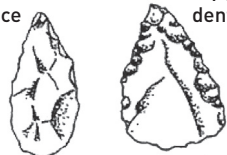

## 8 L'HOMME DE NÉANDERTHAL

★★★ 40 min ▶ P. 84

Les premiers fossiles de l'Homme de Néanderthal ont été trouvés en 1856 dans la vallée de **Néander** en Allemagne. Depuis, de nombreuses fouilles ont mis à jour des spécimens qui ont été l'objet d'études variées. Les résultats de certaines de ces études sont présentés dans les documents suivants.

### Doc 19 Données morphologiques et culturelles relatives à l'Homme de Néanderthal et à l'Homme moderne

D'après [www.liominides.com](http://www.liominides.com)

	Homme de Néanderthal	Homme moderne
Crâne	 <p>V = 1 600 cm<sup>3</sup></p> <p>Pas de fosse canine</p> <p>Remarque: la fosse canine est présente chez <i>Homo erectus</i></p>	 <p>V = 1 400 cm<sup>3</sup></p> <p>Fosse canine</p>
Stature	Bipédie permanente	Bipédie permanente
Caractères du squelette	Taille moyenne : 1,60 m, aspect trapu, articulations larges et massives, avant-bras et jambes courts relativement aux bras et cuisses	Taille moyenne : 1,75 m, squelette élancé aux articulations fines, avant-bras long relativement au bras, jambe et cuisse de taille équivalente
Outils	<p>Biface</p>  <p>Pointe denticulée</p> <p>Outils obtenus par débitage en lames</p>	 <p>Pointes</p> <p>Aiguilles</p> <p>Outils obtenus par débitage en lames</p>

Depuis 1997, des scientifiques ont identifié un fragment d'ADN similaire chez plusieurs fossiles d'Homme de Néanderthal découverts dans des régions différentes d'Europe.

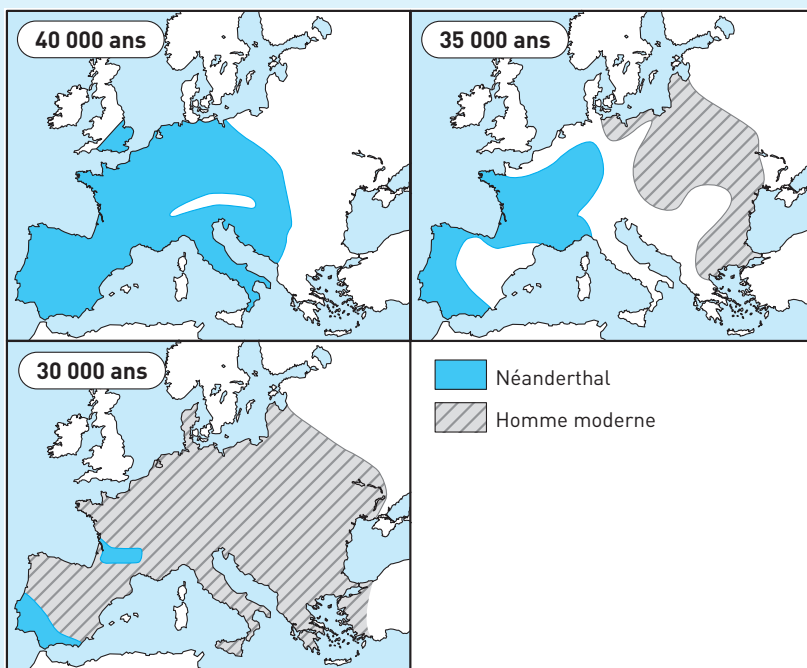
Ces fragments d'ADN ont été comparés à la séquence équivalente et la plus fréquente chez l'Homme actuel, prise comme référence.



## Doc 20 Comparaison d'ADN humain et néanderthalien

Homme	TCACACATCAACTGCAACTCAAAGCCACCC
Néanderthal 1	TCATACATCAACTACAACCTCAAAGACACCC
Néanderthal 2	TCATACATCAACTACAACCTCAAAGACACCC
Néanderthal 3	TCATACATCAACTACAACCTCAAAGACACCC
Néanderthal 4	TCATACATCAACTACAACCTCAAAGACACCC
Néanderthal 5	TCATACATCAACTACAACCTCAAAGACGCC
Néanderthal 6	TCATACATCAACTACAACCTCAAAGACGCC
Néanderthal 7	TCATACATCAACTACAACCTCAAAGACGCC
Néanderthal 8	TCATACATCAACTACAACCTCAAAGACACCC

## Doc 21 Aires de répartition de l'Homme de Néanderthal et de l'Homme moderne




Les fossiles de l'Homme de Néanderthal ont été retrouvés principalement en Europe et en Asie occidentale et ont été datés de – 200 000 ans à – 30 000 ans pour les plus récents. Les plus anciens Hommes modernes vivaient en Afrique de l'Est il y a – 200 000 ans et se sont répandus en Afrique vers le nord et vers le sud, puis en Asie et en Europe il y a – 35 000 ans.

Exploitez l'ensemble des documents afin de présenter des arguments en faveur de chacune des affirmations suivantes.

1. L'Homme de Néanderthal appartient au genre *Homo* de la lignée humaine.
2. L'Homme de Néanderthal est un *Homo* (espèce) différent de l'Homme moderne.
3. L'évolution des *Homo* présente un caractère buissonnant, ce qui implique que plusieurs représentants différents ont coexisté.

**9** L'ÉVOLUTION VERS L'HOMME ACTUEL | ★★★ | 60 min | ► P. 85

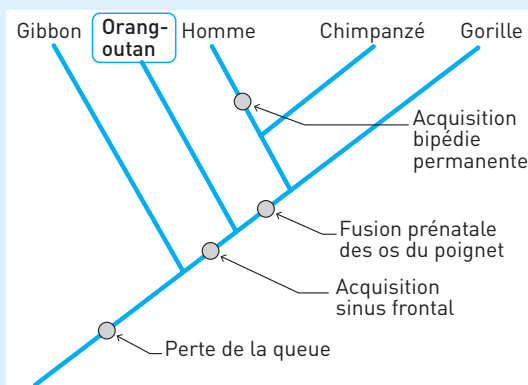
Exposez les critères de l'appartenance à la lignée humaine en fondant l'exposé sur la comparaison entre l'Homme actuel et un singe anthropomorphe comme le chimpanzé ; puis indiquez les étapes de l'acquisition de ces critères.

 Voir Savoir-faire, Repère 1.

## CORRIGÉS

- 1** 1. L'évolution de l'Homme : **a.** Vrai. **b.** Faux : est dépendante de la sélection naturelle comme celle de tous les êtres vivants. **c.** Faux : a commencé il y a plus de 10 000 ans. **d.** Faux : n'est pas stoppée de nos jours.
2. Les primates : **a.** Vrai. **b.** Vrai. **c.** Vrai. **d.** Faux : contiennent le groupe des australopithèques. **e.** Vrai.
3. *Homo erectus* : **a.** Faux : était présent en Afrique mais aussi en Europe et en Asie. **b.** Vrai. **c.** Vrai. **d.** Vrai.
4. L'Homme de Néanderthal : **a.** Vrai. **b.** Vrai. **c.** Faux : a un encéphale plus développé que *Homo sapiens sapiens*. **d.** Vrai. **e.** Faux : a croisé *Homo sapiens sapiens*. Ils ont vécu en même temps en Europe de - 100 000 à - 28 000 ans.

- 2** 1. On a rangé ce fossile dans la lignée humaine car il a des fémurs obliques, un bassin court et large, des bras plus courts que les jambes, caractéristiques de la bipédie.
2. Les particularités qui révèlent que ce fossile est un *Homo* sont son volume crânien trop important pour être celui d'un australopithèque. La présence d'outils pourrait prouver cette hypothèse.

**3** Doc 22 Arbre complété

On place une innovation évolutive sur la branche commune uniquement à toutes les espèces ayant cette innovation. Elle est apparue chez un de leurs ancêtres communs.

Par exemple l'acquisition du sinus frontal a eu lieu chez un ancêtre de l'orang-outan, de l'Homme, du gorille et du chimpanzé car ils ont tous ce sinus. Le gibbon ne l'a pas, alors on place l'innovation après la ramification différenciant le gibbon des quatre autres primates.

L'orang-outan a un sinus frontal mais pas de fusion prénatale des os du poignet, il est donc plus proche de l'Homme, du gorille et du chimpanzé que du gibbon car il a un état dérivé en commun en plus (sinus frontal). Cependant il faut placer sa branche avant l'innovation fusion prénatale des os du poignet car il ne l'a pas.

L'ancêtre commun à l'Homme, au gorille et au chimpanzé avait les innovations communes à eux trois : pas de queue, sinus frontal, fusion prénatale des os du poignet, mais pas de bipédie permanente.

**4** Il faut prendre les informations dans chaque document, faire une conclusion partielle, puis conclure en répondant à la question posée.

#### **Données anatomiques (document 8)**

Les quatre primates partagent plusieurs états dérivés :

- l'omoplate dorsale et allongée est présente chez tous ;
- bonobo, Homme et gorille partagent la fusion de l'os central et du scaphoïde ;
- bonobo et Homme partagent la suture incisive effacée chez l'adulte ;
- seul l'Homme a un bassin large et court. Ce caractère ne peut être utilisé pour mettre en évidence des liens de parenté car il n'est pas partagé par d'autres espèces. Donc l'Homme a 3 états dérivés en commun avec le bonobo, contre 2 avec le gorille et un seul avec le gibbon. Le plus proche parent de l'Homme est le bonobo.

#### **Données moléculaires (document 9)**

Le tableau représente des valeurs exprimées en pourcentage de ressemblances entre les séquences comparées deux à deux d'une protéine (involucrine) chez les quatre espèces. L'Homme a 94,1 % de ressemblances avec le bonobo, contre 88,7 % avec le gorille et 85,3 % avec le gibbon.

Or, plus des séquences sont semblables plus les espèces qui les portent sont proches dans l'évolution. Le primate plus proche de l'Homme est donc le bonobo.

**Conclusion.** Les deux documents montrent que le primate plus proche parent de l'Homme est le bonobo.

**5** 1. Vrai : Dans l'arbre 1 la ramification qui représente l'ancêtre commun de l'Homme et du chimpanzé est la plus récente car la plus vers le haut de l'arbre. Le haut représente l'époque actuelle. L'Homme et le chimpanzé sont les espèces les plus proches.

2. Faux : Dans l'arbre 2, ce sont le chimpanzé et le gorille qui sont les espèces les plus proches car leur ancêtre commun est le plus récent.

3. Vrai : Le document 11 présente le résultat de la comparaison d'une partie des génomes des trois espèces au niveau du gène de la NADH déshydrogénase uniquement. Ce sont les séquences du même gène comparées pour les trois espèces.

4. Faux : D'après le document 11 Homme et chimpanzé ont 89 % de ressemblances entre les séquences de leur gène de la NADH déshydrogénase.

5. Vrai : Les séquences de l'Homme et du gorille du gène de la NADH déshydrogénase du document 11 sont homologues, car leurs séquences sont celles d'un seul gène.

6. Vrai : Le document 11 montre que l'ancêtre commun au chimpanzé et à l'Homme est plus récent que celui du chimpanzé et du gorille. Il existe plus de ressemblances (89 %) entre le chimpanzé et l'Homme, qu'entre le chimpanzé et le gorille (87,8 %). Leur ancêtre commun est donc plus proche car il y a plus de ressemblances.

7. Faux : Des chimpanzés utilisent des outils (des marteaux en bois) pour casser des noix afin de pouvoir s'en nourrir. Ceci les rapproche de l'Homme et de ses ancêtres de la lignée humaine, comme sur l'arbre 1. Le document 12 valide l'arbre 1, car il rapproche les chimpanzés des hommes et non des gorilles.

8. Vrai : La séquence du gène de la NADH déshydrogénase chez l'Homme est à 89 % identique à celle du chimpanzé, contre 86,5 % avec le Gorille. Les séquences du gorille et du chimpanzé ont 87,8 % de similitudes. La comparaison des ces molécules homologues montre que l'Homme et le chimpanzé seraient donc les plus proches comme cela est présenté sur l'arbre 1. Le document 12 valide l'arbre 1, car il rapproche les chimpanzés des hommes et non des gorilles. Donc les documents 11 et 12 mis en relation concordent pour valider l'arbre 1.

**6** 1. Les cinq espèces d'*Homo* sont *Homo habilis*, *Homo ergaster*, *Homo erectus*, *Homo sapiens neanderthalensis*, *Homo sapiens sapiens*.

2. Les caractères morpho-anatomiques dérivés propres au genre *Homo* sont ceux qui sont présents chez l'Homme de Néanderthal et Cromagnon et pas chez les autres. C'est-à-dire : un gros orteil rapproché, une absence de prognathisme et un trou occipital avancé.

3. Le document 14 est un tableau donnant le nombre de différences entre des séquences de nucléotides d'un fragment d'ADN homologue (même rôle) pour l'Homme de Néanderthal, l'Homme de Cromagnon, l'Homme actuel et le chimpanzé. L'Homme européen actuel a une seule différence avec l'Homme de Cromagnon, ce sont donc les plus proches dans l'évolution. L'Homme de Néanderthal a pratiquement autant de différences avec l'Homme européen actuel et l'Homme de Cromagnon (23 et 22) et beaucoup plus avec le chimpanzé (59). Il est donc plus proche des deux Hommes que du chimpanzé.

C'est donc l'arbre A qui est plus exact car l'Homme européen actuel et l'Homme de Cromagnon constituent un embranchement et sont les plus proches. Avec les données anatomiques on a en plus la position de l'australopithèque des Afars qui a plus d'états dérivés en commun avec les *Homo* qu'avec le chimpanzé : émail des dents épais et os iliaque court. Cette position est respectée pour les deux arbres.

### **7** Étude des documents 16 et 17 en parallèle

- États dérivés qui rapprochent LB1 de l'australopithèque :
  - la boîte crânienne est épaisse, mais celle d'*Homo erectus* aussi ;
  - le volume crânien de 380 à 530 cm<sup>3</sup> est plus proche de celui de l'*Australopithecus* (450 à 530 cm<sup>3</sup>) ;
  - la taille entre 1,06 et 1,20 m est plus proche de celle de l'*Australopithecus* (1,05 à 1,30 m).
- États dérivés qui rapprochent LB1 du genre *Homo* :
  - la forme du crâne avec une face aplatie comme *Homo erectus* et *Homo sapiens* ;

- les outils fabriqués impliquent le fait que cela soit un *Homo*, leur variété et leur tranchant sont plus proches de ceux d'*Homo sapiens*.
- la maîtrise du feu et d'un langage articulé.

**Conclusion.** La taille et le volume crânien de LB1 l'apparentent à l'*Australopithecus*, mais ses innovations sont celles des *Homo*. LB1 est donc **placé dans le genre *Homo*** car il fabriquait des outils, qu'il a une face aplatie, qu'il maîtrise le feu et qu'il a un langage articulé. La sophistication de ses outils l'apparente à l'*Homo sapiens*, mais sa boîte crânienne épaisse le rapproche d'*Homo erectus*.

L'*Homo floresiensis* serait donc un descendant d'*Homo erectus* implanté en Asie et ayant évolué au niveau de son industrie.

#### Mise en relation des documents 16 et 18

D'après le document 18 on sait que les *Homo floresiensis* étaient contemporains (entre – 95 000 et – 12 000 ans ) des *Homo sapiens* présents depuis moins de 200 000 ans, alors que le plus jeune *Homo erectus* a plus de 500 000 ans. De plus Marciej Henneberg explique le volume réduit de la boîte crânienne de l'*Homo floresiensis* par une anomalie de son développement (la microcéphalie), observée également chez un *Homo sapiens* vieux de 4000 ans découvert en Crète.

**Conclusion.** L'Homme de Flores serait donc un *Homo sapiens*. Cependant cette anomalie entraîne des capacités intellectuelles diminuées qui ne sont pas en accord avec une industrie sophistiquée, un langage articulé et une chasse coordonnée. Les chercheurs ne sont toujours pas d'accord. La petite taille peut s'expliquer par l'isolement géographique de l'île et la présence lors de la colonisation d'individus de petite taille qui sont devenus majoritaires par dérive génétique.

#### 8 1. Arguments pour l'appartenance au genre *Homo* (doc. 19)

L'Homme de Néanderthal appartient au genre *Homo* car ce primate fossile est bipède permanent et surtout il fabrique des outils (biface et pointe denticulée).

#### 2. Arguments pour une espèce différente de l'Homme actuel (doc. 19 et 20)

En comparant les données morphologiques et culturelles du document 19 et les données génétiques du document 20, on peut mettre en évidence des différences entre l'Homme de Néanderthal et l'Homme moderne. Au niveau de la capacité crânienne, le volume est plus élevé chez le néanderthalien avec 1600 cm<sup>3</sup> que chez l'Homme moderne avec 1400 cm<sup>3</sup>. La fosse canine présente chez *Homo erectus* et l'Homme moderne a disparu chez l'Homme de Néanderthal. L'Homme de Néanderthal est plus petit, plus trapu et plus massif que l'Homme moderne, il a des avant-bras et des jambes plus courtes. Les outils de l'Homme de Néanderthal sont moins sophistiqués car leur tranchant est plus petit, ils sont plus grossiers et moins variés. Si on compare les séquences de nucléotides de l'Homme moderne et celles de néanderthaliens du document 19, on note des différences : en position 4 (un C pour l'Homme actuel au lieu d'un T pour tous les néanderthaliens), en position 14 (un G au lieu d'un A), en position 25 (un C au lieu d'un A).

Attention, les différences entre séquences des néanderthaliens montrent leur diversité et non leur différence avec l'Homme moderne.

### 3. Arguments en faveur du caractère buissonnant des *Homo* (doc. 21)

Les fossiles de l'Homme de Néanderthal sont européens et d'Asie occidentale, ils sont datés de – 200 000 ans à – 30 000 ans. Les hommes modernes il y a 200 000 ans étaient présents en Afrique de l'Est, puis se sont répandus sur tout le globe. C'est le cas en Europe, il y a 35 000 ans. D'après les cartes, il y a 40 000 ans, il n'y avait que des hommes de Néanderthal en Europe. Les hommes modernes colonisent l'Europe vers – 35 000 ans alors que la répartition des néanderthaliens diminue.

5 000 ans plus tard les hommes modernes ont supplanté les néandertaliens partout en Europe. Il en reste un peu dans le sud de la France et au sud du Portugal. Même ceux-ci vont disparaître.

▀ Cette diminution est due principalement à la période glaciaire et le climat trop rude qui empêche leur extension vers le nord et les montagnes (Alpes et Pyrénées).

Il existait donc entre – 35 000 et – 30 000 ans au moins deux espèces d'homininés cohabitant en Europe, ce qui montre le caractère buissonnant du genre *Homo*.

9 ▀ La comparaison doit permettre de faire ressortir ce qui est propre à l'Homme. Il faut retrouver ensuite la chronologie des acquisitions au cours de l'hominisation.

L'Homme est un primate et partage donc de nombreux caractères avec les autres primates et surtout avec les singes anthropomorphes les plus proches de lui. **Il possède également des caractéristiques propres qui constituent des critères d'appartenance à la lignée humaine.** Ces caractéristiques ont été acquises au cours des quelque 5 à 7 millions d'années d'évolution qui se sont écoulées depuis qu'un ancêtre commun a donné les deux lignées, celle de l'Homme actuel et celle des singes anthropomorphes. Cette acquisition progressive s'appelle l'hominisation.

Au cours de cette période, des caractéristiques, que l'on trouve encore chez les singes, ont disparu dans la lignée humaine tandis que de nouvelles apparaissaient. La comparaison entre l'Homme et le chimpanzé, animal le plus proche de nous sur le plan phylogénétique, nous permettra ainsi d'identifier les critères de l'appartenance à la lignée humaine. En second lieu, nous examinerons les principales étapes de l'acquisition de ces caractéristiques depuis la séparation des deux lignées.

#### I. Différences Homme - chimpanzé : critères d'appartenance à la lignée humaine

Même s'il existe de nombreuses différences, certaines d'entre elles sont particulièrement importantes car elles ont dû conditionner l'évolution ultérieure de la lignée. C'est notamment le cas de la station bipède.

- **Différences dues à la station bipède.** Le chimpanzé se déplace sur le sol par marche quadrupède, et dans les arbres avec principalement ses bras (brachiation). Il est capable de se tenir debout, mais pas de manière permanente. Au contraire, l'Homme présente une station debout et une marche bipède permanente. Ceci est dû à des différences de squelette : colonne vertébrale (4 courbures chez l'Homme, 1 courbure chez le chimpanzé), structure du bassin (plus large et court chez l'Homme)

et de l'articulation du fémur (position oblique chez l'Homme), position du trou occipital (plus central chez l'Homme permettant à la boîte crânienne d'être posée sur la colonne vertébrale), pouce du pied non opposable et voûte plantaire uniquement chez l'Homme.

- **Volume cérébral et conséquences.** L'Homme est caractérisé aussi par un cerveau beaucoup plus gros que celui du chimpanzé ( $1500 \text{ cm}^3$  contre  $450 \text{ cm}^3$ ). Cet accroissement est dû à un allongement de la période embryonnaire qui permet une multiplication accrue des neurones. Ce cerveau plus gros a sans doute permis un apprentissage plus long, la capacité à fabriquer des outils et à transmettre le savoir-faire au cours des générations.

De cette manière, les techniques se sont perfectionnées sans cesse, ce qui n'est pas le cas pour les quelques outils utilisés par les chimpanzés. Cette évolution n'a été possible que parce que la main était libérée de la locomotion et, probablement aussi, en raison du développement d'un langage articulé.

- **Autres différences.** Chez l'Homme, la face est courte et redressée, l'arcade dentaire est parabolique (en U chez les singes), il y a régression des canines et épaississement de l'émail avec un régime alimentaire de plus en plus omnivore.

## II. Les étapes de l'hominisation : l'évolution de l'Homme

- Les plus anciens fossiles que l'on rattache à la lignée humaine ont 7 Ma. Ensuite, ce sont les **australopithèques** ayant acquis la bipédie franche, même si elle n'était pas parfaite. L'âge de leurs fossiles, tous africains, est compris entre – 4 et – 1,5 Ma. Des mutations de gènes du développement ont provoqué une modification du squelette de certains primates leur permettant la bipédie. Ces primates bipèdes étaient très variés au sein d'espèces et même de genres différents. L'un d'eux est l'ancêtre de l'*Homo*.

- Le premier représentant du genre *Homo* est ***Homo habilis***, capable de fabriquer des outils et présentant déjà un développement cérébral très supérieur aux singes, ce qui n'était pas le cas des australopithèques. Il vivait il y a environ 2 Ma. La libération de la main (bipédie), le développement de l'encéphale et l'allongement de la période d'apprentissage ont permis, au cours du temps, la fabrication d'outils de plus en plus sophistiqués.

- Avec ***Homo erectus***, le feu est maîtrisé (environ entre – 1,5 et 1 Ma), tandis que les techniques de fabrication d'outils et de chasse se perfectionnent grâce à l'acquisition du langage articulé. Les *Homo* colonisent alors le globe. Les premiers rites funéraires sont observés chez l'**Homme de Néanderthal**, ce qui témoigne d'une pensée abstraite et de croyances magico-religieuses.

- **Conclusion.** Les caractéristiques principales de l'espèce humaine, bipédie, développement du cerveau et culture sont donc apparues progressivement au cours de son évolution. Elles ont été acquises au cours des quelque 7 millions d'années au moins qui se sont écoulées depuis qu'un ancêtre commun a donné les deux lignées, celle de l'Homme actuel et celle des singes anthropomorphes. Ces acquisitions progressives constituent l'hominisation. Elles ont accentué les différences avec les singes anthropomorphes qui ont évolué aussi, mais de manière différente.



## 4 La vie fixée des plantes

Les plantes sont fixées dans le sol par leur système racinaire, leur partie supérieure est aérienne. Elles doivent se nourrir, se reproduire et se protéger.

Elles doivent donc, tout en restant fixées :

- **se nourrir** en puisant des matières minérales dans le sol et dans l'atmosphère, et en capturant la lumière (développer ses surfaces d'échange avec le milieu) ;
- **se reproduire** en assurant les échanges de gamètes, la dispersion des individus, la colonisation de nouveaux milieux ;
- **se défendre** contre les conditions agressives du milieu (variations saisonnières par exemple), contre les prédateurs...

Les **angiospermes** sont les végétaux dont les organes reproducteurs sont condensés en une **fleur** et dont les graines fécondées sont enfermées dans un **fruit**. Ils ont une organisation particulière qui leur permet de surmonter ces difficultés, ils sont **adaptés à la vie fixée**.

### I VIE FIXÉE ET NUTRITION DES PLANTES

#### 1. La photosynthèse

Dans les végétaux « verts », les cellules **chlorophylliennes**, situées principalement au niveau des feuilles, sont capables de produire leur propre matière carbonée à partir des éléments minéraux puisés dans le sol (eau) et dans l'air ( $\text{CO}_2$ ), en utilisant la lumière comme source d'énergie ; il s'agit de la **photosynthèse**. Les molécules organiques synthétisées sont ensuite distribuées aux autres cellules de la plante.

Cette capacité à fabriquer de la matière organique à partir de matière minérale s'appelle l'**autotrophie**.

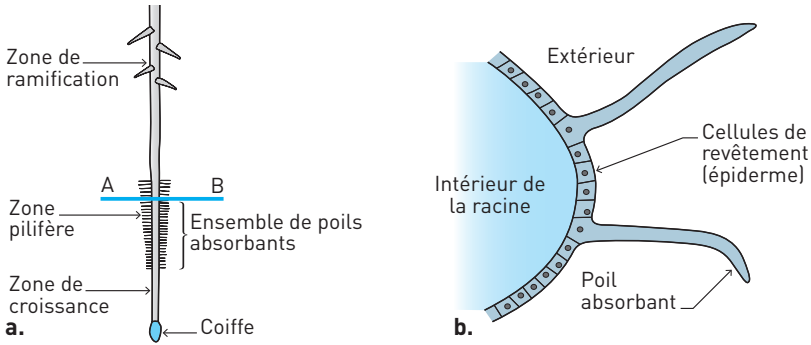
#### 2. Les surfaces d'échanges

■ Le **système racinaire** est l'**organe de fixation** de la plante mais aussi l'**organe de prélèvement** de la matière minérale (eau et ions minéraux) au niveau de la solution du sol. C'est une surface d'échange qui permet la nutrition minérale de la plante.

■ Certaines cellules épidermiques de la racine présentent des excroissances vers le sol, les **poils absorbants (doc. 1)**. Ces poils absorbants, ainsi que les très nombreuses ramifications des racines permettent d'augmenter la surface de contact plante/sol et donc la surface d'échange avec le milieu extérieur.

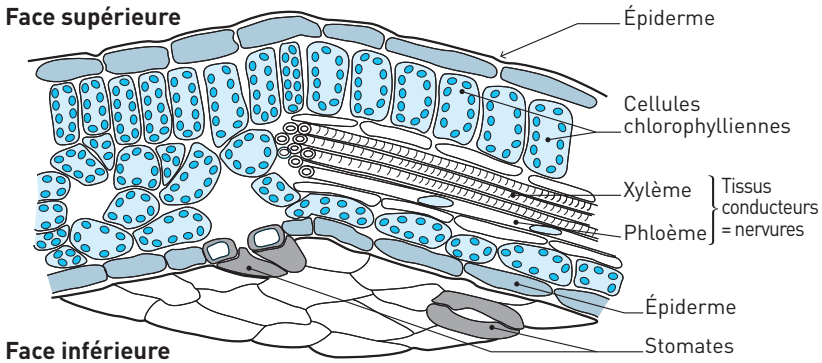
## Doc 1 Structures de la racine et du poil absorbant

a. Racine. b. Coupe de la racine en AB montrant les poils absorbants.



■ La **feuille** est l'organe spécialisé dans la photosynthèse, avec ses cellules chlorophylliennes capables de transformer la matière minérale (eau,  $\text{CO}_2$ ) en matière carbonée grâce à l'énergie lumineuse captée. On trouve dans l'épiderme foliaire des structures spécialisées, les **stomates**, qui permettent l'entrée du  $\text{CO}_2$  nécessaire à la photosynthèse et les échanges de gaz respiratoires (**doc. 2**).

## Doc 2 Coupe de feuille



La plante perd de l'eau sous forme de gaz au niveau des feuilles par **transpiration** et au niveau de la surface totale de l'épiderme par **évaporation**. Pour remplir son rôle, la feuille est généralement formée d'une lame plate et fine, le **limbe**, qui lui permet d'exposer à la lumière un maximum de surface et d'avoir le maximum d'échanges gazeux avec l'air.

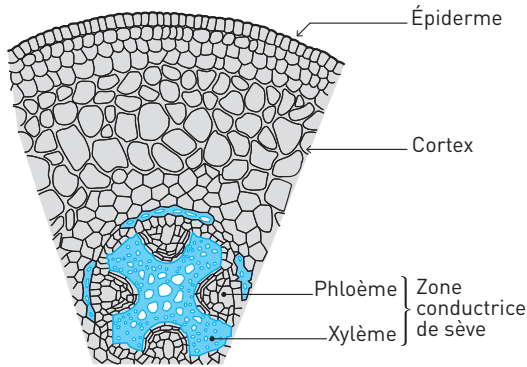
### L'essentiel

La plante développe des surfaces d'échange de grande dimension avec l'atmosphère au niveau des feuilles (échanges de gaz, absorption de la lumière) et avec le sol au niveau des racines (échanges d'eau et d'ions).

### 3. Les systèmes conducteurs

■ Des **systèmes conducteurs** permettent les circulations de matière dans la plante, notamment entre systèmes aérien et souterrain.

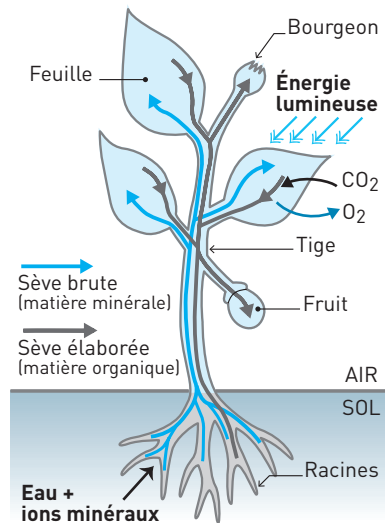
#### Doc 3 Coupe transversale de tige



■ La matière minérale absorbée au niveau des racines doit parvenir aux feuilles pour la photosynthèse. Ce sont des cellules spécialisées en **vaisseaux conducteurs du xylème** qui permettent la circulation de la **sève brute**. Ces cellules sont mortes et leurs parois accolées bout à bout constituent des canaux appelés vaisseaux conducteurs.

■ La matière carbonée ou organique produite par photosynthèse doit être distribuée dans tout le végétal. Ce sont des cellules spécialisées en **tubes criblés du phloème** qui permettent la circulation de l'eau riche en glucides appelée **sève élaborée**. Les cellules sont vivantes, mais leur paroi est criblée de trous facilitant le trajet de la sève de cellule en cellule.

#### Doc 4 Schéma bilan de la circulation de la matière dans la plante



#### L'essentiel

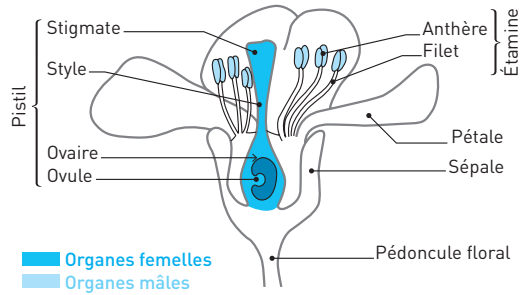
Les caractéristiques de la plante sont en rapport avec la vie fixée à l'interface sol/air.

## II VIE FIXÉE ET REPRODUCTION

### 1. L'organisation florale

#### Doc 5 Coupe longitudinale d'une fleur de cerisier

Une fleur est un ensemble d'organes reproducteurs mâles (**étamines**) et femelles (**pistil**). Les **gamètes mâles** sont présents dans les **grains de pollen** à l'intérieur des **anthères**. Les **gamètes femelles ou ovules** sont présents dans l'ovaire.



### 2. La reproduction des végétaux

■ La plupart des fleurs sont à la fois mâle et femelle donc **hermaphrodites**. Cependant la fécondation au sein d'une seule plante ou autofécondation est rarement possible (cas des plantes autogames comme le blé ou l'orge). Chez les autres, les plantes allogames, il faut que le pollen vienne d'une autre plante.

Les grains de pollen peuvent être dispersés par le vent ou des animaux lors de la **pollinisation**. Ils peuvent alors féconder l'ovule d'une autre fleur. Une fois les ovules fécondés, la fleur se transforme en **fruit** qui contient une ou plusieurs graines. Chaque **graine** est le résultat d'une fécondation et contient donc un **embryon**, une future plante.

■ L'organisation florale est contrôlée par des gènes de développement, elle est donc transmise de génération en génération aux descendants. Une mutation peut entraîner une organisation florale différente et avoir des répercussions sur les capacités reproductrices des végétaux.

### 3. La dispersion et la collaboration avec des animaux

■ La **dispersion du pollen** pour permettre la fécondation avec une autre plante est effectuée par le vent et l'eau chez les végétaux tels que les champignons, les fougères, les algues et même les conifères (gymnospermes). Au cours de l'évolution, chez les angiospermes, l'acquisition des fleurs a permis l'intervention d'animaux comme vecteur de pollen chez plus de 80 % d'entre eux.

■ La **dissémination des graines** est nécessaire à la survie, à la dispersion de la descendance et la colonisation de nouveaux milieux. Elle repose souvent aussi sur une collaboration entre animal disséminateur et plante.

**EXEMPLES :** Des graines recouvertes de crochets comme celles de la carotte sauvage sont transportées par les poils ou les plumes des animaux venant à leur contact. Les écureuils stockant et oubliant leurs réserves de glands et noisettes, les perdant lors de leur transport participent à la dispersion du chêne et du noisetier ! Les animaux, surtout des oiseaux, mangeant des fruits vont rejeter plus loin les graines dans leurs excréments.

■ Pour la plante l'animal est un vecteur de pollen ou de graines, mais l'animal y trouve aussi un intérêt nutritif ou protecteur. Il y a **collaboration** et intérêt réciproque.

#### L'essentiel

L'organisation et le fonctionnement de la fleur permettent le rapprochement des gamètes des plantes fixées et la dispersion des individus.

### III VIE FIXÉE ET COÉVOLUTION

#### 1. Les stratégies attractives

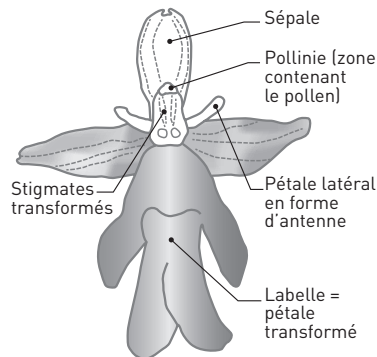
■ Les graines ou fruits comestibles sont attractifs pour les animaux qui les mangent et les transportent.

Les fleurs ont à leur base des glandes appelées nectaires qui produisent un liquide riche en sucres appelé **nectar**. Celui-ci est recherché par les insectes principalement comme source de nourriture. Lorsqu'un insecte recueille le nectar d'une fleur, une partie du pollen des étamines (organes mâles) se colle aux poils de son corps. Lorsqu'il se pose sur une autre fleur une partie du pollen se dépose sur le stigmate (organe femelle) et permet la fécondation.

■ Certaines espèces vont plus loin en attirant les pollinisateurs par la forme, la couleur et l'odeur de leurs fleurs, comme certaines orchidées.

**EXEMPLE :** *Ophrys insectifera* ou ophrys mouche est une petite orchidée dont la fleur mime la femelle d'une petite guêpe appelée Argogoryte. Les mâles croyant s'accoupler avec des femelles passent de fleur en fleur et se chargent de transporter le pollen. Comme on le voit sur le **document 6**, les pétales sont transformés et ont la forme du corps et des antennes de

#### Doc 6 La fleur d'*Ophrys insectifera*



l'insecte, leur couleur sombre est aussi celle de l'insecte. La fleur émet des molécules volatiles qui imitent les **phéromones** sexuelles (molécules servant de messagers chimiques volatiles entre les individus d'une même espèce) de la femelle. Le comble est que les mâles éclosent avant les femelles et les premiers nés n'ont que des ophrys comme partenaires !!! La fleur est donc un leurre visuel et olfactif pour le mâle guêpe.

## 2. La notion de coévolution

L'inconvénient de la stratégie du nectar est qu'elle est partagée par énormément d'espèces, et l'insecte qui emporte du pollen a de bonnes chances de le déposer ailleurs que sur un autre individu de la même espèce. Au cours de l'évolution se sont donc mis progressivement en place des adaptations de la plante à certains insectes, qui eux-mêmes ont pu s'adapter en retour à un nombre plus ou moins restreint de plantes. Il s'agit d'une **coévolution**, qui permet d'un côté à la plante d'augmenter la probabilité de voir son pollen arriver dans une fleur de son espèce, et de l'autre côté à l'insecte d'avoir accès à une source de nourriture interdite à d'autres.

**EXEMPLE :** Découverte par Darwin en 1862, l'espèce d'orchidée *Angraecum sesquipedale* a des fleurs qui portent un éperon de plus de 30 cm. Il prédit alors l'existence d'un papillon porteur d'une trompe de la même longueur et seul capable d'atteindre le nectar produit au bout de l'éperon. Il ne put découvrir cet insecte. Finalement, 41 ans plus tard, un papillon ayant cette morphologie fut découvert et baptisé *Xanthopan morgani praedicta*. Et c'est bien le pollinisateur de cette orchidée !

### L'essentiel

Différentes stratégies d'attraction de disséminateurs sont apparues au cours de l'évolution. Elles favorisent la reproduction sexuée.

## IV VIE FIXÉE ET PROTECTION CONTRE LES AGRESSIONS

### 1. Protection contre les agressions du milieu

■ Certaines plantes possèdent des **structures de défense contre les agressions du milieu** comme la sécheresse. Le végétal doit trouver l'équilibre entre favoriser les échanges respiratoires et photosynthétiques vitaux et réduire les pertes en eau.

**EXEMPLE :** C'est le cas des végétaux adaptés aux milieux désertiques comme les cactus. Leurs surfaces d'échange avec l'air sont réduites au maximum : les feuilles sont transformées en épines, la photosynthèse se fait alors dans les tiges qui contiennent les cellules chlorophylliennes. Chez les plantes méditerranéennes, les feuilles sont de taille réduite et recouvertes de cuticule imperméable. De plus certains arbres comme l'acacia ont des racines pivot de plus de 60 mètres qui peuvent puiser de l'eau dans le sol à grande profondeur.

■ Les plantes développent une **résistance aux variations saisonnières**. Elles peuvent résister au gel, le plus souvent grâce à des organes souterrains. Les parties aériennes gèlent, mais la plante repousse au printemps à partir de l'organe de réserve protégé dans le sol pendant l'hiver. Chez les arbres, les feuilles tombent à l'automne, le tronc résiste au gel car la sève ne circule plus.

■ Dans tous les cas, la **graine** est un organe de résistance aux conditions extrêmes. Sa grande déshydratation par rapport au reste du végétal lui permet de résister au gel et à la sécheresse. Lors du retour de meilleures conditions, elle peut germer et donner un nouveau végétal. Elle est donc un **organe de survie** face aux variations climatiques saisonnières pour l'espèce.

## 2. Protection contre les agresseurs

Les plantes peuvent se **protéger des prédateurs** en utilisant divers moyens de persuasion : des toxines, des formes ou couleurs repoussantes, des épines.

**EXEMPLE 1** : Les feuilles d'aloès contiennent de l'aloïne qui est une molécule de saveur très amère. Cette molécule est utilisée en médecine traditionnelle comme laxatif. Sa présence dissuade les herbivores.

**EXEMPLE 2** : Chez l'acacia on peut parler d'une véritable stratégie de défense. Certaines feuilles sont transformées en épines très longues et très dures empêchant de nombreux herbivores de brouter les autres feuilles.

En Amérique, *Acacia sphaerocephala* vit en **ymbiose** (association à bénéfices réciproques) avec une variété de fourmis, *Pseudomyrmex*. L'acacia leur offre l'abri d'épines hypertrophiées et creuses et leur fournit de la nourriture. Les fourmis, très agressives, patrouillent le long de l'arbre et le débarrassent des herbivores principalement en les mordant.

D'autres acacias produisent des tanins amers et indigestes et ceci d'autant plus qu'ils sont broutés. On peut aussi parler d'une forme de **communication entre les arbres**, fondée sur des émanations chimiques. On a pu observer que des bosquets d'arbres attaqués par des antilopes se mettent non seulement à produire des substances toxiques, mais aussi à « prévenir » des bosquets voisins, en émettant un signal sous forme d'éthylène. Ce signal volatil entraîne chez les arbres voisins l'accumulation de tanins, qui éloignent les antilopes. Une sorte de langage chimique en somme...

### L'essentiel

Les principales particularités de fonctionnement des plantes ont été acquises au cours de l'évolution et leur ont permis de s'adapter à la vie fixée. Cette adaptation a pu se faire en association et en parallèle avec d'autres êtres vivants.


## SAVOIR-FAIRE

### Vocabulaire

- **Stomate** : Zone au niveau de l'épiderme foliaire permettant les échanges gazeux entre l'air et la plante.
- **Xylème** : Tissu conducteur de la sève brute au travers de cellules mortes appelées vaisseaux.
- **Phloème** : Tissu conducteur de la sève élaborée au travers des tubes criblés.
- **Cellule chlorophyllienne** : Cellule contenant de la chlorophylle dans ses chloroplastes, donc capable de capter l'énergie lumineuse et d'effectuer la photosynthèse.
- **Poil absorbant** : Cellule de l'épiderme racinaire dont la surface est très développée et qui permet des échanges avec le sol.
- **Pistil** : Organe femelle d'une fleur, regroupant stigmate, style et ovaire.
- **Étamine** : Organe mâle d'une fleur, regroupant anthère (contenant les grains de pollen) et filet.
- **Graine** : Structure qui contient et protège l'embryon végétal. Elle provient d'une transformation de l'ovule fécondé. Elle a un rôle de protection et de nutrition du futur végétal.
- **Fruit** : Produit des végétaux qui provient de l'évolution de la fleur femelle, et qui contient les graines.

### Compétences

1. Savoir schématiser une feuille, une tige, une fleur.

 Voir les documents 2, 3 et 5.

2. Trouver le rôle d'un organe à partir de données scientifiques.
3. Montrer les adaptations d'une plante à des conditions particulières.
4. Mettre en évidence les adaptations reproductrices d'une plante et la coévolution.

### Repères

1. Connaître les organes de la plante type.
2. Connaître les étapes de la reproduction des plantes à fleurs.
3. Définir et illustrer les notions de collaboration et coévolution.



## EXERCICES D'APPLICATION

4

La vie fixée des plantes

## 1 MAÎTRISE DU VOCABULAIRE

★ 10 min ▶ P. 105

Faites des phrases à partir des séries de mots suivantes :

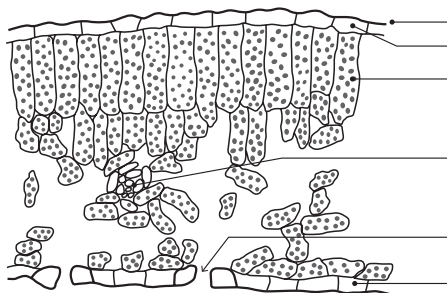
- Feuille, cellules chlorophylliennes, matière organique, énergie lumineuse.
- Feuille, air, surface d'échange,  $\text{CO}_2$ , eau, stomates.
- Racine, surface d'échange, poils absorbants, eau, sol, ions minéraux.
- Sève brute, sève élaborée, phloème, xylème, tissus conducteurs.
- Fleur, ovule, graine, fruit, fécondation, ovaire.

## 2 SCHÉMA À LÉGENDER

★★ 10 min ▶ P. 105

Titrez, orientez et annotez le schéma suivant.

## Doc 7 Schéma à annoter

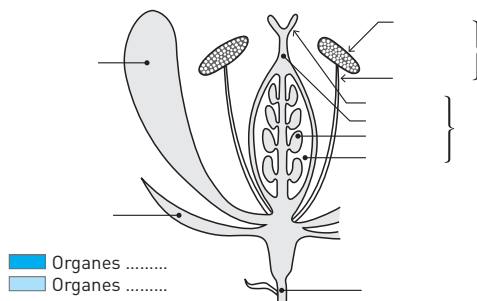


## 3 SCHÉMA DE LA FLEUR

★★ 10 min ▶ P. 105

Annotez le schéma de fleur suivant en mettant en évidence les organes mâles et femelles.

## Doc 8 Coupe de fleur à annoter



4 QCM

★★ 15 min ▶ p. 106

Choisissez les bonnes propositions (il peut y en avoir plusieurs) et justifiez votre choix.

**1. Dans une feuille, les cellules capables d'effectuer la photosynthèse sont :**

- a. les cellules des tissus conducteurs.
- b. les cellules du parenchyme.
- c. les cellules chlorophylliennes.

**2. Dans tous les végétaux chlorophylliens :**

- a. la matière organique est produite à partir de dioxygène, d'eau et d'énergie solaire.
- b. la photosynthèse est possible uniquement dans les feuilles.
- c. la photosynthèse est possible uniquement dans les cellules chlorophylliennes.

**3. La graine :**

- a. est le résultat de la fécondation d'un ovule par un gamète mâle présent dans le grain de pollen.
- b. se développe dans la fleur femelle.
- c. ne peut être disséminée par le vent.

**4. Si du pollen de la variété de pommier *golden*, féconde un ovule de fleur de pommier *granny smith*, la pomme est :**

- a. un hybride.
- b. une *granny smith*.
- c. une *golden*.

**5. Les insectes qui butinent les fleurs :**

- a. peuvent permettre la fécondation.
- b. peuvent permettre la pollinisation.
- c. peuvent permettre la dispersion des graines.

## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

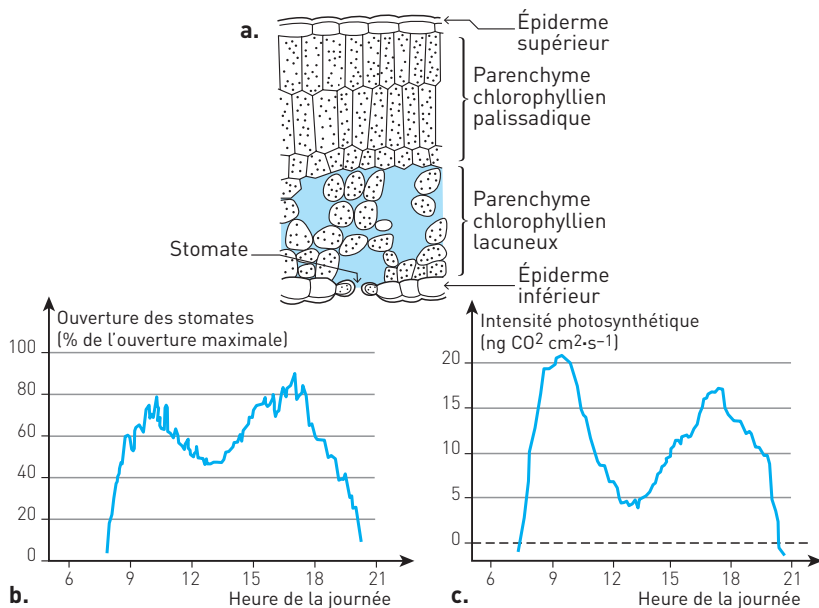
5 PHOTOSYNTHÈSE ET STOMATES

★★ 25 min ▶ p. 106

À partir de l'étude des documents suivants, indiquez le rôle des stomates.

**Doc 9 Les stomates**

- a. Coupe transversale de feuille observée au microscope optique ( $\times 130$ ).
- b. Degré d'ouverture des stomates chez *Arbutus unedo* (arbousier) pendant une journée ensoleillée.
- c. Intensité de la photosynthèse chez *Arbutus unedo*, exprimée par la quantité de  $\text{CO}_2$  fixée.



### Stratégie d'analyse des graphiques

- **Identifier les paramètres** : ouverture des stomates et intensité de photosynthèse.
- **Comparer** les évolutions des deux paramètres dans la journée.

### Étude guidée

- **Diviser** : étudier séparément les trois documents.
- Débuter par l'étude fonctionnelle du schéma (9a) avec la localisation des stomates au sein de la feuille et ce qu'elle suggère (9a).
- Identifier les deux paramètres variables étudiés dans les études expérimentales 9b et 9c (ouverture des stomates et intensité de photosynthèse).
- Puis **comparer et lier** leur évolution (9c et 9b).
- **Interpréter** : proposer une relation de causalité.
- Terminer l'étude par un bilan : **lier** l'ensemble des observations (9a, 9b, 9c).

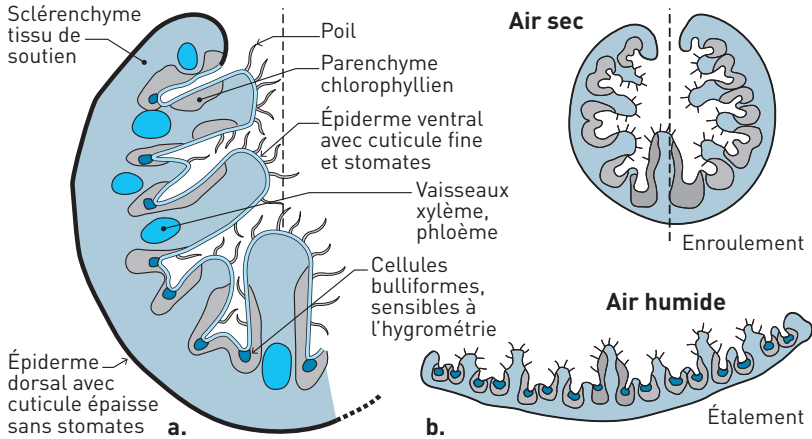
## 6 L'ADAPTATION À LA SÉCHERESSE DE L'OYAT ★★★ 30 min ► p. 107

L'oyat ou *Ammophila arenaria* se développe sur les dunes littorales où il prospère sous d'importants apports de sable. On a donc utilisé cette capacité pour fixer les dunes de Gascogne. C'est une plante adaptée à la sécheresse.

À partir de l'étude du **document 10**, expliquez quelles sont les adaptations de l'oyat à la sécheresse. Puis expliquez la relation entre les mouvements de la feuille et la sécheresse.

## Doc 10 Les adaptations de la feuille d'oyat

- a. Coupe transversale d'une feuille d'oyat.  
b. Forme de la feuille.



Les mouvements des feuilles sont dûs à des variations d'hydratation des cellules du tissu bulliforme. En cas d'humidité, ces cellules se gorgent d'eau et leur volume augmente, entraînant l'ouverture de la feuille. En cas d'air sec, elles se déshydratent et perdent du volume, ce qui entraîne la fermeture de la feuille sur elle-même.

### Étude guidée

**Cerner le sujet :** expliquer à l'aide des documents comment la feuille limite ses pertes d'eau (vision globale du sujet).

**Diviser.** Le sujet comporte deux questions qu'il faut étudier séparément.

1 - Adaptation à la sécheresse

**Comparer** la forme de la feuille en fonction de la sécheresse et **comparer** la face externe et la face interne pour **lier** les dispositions anatomiques de la feuille à la limitation des pertes d'eau. Repère de savoir : document 2.

2 - Expliquer la relation entre mouvement de la feuille et sécheresse

**Identifier** les cellules impliquées dans le mouvement et **lier** leur fonctionnement avec leur disposition anatomique.

## EXERCICES D'APPROFONDISSEMENT

## 7 LE CAS PARTICULIER DE LA VANILLE

★★ 20 min ▶ p. 107

Les gousses de vanille, utilisées pour parfumer les glaces et les pâtisseries, sont les fruits du vanillier, orchidée originaire du Mexique. La fécondation est l'étape essentielle pour obtenir des gousses : sans elle, pas de fruit.

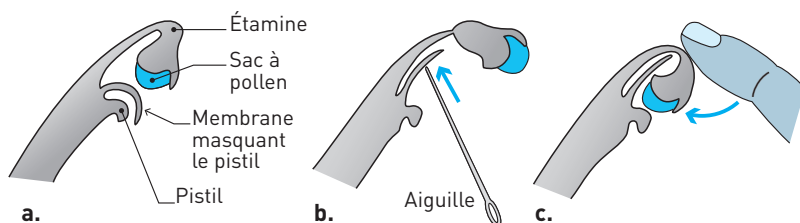
Les fleurs de vanille sont hermaphrodites, mais la pollinisation directe est impossible car, dans la fleur, une cloison sépare l'étamine du pistil.

Dans la nature, la pollinisation est assurée par une abeille mexicaine, la *mélipone*. Cette abeille est capable de se faufiler dans la fleur de l'orchidée où elle dépose du pollen sur le pistil et provoque ainsi la formation des fruits.

Dans les îles où le vanillier fut introduit (Réunion, Antilles, Polynésie), l'insecte n'existe pas et la plante ne produisait pas de fruits. C'est en 1841 qu'un jeune esclave réunionnais, Edmond Albius, inventa le procédé de la pollinisation artificielle en utilisant une simple épine. Ce procédé décrit dans le **document 11** est encore utilisé de nos jours.

## Doc 11 Pollinisation manuelle de la vanille

- On déchire les pétales pour mettre à jour les organes sexuels.
- À l'aide d'une aiguille, on soulève la membrane qui masque le pistil.
- Avec le bout d'un doigt, on rabat le sac à pollen au contact du pistil.



- Comment sont obtenues les gousses de vanille au Mexique ?
- Pourquoi est-ce impossible à la Réunion ?
- Expliquez à l'aide du texte et du dessin la manipulation qui permet une fécondation quand l'abeille n'est pas présente.

## Étude guidée

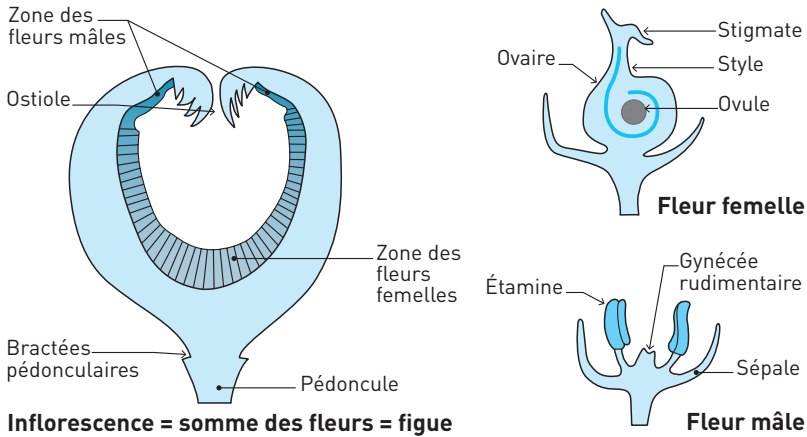
- Lire le texte et surligner ou souligner les informations importantes.  
 Rechercher dans les passages sélectionnés les réponses aux questions.

## 8 LA POLLINISATION DU FIGUIER

★★★ 30 min ▶ p. 108

Le figuier possède des particularités botaniques étonnantes. Les arbres sont hermaphrodites comme la plupart des angiospermes, cependant les fleurs ne sont que mâles ou femelles et regroupées en inflorescence. Cette inflorescence en forme d'urne constitue la figue.

## Doc 12 Organisation florale du figuier



1. Quelle différence y a-t-il entre une fleur « classique » et les fleurs du figuier ?

Voir le **document 5** en cas de difficulté pour répondre. Il faut alors retrouver ces éléments dans le cas des fleurs de figuier.

2. Dans la même figue, les fleurs femelles sont fertiles avant les fleurs mâles.

Il est donc impératif que le pollen fécondant les fleurs femelles vienne d'ailleurs. Or le pollen ne peut ni pénétrer dans la figue, ni en sortir, l'ostiole étant fermée. Le blastophage est un insecte parent des guêpes. La femelle pond ses œufs à l'intérieur de la figue en insinuant le prolongement de son abdomen dans l'ostiole. Les œufs sont déposés dans les fleurs femelles au fond de l'urne.

Lors de l'éclosion, mâles et femelles guêpes sont présents dans la même figue et peuvent s'accoupler. À ce moment les fleurs mâles sont matures et produisent du pollen. Seules les guêpes femelles sont ailées et sortent alors de la figue, emportant avec elles du pollen. Elles vont alors déposer leurs œufs en s'insinuant dans une autre figue où ce sont les fleurs femelles qui sont mûres. Elles y déposent du pollen qui permet la fécondation des ovules et la formation de graines.

Quand les insectes femelles vont pondre dans les jeunes inflorescences de figuier, elles choisissent celles dont seules les fleurs femelles sont fertiles car celles-ci

émettent un parfum les attirant. Ces fleurs femelles recevront le pollen que les insectes avaient pris dans l'inflorescence précédente.

Le figuier ne peut être pollinisé que par le blastophage et le blastophage ne peut se reproduire en dehors des fructifications du figuier : aucun des deux n'existerait sans l'autre.

Quel est l'intérêt de chaque espèce dans cette association ?

Il faut sélectionner des informations dans chacun des documents, puis les organiser, les classer pour construire la réponse.

## 9 ADAPTATIONS DES PLANTES ALPINES

★★ 30 min ▶ p. 108

En montagne, les conditions hivernales sont dures (vent, froid, neige...), la période de végétation est très courte, et l'exposition aux ultraviolets nocifs est plus importante qu'en plaine. Les plantes alpines ont développé des adaptations spécifiques pour résister aux basses températures, aux UV, au dessèchement par le vent.

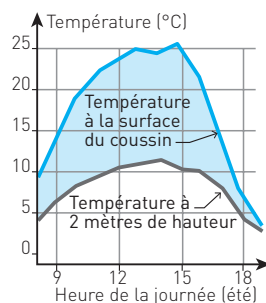
D'après l'étude des documents suivants décrivez les stratégies des plantes alpines pour survivre dans cet environnement hostile.

Il faut d'abord lister les problèmes rencontrés, puis identifier les solutions trouvées par les plantes en gardant à l'esprit comme référence pour la comparaison les structures caractéristiques des plantes ne subissant pas ces contraintes (voir cours).

### Doc 13 Évolution des températures dans l'air et à la surface d'un coussin de silène acaule (plante alpine)

■ Avec l'altitude la température diminue en moyenne de 0,5 à 0,6 °C tous les 100 mètres. Le fonctionnement cellulaire dépend de la température qui agit sur l'activité des enzymes. Un abaissement de la température entraîne un ralentissement de la croissance et de la photosynthèse. Sous le manteau neigeux isolant en hiver, la température reste aux alentours de 0 °C sous 40 cm de neige alors que la température est négative dans l'air.

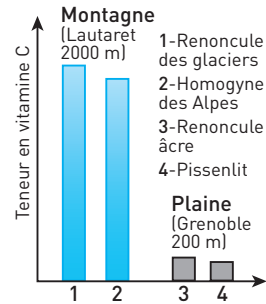
■ La petite taille et la forme des plantes en boule (plantes en coussin) permettent de limiter la prise au vent et le refroidissement. Les feuilles sont en forme d'aiguille, ou recroquevillées, recouvertes de duvet ou de substance cireuse imperméable. Le duvet est dû à la présence de poils épidermiques (feuilles blanc argenté) qui isolent les parties vitales de la plante et limitent aussi les pertes en eau tout comme la couche cireuse. D'autre part, la synthèse de molécules organiques (sucres et protéines) en grande quantité enrichit le milieu intérieur et l'empêche de geler.



### Doc 14 Teneurs en vitamine C chez des espèces voisines, de montagne et de plaine

En montagne, la pureté de l'air et sa rareté font que les intensités lumineuses sont plus fortes qu'en plaine, au point d'excéder les capacités d'utilisation par les plantes. Il devient alors indispensable de se protéger contre cet excès d'énergie qui entraîne la synthèse de molécules oxydantes toxiques, en particulier l'eau oxygénée, responsables de destructions en chaîne de molécules vitales.

La vitamine C est un élément protecteur, qui élimine les molécules oxydantes.



## CONTRÔLE

### 10 UN EXTRATERRESTRE : LE GUI

★★★ 45 min ▶ P. 109

Le gui pousse dans l'hémisphère nord sur différentes espèces d'arbres, notamment sur le peuplier, le pommier, parfois sur le chêne et le châtaignier, jusqu'à 1 300 m d'altitude. Il prend, après quelques années, l'apparence d'une grosse « boule » vert jaunâtre de 50 cm à un mètre de diamètre. En hiver après la chute des feuilles, il devient facilement repérable dans les arbres.

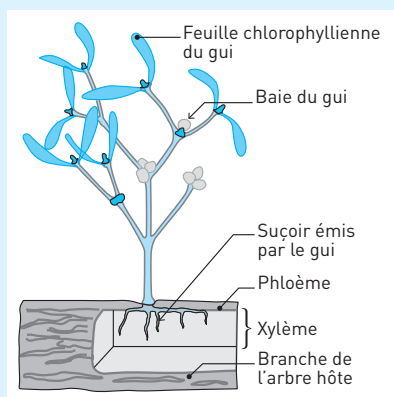
Après une étude rigoureuse des documents proposés, présentez les adaptations qui permettent au gui de vivre hors sol, sur une branche de l'hôte, de se reproduire et de parasiter d'autres arbres.

Attention, le sujet comporte deux questions auxquelles il faut répondre séparément.

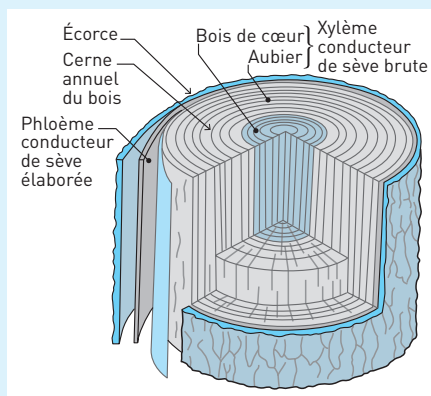


**Doc 15 Gui sur une branche de peuplier**

Le gui est un végétal chlorophyllien. Dépourvu de racines, il est fixé à son hôte par un suçoir primaire de forme conique qui s'enfonce profondément dans le bois de l'hôte.

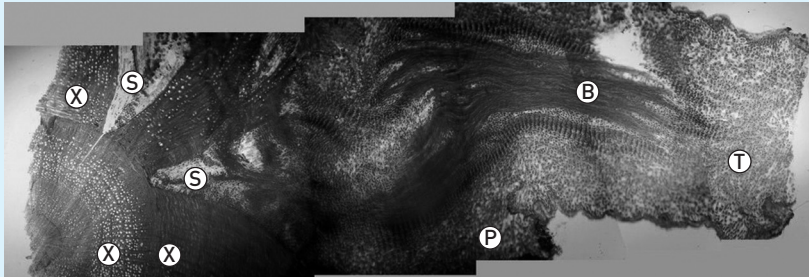
**Doc 16 Position des suçoirs dans la branche parasitée**

a. Structure du bois d'une branche.



**b.** Coupe transversale histologique de branche parasitée. Une coupe histologique au niveau d'un suçoir permet de mettre en évidence la zone de contact entre le gui et les tissus de l'hôte.

X = xylème de la branche ; P = phloème de la branche ; T = tige du gui  
S = suçoir ; B = xylème du gui.



### Doc 17 Composition des sèves du xylème et du phloème (mg par litre)

	Saccharose	K <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	pH
<b>Sève extraite du xylème</b>	0,1	0,17	0,01	0,004	0,01	0,05	5
<b>Sève extraite du phloème</b>	140	0,1	0,07	0,03	0,04	0,5	7,5

### Doc 18 Reproduction du gui

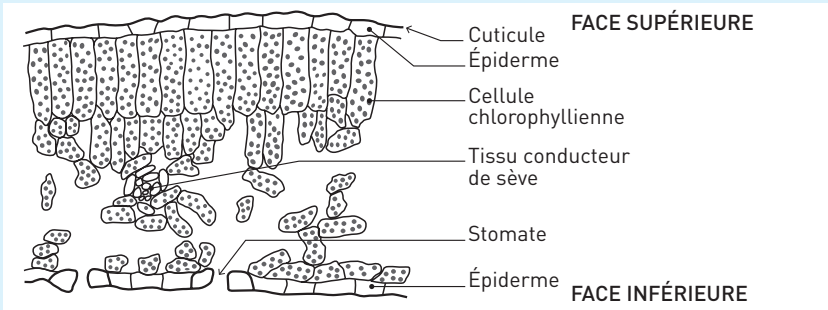
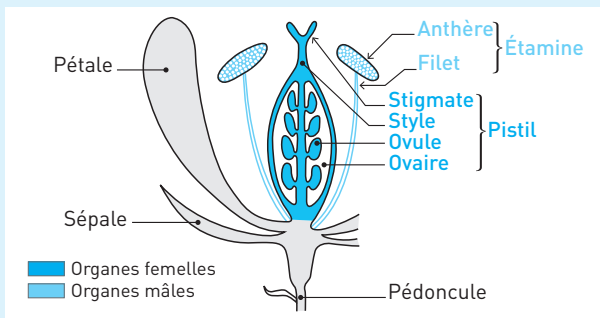
Le gui est une espèce dioïque, chaque plante n'a que des fleurs mâles ou des fleurs femelles. La pollinisation se fait grâce à des insectes butineurs au printemps. Les fruits (fausses baies) mûrissent en deux ans et ne tombent qu'au début de la troisième année. Les embryons présents dans la baie peuvent germer et donner un nouveau pied, s'ils peuvent immiscer leurs racines transformées en suçoirs dans le bois d'une branche.

Les baies de gui ne contiennent qu'une seule graine entourée d'un tissu visqueux et collant, la viscine, qui durcit à l'air libre.

Certains oiseaux sont amateurs de baies de gui. La fauvette se nourrit de la partie sucrée et se débarrasse de la graine et des téguments en essuyant son bec sur la branche. La grive avale les baies entières et rejette dans ses excréments les graines et les téguments.

## CORRIGÉS

- 1** a. Les cellules chlorophylliennes présentes dans les feuilles sont capables de capter l'énergie lumineuse et de l'utiliser pour produire de la matière organique.
- b. Les feuilles sont des surfaces d'échange avec l'air. Au niveau des stomates, il y a entrée de  $\text{CO}_2$  et sortie d'eau.
- c. La racine est une surface d'échange avec le sol. Il y a absorption d'eau et d'ions minéraux au niveau des poils absorbants.
- d. Les tissus conducteurs de sève sont le xylème et le phloème. Le xylème conduit la sève brute, le phloème conduit la sève élaborée.
- e. La fécondation de l'ovule d'une fleur donne une graine. Elle est protégée par un fruit qui provient de la transformation de l'ovaire.

**2** Doc 19 Schéma annoté : coupe transversale de feuille**3** Doc 20 Coupe de fleur annotée

**4** **1. b et c.** Dans une feuille, les cellules capables d'effectuer la photosynthèse sont les cellules chlorophylliennes du parenchyme car ce sont les seules à pouvoir capter l'énergie lumineuse grâce à leur chlorophylle.

**2. c.** Dans tous les végétaux chlorophylliens la matière organique est produite à partir de dioxyde de carbone, d'eau et d'énergie solaire. La photosynthèse est possible uniquement dans les cellules chlorophylliennes car elles contiennent de la chlorophylle capable de capter l'énergie lumineuse. Ces cellules sont principalement dans les feuilles, mais peuvent aussi être présentes dans les tiges surtout si les plantes sont adaptées à la sécheresse et que les feuilles sont réduites.

**3. a et b.** La graine est le résultat de la fécondation d'un ovule par un gamète mâle présent dans le grain de pollen. Elle se développe dans l'ovule, donc dans la fleur femelle. Elle peut être disséminée par des animaux, le vent, l'eau...

**4. b.** Si du pollen de la variété de pommier *golden* féconde un ovule de fleur de pommier *granny smith*, la pomme est une *granny smith*. En effet la partie comestible de la pomme se développe à partir de la fleur femelle et donc avec les caractéristiques du végétal femelle.

**5. a et b.** Les insectes butineurs vont de fleur en fleur et parcourent de grandes distances. Ils peuvent permettre la pollinisation en dispersant les grains de pollen, la fécondation en mettant en contact du pollen avec un stigmate. La dispersion des graines une fois formées se fait par des animaux plus gros comme les oiseaux qui se nourrissent de ces graines.

**5** D'après le schéma du **document 9a**, les stomates sont présents dans l'épiderme de la face inférieure d'une feuille. Ils constituent des pores et mettent en relation l'air et l'intérieur de la feuille. À leur niveau peuvent avoir lieu les échanges gazeux de la photosynthèse et les pertes en vapeur d'eau. Les gaz entrant par les stomates se retrouvent au contact des cellules chlorophylliennes des parenchymes lacuneux et palissadique.

**Analyse du document 9b :** Au cours de la journée, le degré d'ouverture des stomates varie. Ils sont fermés la nuit entre 20 h et 8 h du matin. Ensuite leur ouverture est progressive. On note deux maxima avec 80 % d'ouverture vers 11 h, et entre 16 h et 18 h. Mais ils se referment jusqu'à 50 % entre 12 et 14 h.

**Interprétation :** Les stomates ne s'ouvrent qu'à la lumière. Mais ils se ferment aux heures les plus chaudes entre 12 et 14 h. Ce mécanisme permet de limiter les pertes en vapeur d'eau provoquées par une température élevée.

**Analyse du document 9c :** On remarque que l'intensité de la photosynthèse (mesurée en quantité de dioxyde de carbone utilisé) varie de la même manière que l'ouverture des stomates. La photosynthèse se fait entre 7-8 et 20-21 h, son maximum est atteint à 10 et 18 h, elle baisse de plus de 50 % entre 11 et 15 h.

**Interprétation :** La photosynthèse ne se fait qu'à la lumière et seulement quand les stomates sont ouverts. La fermeture à la mi-journée des stomates semble entraîner la baisse de la photosynthèse.

**Bilan**

Les stomates sont les lieux d'échange des gaz de la feuille avec l'air.

- Ils s'ouvrent aux heures favorables pour permettre l'entrée du  $\text{CO}_2$  indispensable à la photosynthèse.
- Ils se ferment aux heures les plus chaudes afin de limiter les pertes en eau.

**6 Les adaptations de l'oyat à la sécheresse**

**Analyse :** Chaque feuille étant recourbée suivant son plan de symétrie, l'épiderme de la face ventrale, seul pourvu de stomates, ne communique avec le milieu extérieur que par une mince fente. Cette face présente des sillons et des crêtes, ainsi que de nombreux poils, l'ensemble freinant la circulation de l'air.

L'épiderme dorsal, en contact avec l'air, est recouvert d'une cuticule épaisse. Le parenchyme chlorophyllien est réduit à l'état de minces bandes disposées sous l'épiderme ventral et localisées uniquement sur les flancs des crêtes.

**Interprétation :** Les pertes en eau sont limitées par une surface de contact avec l'air chaud très réduite et une circulation minimale d'air dans la feuille. Cependant la photosynthèse est facilitée par la présence des cellules chlorophylliennes au plus près des stomates.

**Relation entre mouvements de la feuille et sécheresse**

**Analyse :** Au fond de chaque sillon, on observe les grosses cellules du tissu bulliforme responsables des mouvements foliaires. Sous l'effet de la sécheresse, les cellules bulliformes présentes dans l'épiderme ventral perdent de l'eau et de leur volume ; l'épiderme se contracte et la feuille se ferme.

**Interprétation :** La feuille s'ouvre quand l'air est humide, les cellules bulliformes sont gorgées d'eau. La feuille se ferme quand l'air est sec car les cellules bulliformes ont perdu une partie de leur eau.

**Bilan**

La feuille d'oyat est adaptée à la sécheresse car elle peut réduire ses pertes en eau :

- en diminuant sa surface d'évaporation en se repliant dès que l'air est sec ;
- en protégeant ses surfaces (cuticule épaisse) ;
- en réduisant les mouvements d'air (présence de poils) ;
- en réduisant le nombre de stomates.

**7 1.** Au Mexique, les gousses de vanille sont obtenues grâce à l'intervention d'un insecte pollinisateur : l'abeille mélipone. Le gamète mâle présent dans le grain de pollen est transporté par les abeilles d'une fleur à une autre. Le pollen est récupéré sur une étamine, l'abeille le transporte sur le pistil d'une autre fleur où la fécondation de l'ovule peut avoir lieu. Il y a alors formation du fruit, donc de la gousse de vanille.

**2.** La fécondation est impossible à la Réunion, car l'insecte pollinisateur est absent et sans lui le pollen ne peut entrer en contact avec le pistil masqué sous une membrane.

**3.** La pollinisation doit être effectuée manuellement. À l'aide d'une aiguille, on relève la membrane qui sépare le pistil des étamines. Puis en appuyant un doigt sur l'étamine, on la rabat sur le pistil : le pollen se dépose sur le pistil et la fécondation peut avoir lieu. La fleur est ainsi autofécondée.

**8** 1. Les fleurs de figuier n'ont qu'un type d'organe reproducteur développé à la fois : ou mâle ou femelle. La fleur mâle est constituée des éléments reproducteurs mâles, les étamines, qui contiennent le pollen. La fleur femelle est constituée des éléments reproducteurs femelles du pistil (style, stigmate et ovaire), qui contiennent les ovules. Cependant, l'inflorescence et donc la plante sont hermaphrodites car elles ont les deux types de fleurs.

2. Chez le figuier, le blastophage permet la fécondation car les femelles transportent le pollen d'une inflorescence à une autre. Sans cet insecte, il ne peut y avoir reproduction, car le pollen ne peut sortir seul des inflorescences. Pour le blastophage, l'inflorescence de figuier est une protection et une source de nourriture pour les œufs et les larves. Sans cette plante, il ne peut y avoir reproduction.

**9** En montagne, les végétaux sont confrontés à des conditions de milieu défavorables :

- le froid entraîne un ralentissement de l'activité, les différences de température sont importantes et le gel détruit les membranes cellulaires ;
- le milieu est très aride car les précipitations sont rares ou neigeuses et l'air est très sec. Ceci entraîne un risque de dessèchement ;
- l'exposition à l'énergie lumineuse et aux UV, importante à cause de la pureté et de la raréfaction de l'air, provoque la formation de composés toxiques.

Les plantes alpines ont donc développé des adaptations particulières pour résister à ce milieu extrême.

### Stratégies pour résister aux basses températures

- Les plantes de petite taille ou rampantes profitent l'hiver de la protection thermique de la neige sous laquelle la température reste aux alentours de 0 °C. Elles ne sont donc pas soumises à des températures extrêmes. Elles sont aussi moins exposées aux vents froids.

- La forme en coussin permet de limiter le refroidissement dû aux vents froids.

D'après le **document 13**, la différence de température entre la plante et l'air augmente au cours de la journée. Le matin on relève 5 °C de plus à la surface du végétal que dans l'air. À midi la différence est de plus de 15 °C : la température de l'air est de 9 °C, celle de la surface du coussin de 23 °C. La température de surface et la différence diminuent après 15 h quand l'exposition aux radiations lumineuses baisse. La plante emmagasine les infrarouges de la lumière qui portent la chaleur, ce qui lui permet d'avoir une température supérieure à celle de l'air. La forme en coussin piège la chaleur.

- Les poils épidermiques qui constituent le duvet des feuilles isolent thermiquement les parties vitales de la plante.

- Il y a production en grande quantité de molécules organiques (sucres et protéines), ce qui augmente la concentration du milieu intérieur des cellules végétales et fonctionne comme un antigel. En effet l'eau des cellules contenant plus de molécules gèle à une température plus faible.

### Stratégies pour résister au dessèchement

La petite taille et la forme en boule limitent l'impact du vent sec.

Les feuilles en forme d'aiguille, recroquevillées, diminuent la surface d'échange entre l'air sec et la plante et limitent donc les pertes en eau. Le duvet est dû à la présence de poils épidermiques qui isolent les parties vitales de la plante et limitent aussi les pertes en eau tout comme la couche cireuse imperméable.

### Stratégies pour résister aux radiations lumineuses

Le duvet recouvrant les feuilles limite l'exposition aux radiations lumineuses en les réfléchissant en partie.

Dans le **document 14** on compare la teneur en vitamine C d'espèces proches vivant en montagne ou en plaine. On note que les teneurs en vitamine C sont très nettement supérieures pour les deux plantes alpines (renoncule des glaciers et homogyne des Alpes) vivant à 2 000 m d'altitude par rapport aux plantes de plaine.

Les molécules oxydantes produites par l'exposition à la lumière sont détruites par cette vitamine C présente en grande quantité.

**10** Le gui est une plante chlorophyllienne qui se fixe sur les branches d'un autre végétal tel que le pommier ou le peuplier. Il n'a pas de relation avec le sol puisqu'il n'a pas de racines. Il vit donc hors sol.

Il faut repérer les deux questions et y répondre séparément.

L'étude des documents permet de voir comment le gui peut vivre sans ce contact en vivant aux dépens d'un arbre hôte et comment sa reproduction lui permet de parasiter d'autres arbres.

## 1. Quelles sont les adaptations du gui qui permettent la vie hors du sol ?

### • Étude des documents 15 et 16

Le gui est fixé sur une branche hôte par des suçoirs qui s'enfoncent dans le bois de la branche, au niveau des tissus conducteurs.

**Analyse :** D'après la coupe histologique dans une branche parasitée (**document 16b**), l'extrémité du suçoir se trouve dans le xylème. Le **document 16a** rappelle que le xylème conduit la sève brute.

**Interprétation :** Le gui puise des éléments directement dans les vaisseaux du xylème et donc dans la sève brute de son hôte.

### • Étude du document 17

**Analyse :** La sève brute du xylème contient uniquement des ions en faible concentration en solution dans de l'eau, elle est exclusivement minérale. La sève élaborée contient ces mêmes ions plus concentrés avec par exemple 10 fois plus d'ions  $\text{PO}_4^{3-}$  (0,5 mg pour la sève élaborée contre 0,05 pour la sève brute). Elle contient aussi de la matière organique sous forme de saccharose.

**Interprétation :** La matière organique de la sève brute est le résultat de la photosynthèse du végétal et elle est distribuée à toutes les cellules.

L'élévation des concentrations ioniques n'est pas due à un ajout d'ions, mais à un prélèvement d'eau par les cellules chlorophylliennes, ce qui concentre la sève élaborée. La composition comparée des sèves brute et élaborée permet de mettre en évidence que le gui ne puise que de la matière minérale (eau principalement et ions minéraux) dans le xylème de son hôte. Il peut ensuite faire la photosynthèse et produire sa propre matière organique, car il est chlorophyllien.

**Conclusion :** Les adaptations qui permettent au gui de vivre hors sol, sur une branche de l'hôte, sont donc des suçoirs qui lui permettent de puiser de l'eau et des ions dans la sève brute de son hôte au lieu de les prélever dans le sol.

## 2. Quelles sont les adaptations du gui qui lui permettent de parasiter d'autres arbres ?

### • Étude du document 18

**Analyse :** La pollinisation chez le gui se fait grâce à des insectes butineurs, mais la dispersion des graines est assurée par des oiseaux qui consomment les baies produites. La baie contient une substance collante, la viscine. La fauvette lorsqu'elle mange une baie se débarrasse de la graine et des téguments (enveloppes) en frottant son bec sur une branche, la viscine sèche et la graine reste collée sur la branche. La grive mange la baie entière et rejette la graine non digérée dans ses excréments sur un autre arbre où elle reste collée. La graine peut alors germer.

**Interprétation :** La présence de viscine et l'intervention des oiseaux permettent au gui de disperser ses graines et donc de parasiter d'autres arbres en élaborant des suçoirs.

**Conclusion :** La baie de gui contient des sucres attirant les oiseaux, de la viscine permettant de coller les graines aux branches, elle est donc une adaptation à la dispersion des graines. Ces graines ont ensuite la capacité de se fixer et de parasiter un nouvel arbre.

### **Bilan**

L'étude de ces documents montre qu'à tous les niveaux de sa biologie, le gui est adapté au parasitisme des arbres : ses suçoirs remplacent ses racines et lui permettent une nutrition minérale aux dépens de l'hôte, la dissémination de ses baies lui permet de se disperser et parasiter d'autres arbres.



## 5 La plante domestiquée

Les plantes sont à la base de l'alimentation humaine directement ou indirectement par l'alimentation des animaux d'élevage. Elles constituent aussi des ressources dans différents domaines : énergie, habillement, construction, médecine, arts, pratiques socioculturelles, etc. La culture des plantes constitue donc un enjeu majeur pour l'humanité. Pour améliorer les propriétés des plantes cultivées, l'Homme agit sur leur génome.

### I EXEMPLE DU MAÏS CULTIVÉ ACTUELLEMENT

#### 1. Intérêt agricole

##### ■ Utilisations

- **Alimentation animale** (environ les deux tiers), surtout dans les pays industrialisés.
- **Alimentation humaine**, surtout dans certains pays du tiers monde.
- Production d'alcool pour les **agrocarburants**.

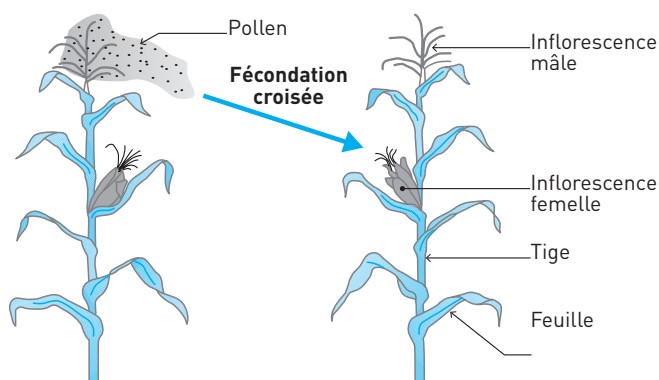
##### ■ Parties du végétal exploitées

- **Le maïs grain**. Le grain de maïs est très riche en amidon (glucide complexe source d'énergie), ce qui lui donne son intérêt alimentaire. Historiquement, le maïs a été l'aliment de base de toutes les civilisations précolombiennes d'Amérique du Sud et d'Amérique centrale.
- **Le maïs fourrage**. Récoltée avant son dessèchement, la partie aérienne est broyée, tassée : une fermentation se produit... Le maïs fourrage constitue la base de l'alimentation des bovins.

#### 2. Caractéristiques de la plante

- C'est une plante herbacée annuelle de la famille des graminées. La taille des variétés couramment cultivées varie entre un et trois mètres. Sa croissance rapide nécessite un apport en eau important.
- Chez le maïs, les inflorescences (ensemble de fleurs) mâles et femelles sont séparées. L'**inflorescence femelle**, qui donnera l'**épi**, est à l'aisselle d'une feuille. L'**inflorescence mâle** se trouve au sommet de la plante. L'émission du pollen est plus précoce que la réceptivité des stigmates, ce qui empêche toute autofécondation. Comme le pollen est dispersé par le vent, la pollinisation croisée où le pollen d'une inflorescence mâle d'une plante féconde les inflorescences femelles d'une autre plante se réalise dans la majorité des cas.

## Doc 1 Inflorescences et pollinisation chez le maïs



- Chaque **grain de maïs** est un fruit sec qui contient une graine. La dispersion de ces graines de grosse taille est impossible naturellement.
- Le maïs cultivé actuellement est idéal pour une production massive de grains, mais sa survie naturelle est impossible sans l'action de l'Homme.

### 3. Les pratiques culturales augmentant la productivité

- Utilisation d'**engrais chimiques** qui contiennent des minéraux permettant de compenser l'appauvrissement des sols dû au non-recyclage de la matière exportée lors de la précédente récolte.
- **Irrigation** des champs, pour apporter artificiellement de l'eau.
- Utilisation de **produits phytosanitaires ou pesticides** qui permettent une production végétale maximale du maïs en détruisant les parasites, les ravageurs et les espèces en compétition (insecticides, fongicides, herbicides ou désherbants...).

#### L'essentiel

Le maïs est une plante cultivée principalement pour ses grains. Les variétés cultivées ont été sélectionnées pour leur intérêt pour l'Homme mais ne peuvent se développer sans son intervention.

## II L'HISTOIRE DU MAÏS : SÉLECTION ET HYBRIDATION

L'ancêtre sauvage du maïs est vraisemblablement la **téosinte**.

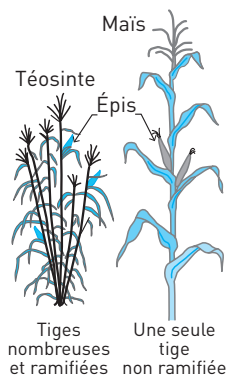
### 1. La comparaison téosinte/maïs

Le maïs actuel a très peu d'épis, mais ceux-ci sont beaucoup plus gros et produisent plus de grains que ceux de leurs ancêtres. L'enveloppe très dure des grains de la téosinte offre une bonne protection pour l'embryon, mais cette dureté rend les grains non comestibles.

## Doc 2 Comparaison de l'ancêtre téosinte et du maïs moderne

Chez la téosinte, les épis, nombreux et petits, comportent chacun une quarantaine de grains protégés par une enveloppe rigide.

Chez le maïs il n'y a qu'un ou deux gros épis comportant environ 500 grains nus.



## 2. La sélection des plantes intéressantes

### ■ Les différences génétiques

Les très grandes différences morphologiques entre le maïs et son ancêtre sauvage sont liées pour une large part au gène *teosinte branched 1* (*tb1*). L'expression de ce gène empêche le développement des ramifications et conduit s'il est plus exprimé (chez le maïs) à la création d'une seule tige et à une croissance apicale (du bout de la tige) privilégiée. La perte de la coque des grains, qui les rendaient impropres à la consommation, est due quant à elle à des mutations du gène *tga1*, identifié récemment, qui réduit très fortement la taille des enveloppes indurées entourant le grain.

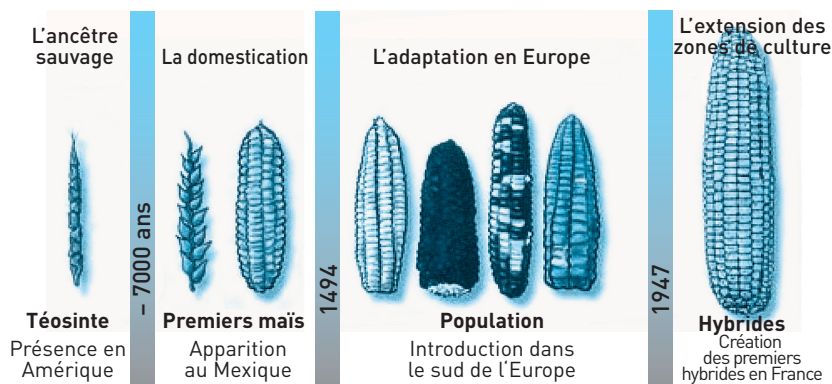
Il suffit de quelques mutations sur des gènes particuliers pour expliquer les différences entre téosinte et maïs.

■ La **domestication** du maïs, par sélection de plants de téosinte mutés qui aboutit au maïs actuel, aurait commencé il y a neuf millénaires au Mexique puis s'est poursuivie partout dans le monde. Les plants ayant les grains les plus nombreux et les plus gros ont été sélectionnés dès le début.

■ Les **sélections actuelles** portent en particulier sur le développement et la croissance du maïs, sur la résistance au stress hydrique ou azoté.

■ La domestication du maïs a entraîné la perte de la dissémination spontanée des grains, et la suppression d'une enveloppe extrêmement dure enveloppant le grain, caractères favorables pour une plante sauvage mais gênants pour l'utilisation humaine.

### Doc 3 Histoire du maïs



#### L'essentiel

L'Homme a effectué et effectue encore une sélection « artificielle » des plantes portant les mutations qui leur confèrent des caractères intéressants pour son usage.

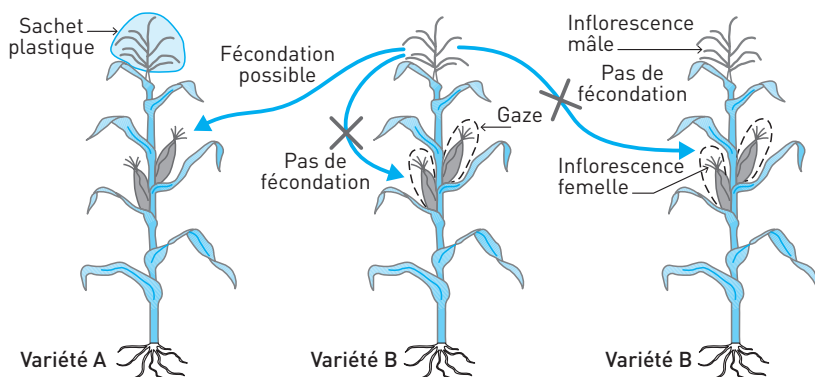
### 3. Les hybridations

- Les techniques de croisement permettent d'obtenir de nouvelles plantes qui n'existaient pas dans la nature (nouvelles variétés, hybrides, etc.). Des hybrides associant les caractères intéressants de leurs deux parents sont produits puis conservés pour leurs avantages. De plus les hybrides ont une augmentation de leurs capacités (vigueur, rendement, résistances, précocité, etc.) par rapport à leurs parents de lignées pures, on parle de **vigueur hybride**.
- La séparation des sexes et la grande taille des inflorescences chez le maïs permettent à l'expérimentateur ou au cultivateur de modifier aisément le caractère aléatoire des fécondations et d'obtenir des lignées pures (individus homozygotes) par autopolinisation ou hybrides par pollinisation croisée.

**Autopolinisation** : Les inflorescences sont protégées par un sac. À maturité, le sac contenant l'inflorescence mâle est secoué au dessus de la fleur femelle. L'obtention d'une lignée pure pour les caractères choisis demande plusieurs générations.

**Pollinisation croisée dirigée** : Pour obtenir un hybride AB, les plantes des lignées pures A et B sont cultivées conjointement (en lignes bien distinctes). La plante B choisie comme mâle a ses inflorescences femelles enveloppées ou enlevées. La plante A choisie comme femelle a ses inflorescences mâles enveloppées ou enlevées. Elle sera fécondée obligatoirement par le pollen de B.

## Doc 4 Hybridation dirigée



## L'essentiel

L'Homme agit sur le génome des plantes cultivées et donc intervient sur la biodiversité végétale par le moyen d'une sélection « artificielle ».

## III LES ORGANISMES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉS (OGM)

## 1. Le génie génétique

Les techniques du génie génétique permettent d'agir directement sur le génome des plantes cultivées et de le modifier, notamment par **transgénèse**. Le principe de la transgénèse repose sur le transfert d'un gène d'une cellule à une autre, afin de lui apporter la capacité de produire la protéine codée par ce gène. Cette nouvelle protéine peut donner un nouveau caractère et engendrer un **avantage** certain pour la plante ou surtout pour l'agriculteur : résistance à un ravageur, à certaines conditions climatiques, croissance plus importante ou plus rapide, meilleure qualité nutritive.

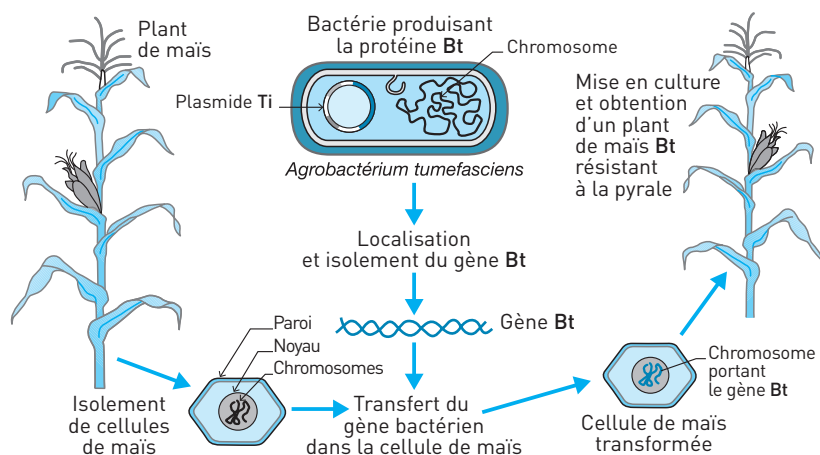
## 2. Le maïs transgénétique Bt

■ Le maïs transgénétique « Bt », résistant aux insectes ravageurs a été la première application pratique du génie génétique en protection des cultures.

■ Le gène « Bt » de la bactérie *Bacillus thuringiensis* du sol code pour une protéine qui est toxique pour la chenille d'un papillon appelé **pyrale du maïs**. Ce gène « Bt » est extrait du génome de la bactérie et intégré par transgénèse dans le patrimoine génétique du maïs. On obtient une plante transgénétique, un OGM.

■ Le gène « Bt » s'exprime chez l'OGM « Bt » : la toxine produite par la plante grâce au gène Bt la protège contre la pyrale, son principal ravageur.

## Doc 5 Production de maïs transgénique



### ■ L'intérêt du maïs GM (génétiquement modifié)

La toxine insecticide est produite à l'intérieur du plant de maïs, elle est donc protégée des facteurs climatiques, et son efficacité dure plus longtemps que celle des traitements chimiques. Les agriculteurs n'ont plus besoin d'utiliser de l'insecticide contre la pyrale, mais il faut payer le surcoût des semences OGM.

### ■ Les incertitudes sur le maïs GM

Le maïs transgénique contient dans ses grains une concentration importante de toxine Bt qui est donc consommée par du bétail et des humains, et se retrouve dans leur organisme. Des tests de toxicité contradictoires ont montré pour certains des risques de maladies liées à la consommation de ce maïs chez des souris. En est-il de même pour le bétail et pour l'Homme ?

Ce maïs soulève également de nombreuses inquiétudes sur son impact sur les autres insectes, notamment sur ceux qui participent à la pollinisation des plantes. Il y a aussi développement d'autres ravageurs du maïs non sensibles à la toxine Bt et profitant de l'absence de la pyrale.

#### L'essentiel

L'utilisation des plantes et leur modification par l'Homme est une très longue histoire de la modification du génome des plantes cultivées, qui va des pratiques anciennes de sélection à la mise en œuvre des technologies les plus modernes comme le génie génétique.

## SAVOIR-FAIRE

## Vocabulaire

- **Domestication** : Ensemble de processus engendrant des modifications phénotypiques et/ou génétiques de l'espèce, l'amenant à répondre aux besoins de l'Homme. La domestication fut une étape cruciale du développement des sociétés humaines car elle s'est faite conjointement au développement de l'agriculture et a permis la sédentarisation.
- **Hybride** : Animal ou végétal issu du croisement d'individus d'espèces, de variétés ou de races différentes.
- **Transgénèse** : Technique de biologie moléculaire destinée à transformer le génome d'un organisme receveur en y insérant un gène (transgène) qu'il ne possède pas naturellement.
- **OGM** : Un **organisme génétiquement modifié** est un organisme vivant dont le patrimoine génétique a été modifié par l'Homme pour acquérir une capacité nouvelle. Le plus souvent c'est par transgénèse.

## Compétences

1. **Maîtriser la notion d'hybridation et retrouver les génotypes créés.**
2. **Retrouver les étapes d'une transgénèse.** Il faut définir le transgène (ADN transféré) puis repérer l'organisme donneur et l'organisme receveur.
3. **Mettre en évidence les intérêts de l'utilisation d'un OGM, mais aussi ses inconvénients** (à partir de l'exploitation des documents). Il ne faut pas prendre parti quel que soit votre avis. Il faut prendre les informations nécessaires dans le texte, le graphique, le schéma proposés afin d'illustrer avantages ou inconvénients.

## Repères

1. Connaître l'histoire de la domestication d'un végétal (exemple du maïs dans ce manuel).
2. Reconnaître et différencier sélection, création de nouvelles variétés par hybridation ou manipulation génétique.
3. Décrire la transgénèse et ses applications dans l'agriculture.

## EXERCICES D'APPLICATION

## 1 MOTS CROISÉS

★ 15 min ▶ P. 130

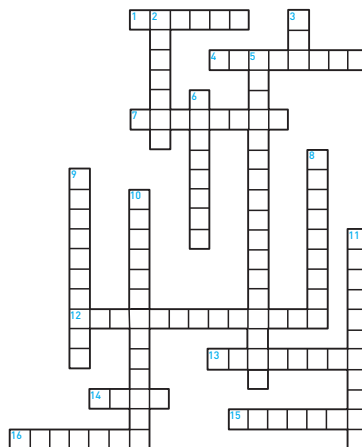
Remplissez la grille avec les termes correspondant aux définitions suivantes.

**Horizontalement**

1. Glucide complexe, principale réserve des végétaux.
4. ADN circulaire bactérien utilisé comme vecteur lors d'une transgénèse.
7. Modification de la séquence de nucléotides de l'ADN.
12. Modification de caractéristiques de végétaux par et pour l'intérêt des humains.
13. Ancêtre du maïs.
14. Portion d'ADN codant pour une protéine.
15. Matière minérale apportée à une culture pour augmenter sa production.
16. Descendant de deux individus de races, variétés ou espèces différentes.

**Verticalement**

2. Lieu d'origine du maïs.
3. Être vivant ayant son matériel génétique modifié par l'Homme.
5. Transfert du pollen d'une fleur d'un plant vers une autre fleur de ce même plant.
6. Organisme procaryote très utilisé en génie génétique.
8. Choix des individus intéressants pour l'Homme.
9. Produits chimiques détruisant les ravageurs et les parasites d'un végétal cultivé.
10. Ensemble de fleurs.
11. Transfert d'un gène dans une cellule différente.

**Doc 6 Grille à compléter**

## 2 LA TRANSGÉNÈSE : QCM

★★ 15 min ▶ P. 130

Repérez les propositions fausses et corrigez-les.

1. Un OGM est un organisme :
  - a. dont on a modifié le nombre de chromosomes.
  - b. obtenu par culture d'une cellule in vitro après suppression de son noyau.
  - c. dont le génotype est modifié artificiellement.
  - d. dont la modification génétique est transmissible à sa descendance.



## 2. La transgénèse permet la création d'organismes :

- présentant de nouveaux génomes.
- présentant de nouveaux caractères phénotypiques.
- d'intérêt agronomique à moindre coût.

## 3. Les étapes de la transgénèse comportent :

- la sélection d'un gène codant pour une protéine intéressante chez un organisme donneur.
- la suppression du matériel génétique de l'organisme receveur.
- l'introduction du transgène dans le matériel génétique du donneur.
- la sélection des organismes ayant intégré le nouveau gène.

## 4. Les plantes OGM élaborées par génie génétique :

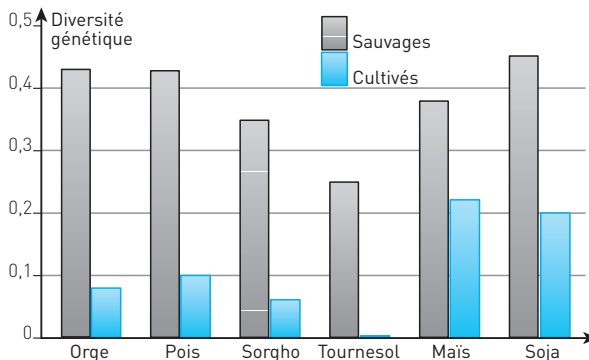
- ont toujours un intérêt écologique.
- ont toujours un intérêt agronomique.
- ne sont pas autorisées à la culture.
- font débat pour leurs conséquences environnementales.

### 3 DIVERSITÉ ET DOMESTICATION

★★ 15 min ▶ P. 130

On peut évaluer la diversité génétique d'une population en recherchant chez tous les individus la présence de séquences alléliques différentes pour un gène donné. Le graphique suivant (**doc. 7**) met en évidence cette diversité génétique, pour plusieurs espèces, entre variétés cultivées et variétés sauvages.

#### Doc 7 Diversité génétique et domestication



Grâce à l'étude de ces données dites si les affirmations suivantes sont exactes. Justifiez vos réponses.

- La diversité génétique est plus importante chez le tournesol sauvage que chez le soja sauvage.
- La diversité génétique du sorgho sauvage est trois fois supérieure à celle du sorgho cultivé.

3. La diversité génétique est toujours plus élevée chez l'espèce sauvage que chez l'espèce domestiquée.
4. La domestication augmente la biodiversité au sein d'une espèce.
5. La diversité génétique du tournesol cultivé est presque nulle, ils ont tous le même génotype.

#### 4 HYBRIDATION ARTIFICIELLE DE LA TOMATE | ★★ | 20 min | ► p. 131

La tomate est généralement autogame, c'est-à-dire que la fécondation se fait entre les ovules et le pollen de la même fleur. Toutefois, certaines variétés (de 2 à 5 %) sont allogames, c'est-à-dire que le pistil peut être fécondé par des insectes butineurs, c'est ce qu'on appelle la pollinisation croisée.

Il existe de nombreuses variétés de tomates différant les unes des autres par un ou plusieurs caractères héréditaires.

Pour créer une nouvelle variété de tomates, il faut décider des caractères que l'on veut retrouver dans cette création : couleur, forme, volume, saveur, précocité...

On devra donc avoir à disposition deux pieds de tomates différentes choisies pour engendrer les nouvelles caractéristiques que l'on souhaite retrouver dans notre création.

On choisit une variété pure 1, une tomate donnant des fruits de grosse taille, avec peu de saveur et une variété pure 2 donnant des fruits de petite taille, mais avec beaucoup de saveur.

Le résultat de l'hybridation entre 1 et 2 en F1 est à 100 % de plants de tomates donnant des fruits de petite taille et de peu de saveur.

1. Comment peut-on provoquer une fécondation croisée artificielle ?
2. Sachant que chaque caractère est codé par un seul couple d'allèles, déterminez les relations de dominance et récessivité de ces allèles pour chaque gène grâce aux individus de F1. Les deux gènes sont indépendants.

Voir le chapitre 2.

**Aide :** On note T le gène qui code la taille du fruit, avec t1 l'allèle donnant un gros fruit et t2 l'allèle donnant les petits fruits. On note S le gène qui code la saveur du fruit, avec s1 l'allèle donnant un fruit peu savoureux et s2 l'allèle donnant les fruits savoureux.

3. Quel est le génotype de la variété recherchée avec fruits savoureux et de grande taille ? Comment l'obtenir ?

## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

## 5 LES RIZ GM EN CHINE

★★ 25 min ▶ P. 131

Depuis cinq ans, la production de riz est en chute libre, alors que la population chinoise ne cesse d'augmenter. Un casse-tête pour les autorités : « Les pyrales attaquent 75 % des rizières chinoises et causent des pertes d'un milliard de dollars par an. » [...]

Des chercheurs ont mis au point un riz GM (génétiquement modifié) résistant aux insectes dont le gène **CPTi** récupéré chez le pois, empêche les prédateurs du riz de le digérer. [...] D'autres riz transgéniques résistants aux herbicides, à la salinité de l'eau ou à la sécheresse, ont été mis au point. « Si tous les riziculteurs chinois adoptaient ces riz GM, l'économie en terme de pesticides et de main-d'œuvre pourrait s'élever à 4 milliards de dollars par an. » [...] Le riz transgénique résistant aux insectes évitera des milliers d'empoisonnements par les pesticides, il sauvera aussi les poissons et les crabes qui vivent dans les rizières inondées ; il améliorera la santé des consommateurs chinois qui ingurgitent régulièrement des produits toxiques dans leurs aliments. Le souci de la nature et de la santé est aussi le credo des anti-OGM [...]. La toxine fabriquée par le gène Bt des OGM résistants à la pyrale est au cœur des débats. Se digèrera-t-elle correctement ou risque-t-elle au contraire de produire des allergies ? Un riz plein de toxines Bt destiné à lutter contre des insectes spécifiques va-t-il éliminer d'autres espèces ? « En Chine, les rizières sont souvent situées en bordure de champs de mûriers sur lesquels se nourrissent les vers à soie. » [...] Et même avec les prédateurs du riz, le pari n'est pas gagné. Aux États-Unis, les producteurs de plants OGM savent que des zones tampon, semées de plantes traditionnelles, doivent servir de refuges aux insectes afin que leurs descendants ne développent pas de résistance aux toxines de la plante OGM. [...] « Avant de cultiver du riz GM, il faut surtout apprendre à gérer correctement ces cultures ».

D'après *Sciences & Vie*, juillet 2005

1. Rappelez ce qu'est un OGM.
2. Indiquez la propriété commune à tous les êtres vivants qui permet au riz d'exprimer un gène du pois.
3. Nommez le mécanisme naturel à l'origine de l'expansion d'insectes résistants aux toxines.
4. Quels sont les arguments des auteurs en faveur de l'utilisation de riz Bt ?
5. Quels sont les arguments des auteurs conduisant à craindre que les riz GM soient néfastes à l'environnement et à la santé ?

## 6 L'IMPACT D'UN OGM SUR LA BIODIVERSITÉ

★★★ 40 min ▶ P. 132

Chaque année, des cultures de maïs sont victimes de la chenille d'un papillon, la **pyrale du maïs** qui dévore l'intérieur des tiges.

Après avoir précisé la technique d'obtention du maïs Bt 176, les objectifs visés par sa culture, montrez que son utilisation présente un risque pour la survie du papillon monarque.

### Il y a en fait trois questions.

1. Il faut expliquer, d'après vos connaissances et le document 8, comment on obtient du maïs Bt.
2. Il faut donner les avantages (objectifs visés) attendus de sa culture.
3. Il faut ensuite montrer grâce au document 9 le risque qu'il engendre pour la survie du papillon monarque. (Attention à bien identifier l'espèce à l'origine des grains de pollen.)

#### Doc 8 Le maïs Bt

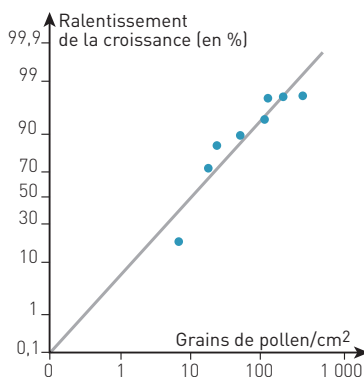
Depuis une vingtaine d'années, on cherche à diminuer l'utilisation d'insecticides en agriculture. Une des voies de recherche est l'obtention d'un maïs transgénique produisant lui-même une molécule insecticide. Pour fabriquer ce maïs, on a utilisé une bactérie du sol *Bacillus thuringiensis* (Bt) qui produit naturellement une protéine insecticide : le gène codant cette protéine insecticide a été isolé et introduit dans le patrimoine génétique du maïs. On obtient ainsi des plants de maïs appelé Bt 176, dont toutes les cellules sont résistantes à la pyrale.

#### Doc 9 Maïs Bt et survie des chenilles du papillon monarque

Les feuilles d'asclépiade sont l'unique source de nourriture des chenilles du papillon monarque. Cette plante pousse à l'intérieur des parcelles de maïs d'Amérique du Nord.

Le nombre moyen de grains de pollen libérés par le maïs et se déposant sur le feuillage de l'asclépiade est de 171 grains/cm<sup>2</sup>.

Le graphique ci-dessous, résultant de travaux de laboratoire, indique le retard de la croissance des chenilles de papillon monarque en fonction de leur exposition au pollen du maïs Bt 176. Le ralentissement de la croissance perturbe le cycle de reproduction du papillon monarque.



## 7 LES TOMATES GM

★★★ 45 min ► P. 133

Les sols salés dégradés et difficilement cultivables sont nombreux sous les climats secs. C'est l'évaporation de l'eau du sol sous l'effet de la chaleur qui provoque la remontée des sels minéraux et leur cristallisation.

L'excès de sel dans une plante entraîne une perte importante d'eau des cellules, ce qui perturbe les réactions biochimiques et peut entraîner leur mort.

Certaines plantes sont adaptées aux fortes concentrations en sel, elles empêchent la sortie de l'eau de leurs cellules en concentrant leur vacuole (compartiment cellulaire de réserve) en ions  $\text{Na}^+$ .

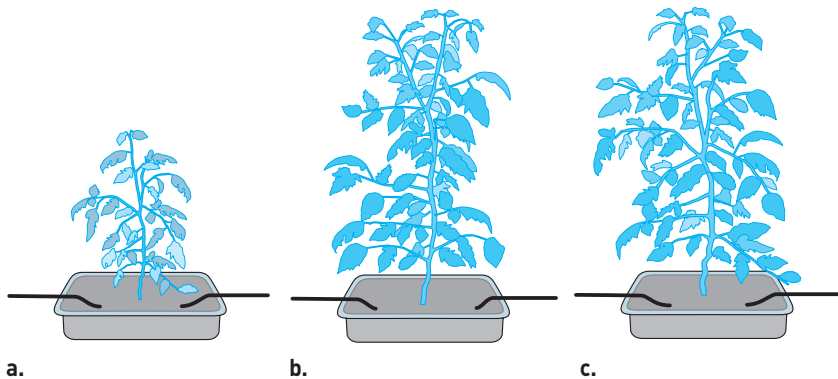
On a identifié chez l'*Arabidopsis thaliana* (une plante très utilisée en laboratoire) le gène NHX1 qui code pour une protéine de la membrane vacuolaire responsable du transport des ions  $\text{Na}^+$  du cytoplasme vers la vacuole. Ce gène a été cloné et ajouté au matériel génétique de la tomate par transgénèse. On obtient une tomate transgénique NHX1.

À partir des informations issues des documents et de vos connaissances, dégagez les arguments permettant de justifier l'intérêt de ces tomates transgéniques NHX1 pour l'agriculture.

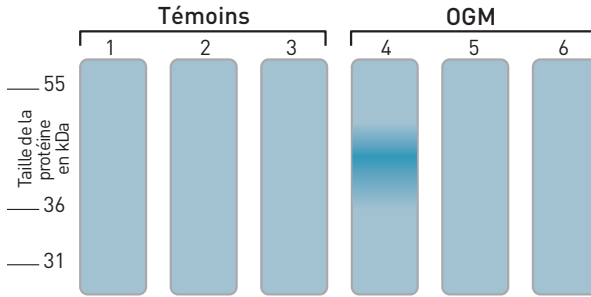
Identifier la problématique sous-jacente liée à la difficulté de cultiver des plantes en milieu salé et la poser clairement en utilisant le document 10.

### Doc 10 Cultures expérimentales de tomates

- Tomates sauvages poussant sur un milieu riche en sel (200 mM de NaCl).
- Tomates transgéniques poussant sur un milieu riche en sel (200 mM de NaCl).
- Tomates sauvages poussant sur un milieu pauvre en sel.



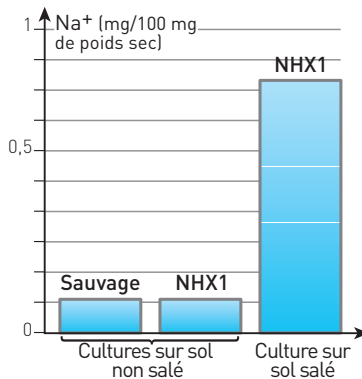
### Doc 11 Expression du gène NHX1 chez l'OGM



Des extraits protéiques provenant de tomates sauvages (1 à 3) et de tomates transgéniques (4 à 6) sont comparés par électrophorèse. Ces extraits sont obtenus à partir de membranes vacuolaires (1 et 4), de membranes nucléaires (2 et 5) et de membranes plasmiques (3 et 6). La présence de la protéine NHX1 est révélée par un anticorps spécifique couplé à une molécule colorée.

Se souvenir que les cellules végétales possèdent deux éléments caractéristiques par rapport aux cellules animales : une paroi squelettique et une vacuole. Celle-ci sert à stocker des substances et permet d'éviter leur effet toxique sur le cytoplasme. Pour exploiter les résultats du document 11, faire bien attention à comparer des « objets » de même nature : l'étude entre dans le détail des constituants cellulaires.

### Doc 12 Comparaison des concentrations en ions $\text{Na}^+$ dans des plants de tomate sauvage et NHX1 sur sol normal et sur sol sursalé (200 mM de NaCl)



## EXERCICES D'APPROFONDISSEMENT

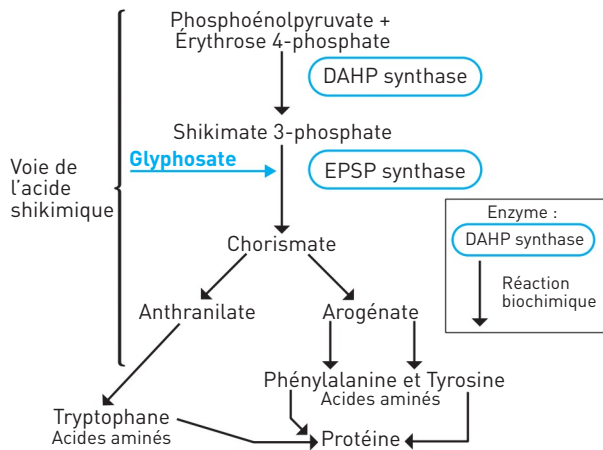
8

LE MAÏS OU SOJA TRANSGÉNIQUE  
ROUNDUP READY

★★★ 40 min ▶ p. 134

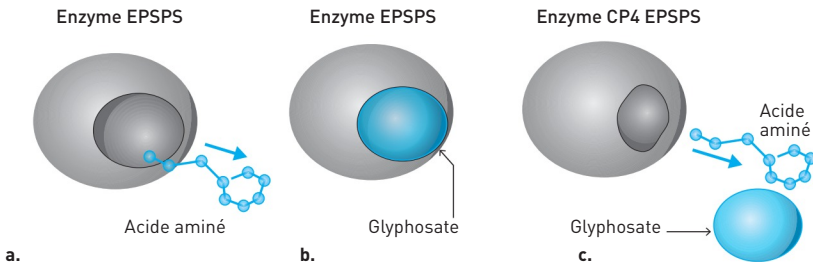
Le **glyphosate** commercialisé sous le nom de **Roundup** a été découvert en 1971. C'est un puissant herbicide non sélectif qui agit au niveau de la chaîne de production des acides aminés du végétal. Il est pulvérisé dans les cultures pour détruire toutes les espèces végétales avant de semer le végétal cultivé. Cependant il ne peut être utilisé ensuite, car il détruirait aussi l'espèce cultivée.

## Doc 13 L'action du glyphosate dans les cellules végétales

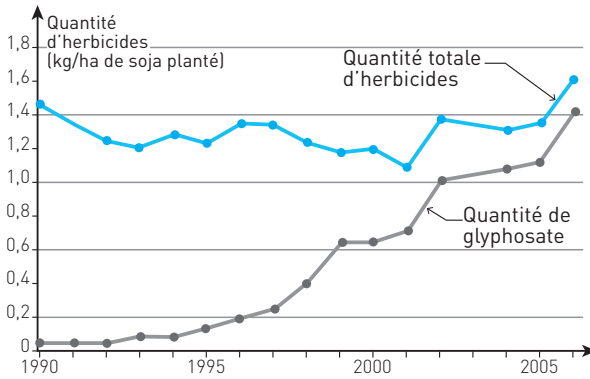


## Doc 14 Conséquence de l'expression du gène « Roundup ready »

- L'enzyme EPSPS est impliquée dans la production d'acides aminés essentiels.
- En se liant à l'enzyme EPSPS, le glyphosate la bloque. La production d'acides aminés est stoppée.
- Le gène du Roundup ready engendre la production d'une autre enzyme EPSPS légèrement différente. Celle-ci n'est pas inhibée par le glyphosate.



### Doc 15 Évolution des quantités d'herbicides dont le glyphosate utilisés sur des cultures de soja de 1990 à 2006 aux États-Unis



1. D'après l'étude du document 13, comment agit le glyphosate ?

Ne vous perdez pas dans le détail des réactions mais rappelez-vous que chacune est catalysée par une enzyme protéique.

2. En 1996, les laboratoires Monsanto ont mis au point un OGM de soja résistant au glyphosate appelé **soja Roundup ready**.

D'après l'étude du document 14, quelle est la particularité des OGM Roundup ready ?

3. D'après le document 15, quelles sont les conséquences de la culture d'OGM Roundup ready ?

4. Quels sont les intérêts agricoles et écologiques d'une plante Roundup ready ?



## CONTRÔLE

9

LE PLASMIDE BACTÉRIEN  
ET LA TRANSGÉNÈSE

★★★ 60 min ▶ p. 135

*Agrobacterium tumefaciens* est une bactérie qui se développe dans le sol. Cette bactérie constitue aujourd'hui un matériel de choix dans la réalisation de transgénèses végétales.

*Agrobacterium tumefaciens* infecte naturellement les végétaux supérieurs présentant des blessures à la base de leur tige. En réaction à cette infection, les cellules du végétal se multiplient et forment une tumeur qui libère dans le milieu des opines (deux acides aminés couplés). Les bactéries présentes dans le sol près de la tumeur sont alors capables d'utiliser ces opines comme source d'azote, mais aussi de carbone et d'énergie (**doc. 16**).

La réaction du végétal est due au transfert d'un petit ADN, l'ADN-T, depuis la bactérie jusque dans le génome des cellules de la plante par l'intermédiaire d'un plasmide appelé plasmide Ti (**doc. 17**).

Le **document 18** présente quelques étapes d'une transgénèse réalisée à partir du plasmide Ti et de plants de colza. L'ADN-T du plasmide Ti a été remplacé par un ADN comportant deux gènes essentiels :

- un gène permettant l'amélioration de la composition en acides gras des graines de colza ;
- un gène de résistance à un antibiotique.

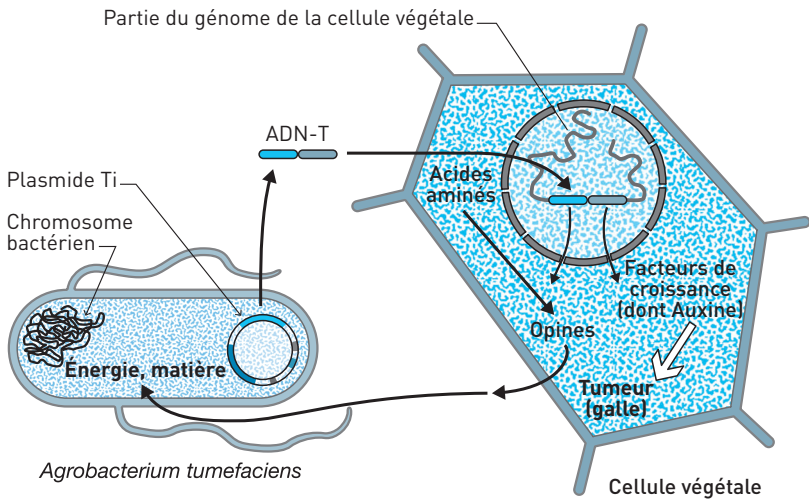
À partir des informations issues des documents et de vos connaissances, dégagez les arguments permettant de justifier que cette bactérie effectue une transgénèse naturelle.

Présentez ensuite les principales étapes permettant d'obtenir un organisme génétiquement modifié, intéressant en agronomie, à l'aide de cette bactérie.

▶ Dans ce sujet deux questions sont à traiter :

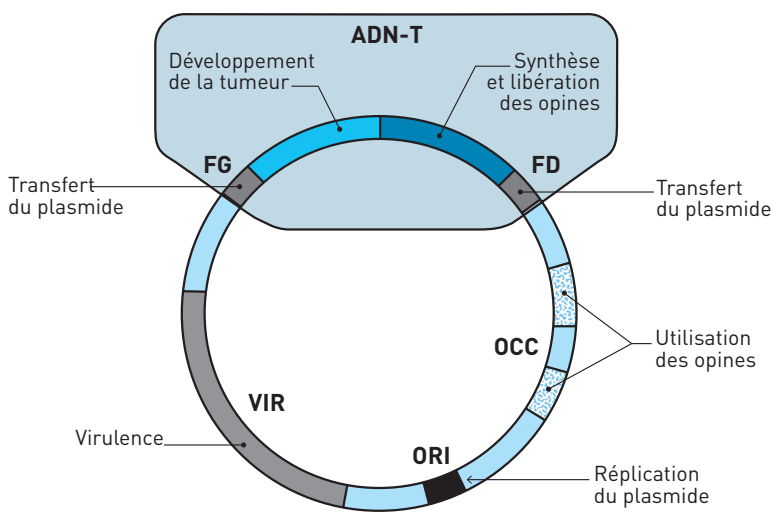
- la première consiste à expliquer comment se déroule une transgénèse naturelle avec la bactérie *Agrobacterium tumefaciens* ;
- la seconde consiste à préciser les différentes étapes pour obtenir un organisme génétiquement modifié en utilisant cette même bactérie (cas d'une transgénèse artificielle).

### Doc 16 Infection des végétaux supérieurs par *Agrobacterium tumefaciens*



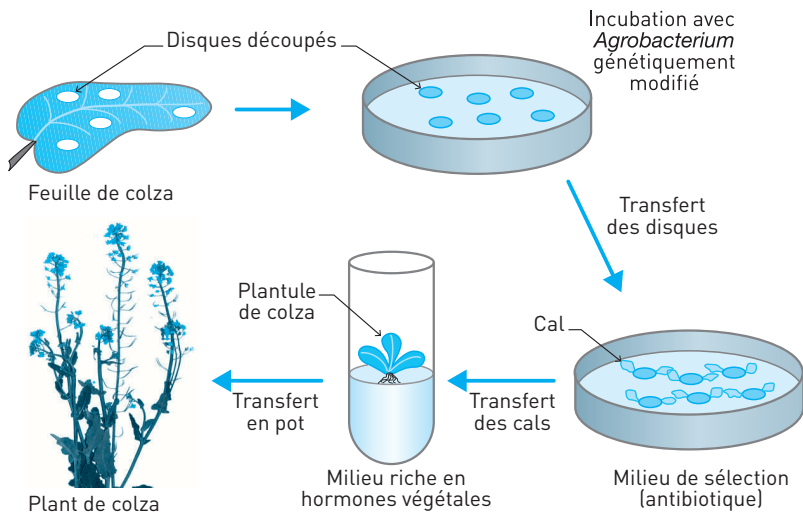
### Doc 17 Caractéristiques du plasmide Ti

Le plasmide Ti est un petit plasmide de 215 milliers de paires de bases. Le schéma ci-dessous récapitule les régions responsables de ses différentes propriétés.



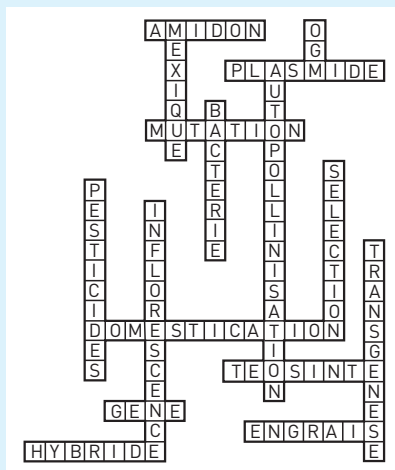
**Doc 18 Transgénèse obtenue à partir d'*Agrobacterium tumefaciens***

(Un cal est un amas de cellules indifférenciées.)



## CORRIGÉS

## 1 Doc 19 Grille complétée



2 1. a. Faux : un OGM est un organisme dont on ne modifie pas le nombre de chromosomes, mais auquel on ajoute un ou plusieurs gènes. b. Faux : un OGM est un organisme obtenu par culture d'une cellule in vitro sans suppression de son noyau. c. Vrai. d. Vrai.

2. a. Vrai. b. Vrai. c. Faux : la transgénèse permet la création d'organismes d'intérêt agronomique, mais d'un coût important.

3. a. Vrai. b. Faux : les étapes de la transgénèse ne comportent pas la suppression du matériel génétique de l'organisme receveur. Le gène du donneur est **ajouté** au matériel génétique du receveur. c. Faux : les étapes de la transgénèse comportent l'introduction du transgène dans le matériel génétique du **receveur**. d. Vrai.

4. a. Faux : les plantes OGM élaborées par génie génétique n'ont pas toujours un intérêt écologique mais toujours un intérêt agronomique qui est apporté par la présence du nouveau gène. Elles peuvent augmenter l'utilisation d'herbicides comme les Roundup ready. b. Vrai. c. Faux : les plantes OGM élaborées par génie génétique sont autorisées à la culture dans de nombreux pays. Elles deviennent majoritaires aux États-Unis, en Inde et en Chine. Mais en 2011, certains OGM ne sont pas autorisés à la culture en France, et font toujours débat sur leurs conséquences sur l'environnement et la santé humaine. d. Vrai.

3 1. Faux : le tournesol sauvage a une diversité génétique de 0,25 et le soja sauvage une de 0,45. C'est donc le soja sauvage qui a la plus grande diversité génétique.

2. Faux : la diversité génétique du sorgho sauvage est de 0,35 et celle du sorgho cultivé de 0,05, soit 6 fois supérieure.

3. Vrai : quelle que soit l'espèce, la diversité génétique est plus élevée chez les variétés sauvages.

4. Faux : la domestication diminue la biodiversité au sein d'une espèce.

5. Vrai : la diversité génétique du tournesol cultivé est presque nulle. Les individus ont tous la même séquence et donc le même génotype, au moins pour le gène étudié.

**4** 1. Même en cas d'autogamie, il est possible d'effectuer une fécondation croisée en prélevant du pollen pour avoir le gamète mâle sur un des pieds et féconder manuellement l'autre pied qui sera le femelle. Par exemple on dépose le pollen provenant des étamines des fleurs de la variété 1 sur le pistil des fleurs de la variété 2. Pour empêcher toute autofécondation il faut enlever les étamines des fleurs de 2 pour ne conserver que les gamètes femelles présents dans le pistil.

2. Les variétés pures sont homozygotes.

La variété 1 a pour le gène T l'allèle t1 qui lui donne le caractère gros fruit.

Son génotype est  $\left(\frac{t1}{t1}\right)$ . Elle a pour le gène S l'allèle s1 qui lui donne le caractère fruit peu savoureux. Son génotype est  $\left(\frac{s1}{s1}\right)$ .

La variété 2 a pour le gène T l'allèle t2 qui lui donne le caractère petit fruit.

Son génotype est  $\left(\frac{t2}{t2}\right)$ . Elle a pour le gène S l'allèle s2 qui lui donne le caractère fruit savoureux. Son génotype est  $\left(\frac{s2}{s2}\right)$ .

Les descendants de F1 sont donc tous  $\left(\frac{t1}{t2} ; \frac{s1}{s2}\right)$ .

Comme ils ont des fruits de petite taille, c'est l'expression de l'allèle t2 qui l'emporte, cet allèle t2 est dominant par rapport à l'allèle t1.

Comme ils ont des fruits de peu de saveur, c'est l'expression de l'allèle s1 qui l'emporte, cet allèle s1 est dominant par rapport à l'allèle s2.

3. Les allèles donnant les caractères intéressants t1 et s2 sont tous les deux récessifs.

Une tomate avec fruits savoureux et de grande taille a donc pour génotype  $\left(\frac{t1}{t1} ; \frac{s2}{s2}\right)$ .

Pour obtenir ce génotype il faut croiser les individus de F1 ce qui donnera un quart des descendants ayant ce génotype recherché. Ensuite il faudra effectuer des autofécondations pour obtenir une variété pure dans laquelle tous les individus auront ces caractères intéressants pour l'Homme.

**5** 1. Les OGM (organismes génétiquement modifiés) sont des organismes dont un ou plusieurs gènes ont été modifiés en laboratoire par transgénèse, c'est-à-dire par greffe d'un gène d'une espèce dans la cellule d'une autre espèce, afin de leur conférer de nouvelles propriétés transmissibles à la descendance.

2. La propriété commune à tous les êtres vivants qui permet au riz d'exprimer un gène introduit est la capacité de déchiffrer l'ADN grâce au code génétique universel (correspondance entre un gène et la protéine qu'il code). Le végétal peut utiliser un gène venant d'un autre organisme et produire la protéine correspondante.

3. Le mécanisme naturel à l'origine de l'expansion d'insectes résistants aux toxines est la sélection naturelle. Seuls les insectes vivant suffisamment longtemps se reproduisent donc transmettent leurs gènes. Les individus sensibles à l'insecticide meurent. L'apparition des résistants est due à une mutation dans leur matériel génétique qui leur confère la résistance.

4. Les arguments des auteurs en faveur de l'utilisation de riz GM sont :

– l'acquisition de nouvelles capacités pour ces végétaux qui améliore leur culture ou la permet dans de nouveaux milieux : « riz résistant aux insectes », « aux herbicides, à la salinité de l'eau ou à la sécheresse » ;

– des économies pour l'agriculteur par diminution de l'emploi de pesticides et réduction de l'intervention humaine : « Si tous les riziculteurs chinois adoptaient ces riz GM, l'économie en termes de pesticides et de main-d'œuvre pourrait s'élever à 4 milliards de dollars par an » ;

– un intérêt écologique en limitant l'utilisation d'insecticides toxiques pour l'Homme : « le riz transgénique résistant aux insectes évitera des milliers d'empoisonnements par les pesticides ; il améliorera la santé des consommateurs chinois qui ingurgitent régulièrement des produits toxiques dans leurs aliments » et les autres animaux de l'écosystème : « il sauvera aussi les poissons et les crabes qui vivent dans les rizières inondées ».

5. Les arguments des auteurs conduisant à craindre que les riz GM soient néfastes à l'environnement sont que les toxines insecticides produites sont aussi dangereuses pour d'autres insectes : « Un riz, plein de toxines Bt destinées à lutter contre des insectes spécifiques, va-t-il éliminer d'autres espèces ? En Chine, les rizières sont souvent situées en bordure de champs de mûriers sur lesquels se nourrissent les vers à soie [...]. Et même avec les prédateurs du riz, le pari n'est pas gagné. »

Les arguments des auteurs conduisant à craindre que les OGM soient néfastes à la santé humaine sont que les toxines produites par les OGM sont peut-être dangereuses pour l'Homme qui les consomme : « La toxine fabriquée par le gène Bt des OGM résistants à la pyrale est au cœur des débats. Se digèrera-t-elle correctement ou risque-t-elle au contraire de produire des allergies ? »

## 6 I. Technique d'obtention du maïs Bt

Il ne faut pas réciter le cours (paragraphe III.2) mais utiliser le document 8.

### Étude du document 8 : Le maïs Bt

Le maïs Bt est obtenu par transgénèse en insérant dans le matériel génétique du maïs le gène d'une bactérie du sol, *Bacillus thuringiensis* (Bt). En effet cette bactérie produit naturellement une protéine insecticide. On isole, dans le matériel génétique de la bactérie, le gène codant pour la protéine insecticide et on l'introduit dans le patrimoine génétique du maïs.

## II. Objectifs visés par l'utilisation du maïs Bt 176 (doc 8)

On obtient des plants de maïs, dont toutes les cellules produisent la protéine insecticide. L'utilisation d'insecticide n'est plus nécessaire car le maïs produit son **propre insecticide** et devient résistant à la pyrale.

Il y a un intérêt économique pour l'agriculteur qui utilise moins d'insecticide coûteux et un intérêt écologique car il y a moins d'insecticide pulvérisé dans le milieu.

## III. Risques pour la survie du papillon monarque

La protéine insecticide produite peut être nocive pour d'autres insectes que la pyrale.

### Étude du document 9 : Maïs Bt et survie des chenilles du papillon monarque

Les grains de pollen libérés par le maïs se déposent sur les feuilles d'asclépiade qui sont la source de nourriture unique des chenilles du papillon monarque. Les chenilles peuvent alors les ingérer, ainsi que la protéine insecticide qu'ils contiennent.

Le graphique montre que le ralentissement de la croissance des chenilles de papillon monarque augmente avec le nombre de grains de pollen présents sur les feuilles. Pour 10 grains de pollen/cm<sup>2</sup>, il est déjà de 50 % et il atteint près de 99 % dès 100 grains de pollen/cm<sup>2</sup>. D'après le texte, il y a en moyenne 171 grains de pollen/cm<sup>2</sup> sur les feuilles mangées par les chenilles.

**Conclusion :** L'ingestion des grains de pollen (en grande quantité) contenant la protéine insecticide par les chenilles en même temps que les feuilles d'asclépiade poussant dans le champ de maïs entraîne un ralentissement de la croissance des papillons monarques et la perturbation de leur cycle de reproduction. Il y a mise en péril de la survie du papillon monarque.

**7** L'étude des documents 10 à 12 permet de montrer l'intérêt des tomates transgéniques NHX1 pour la culture sur des sols salés dégradés.

### Étude du document 10 : Cultures expérimentales de tomates

La comparaison des plants de tomates sauvages (témoins) et des tomates transgéniques permet de montrer que les OGM se développent sur sols salés alors que les formes sauvages ne poussent pas. Un OGM se développe comme un plant sauvage sur sol non salé.

**Interprétation :** L'excès de sel dans la plante sauvage entraîne une perte importante d'eau des cellules qui perturbe les réactions biochimiques et peut entraîner leur mort. La plante ne peut croître et faire correctement la photosynthèse. Les tomates GM ne semblent pas sensibles à l'excès de sel, elles ont une croissance et une **photosynthèse normales**.

**Conclusion :** Les tomates transgéniques NHX1 peuvent être cultivées sur sol salé, ce qui permet l'utilisation de ces sols stériles pour d'autres plantes.

### Étude du document 11 : Expression du gène NHX1 chez l'OGM

Le gène NHX1 prélevé chez l'*Arabidopsis thaliana* est transféré par transgénèse pour donner la tomate NHX1.

L'électrophorèse comparée des protéines membranaires de tomates sauvages et transgéniques montre que la protéine NHX1 n'est présente que chez les tomates transgéniques et uniquement au niveau de la membrane de leurs vacuoles.

**Interprétation :** La présence du gène NHX1 dans le génome des tomates transgéniques leur permet de produire la protéine NHX1 au niveau de la membrane de la vacuole de leurs cellules.

**Conclusion :** C'est la présence du gène NHX1 et donc de la protéine vacuolaire correspondante qui permet la survie des tomates transgéniques sur sols salés en empêchant la sortie de l'eau de leurs cellules.

#### Étude du document 12 : Comparaison des concentrations en ions $\text{Na}^+$

La concentration en ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) dans un plant de tomate sauvage ou transgénique poussant sur sol non salé est de 0,1 mg/100 mg de poids sec. Le  $\text{Na}^+$  constitue donc 0,1 % de la matière sèche de la plante. La concentration en ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) dans un plant de tomate transgénique poussant sur sol salé est de 0,7 mg/100 mg de poids sec, soit 0,7 % de la matière sèche de la plante. Il y a donc 7 fois plus d'ions sodium dans une tomate transgénique sur sol salé que sur sol normal.

**Interprétation :** La tomate transgénique a la capacité de stocker des ions sodium lorsqu'elle est en milieu sursalé.

**Conclusion :** C'est le stockage d'ions sodium dans les plantes NHX1 qui leur permet de retenir l'eau en milieu sursalé et de vivre normalement.

#### Bilan

Les cellules de tomates transgéniques NHX1 ont un gène de l'*Arabidopsis thaliana* en plus ce qui leur permet de produire la protéine NHX1 au niveau de leur membrane vacuolaire. Cette protéine permet de transférer d'ions  $\text{Na}^+$  et leur stockage dans la vacuole. La cellule très concentrée ne perd plus d'eau même si le milieu extérieur est très salé. Elle peut donc pousser sur des sols salés dégradés ce que la tomate sauvage ne peut faire.

### 8 1. Étude du document 13 : L'action du glyphosate

La voie de l'acide shikimique permet la production de trois acides aminés : tryptophane, phénylalanine et tyrosine. Ces acides aminés sont nécessaires à la synthèse des protéines par le végétal. Le glyphosate agit sur l'enzyme EPSP synthase.

**Interprétation :** Le glyphosate doit empêcher l'activité enzymatique, ce qui bloque la synthèse des acides aminés et donc des protéines. En agissant sur l'enzyme, il empêche la production de protéines vitales pour la plante et entraîne sa mort.

### 2. Étude du document 14 : Conséquence de l'expression du gène « Roundup ready »

L'enzyme EPSP synthase est une protéine dont la forme particulière dans l'espace lui permet d'assurer son rôle dans la production d'acides aminés par la plante. La molécule de glyphosate peut se lier à celle de l'EPSPS et ainsi bloquer son action. La présence du gène « Roundup ready » entraîne la production d'une autre enzyme EPSPS (forme CP4) qui a une forme différente sur laquelle le glyphosate ne peut se fixer.



**Interprétation :** Les OGM Roundup ready ont un gène Roundup ready qui leur permet de produire une enzyme EPSPS CP4 sur laquelle le glyphosate ne peut se fixer et qui ne peut donc pas être bloquée. Le Roundup ne bloque pas la voie de l'acide shikimique et la production d'acides aminés. La plante est résistante au dés-herbant Roundup.

### 3. Étude du document 15 : Évolution des quantités d'herbicides entre 1990 et 2006

L'utilisation d'herbicides sur la culture de soja aux États-Unis varie entre 1,4 et 1,6 kg par hectare entre 1990 et 2006. Elle a légèrement baissé dans les années 90 pour réaugmenter après 2000. La part de glyphosate dans les herbicides est croissante depuis 1993 et principalement depuis 1996-1997. Elle atteint presque 87,5 % avec 1,4 kg/ha de glyphosate pour 1,6 kg/ha d'herbicides utilisés.

**Interprétation :** La mise sur le marché d'OGM Roundup ready en 1996 a entraîné une augmentation très importante de l'utilisation du glyphosate. En effet les plantes cultivées n'étant plus sensibles, l'agriculteur peut utiliser le glyphosate même pendant la culture.

Il faut noter que cet emploi abusif entraîne la sélection de plantes résistantes indésirables pour la culture et donc l'emploi d'autres herbicides à des doses toujours plus élevées.

4. L'intérêt agricole des OGM Roundup ready est de pouvoir traiter pendant toute la culture avec le glyphosate qui est un dés-herbant non sélectif. Il permet de diminuer la main-d'œuvre pour le dés-herbage et l'utilisation d'autres herbicides pouvant être plus toxiques. Ceci pourrait être un intérêt écologique, mais on voit dans le document 15 que ces OGM entraînent une surconsommation de glyphosate. Il peut devenir toxique pour l'environnement et semble-t-il, d'après des études récentes, pour la santé humaine.

### 9 I. Transgénèse naturelle avec la bactérie *Agrobacterium tumefaciens*

#### Étude du document 16 : Infection des végétaux supérieurs par *Agrobacterium tumefaciens*

Le schéma nous montre comment la bactérie *Agrobacterium tumefaciens* du sol s'introduit dans les cellules végétales d'une plante blessée. Quand elle entre en contact avec la tige blessée d'un végétal, elle transfère un petit morceau de son ADN circulaire (= plasmide) dans la cellule végétale avec laquelle elle est en contact. Ce morceau d'ADN transféré est appelé ADN-T, il s'intègre au génome de la cellule qui est alors modifié. Ce changement de génome entraîne la formation d'une tumeur au niveau de la blessure de la plante qui produit des opines. Ces molécules vont servir d'apport de matière organique aux bactéries qui sont à proximité de la blessure.

**Interprétation :** Il y a un transfert d'un morceau d'ADN de la bactérie à la cellule du végétal parasité et ce qui confère de nouvelles capacités aux cellules de ce végétal (production de nouvelles molécules). C'est donc bien une transgénèse, elle est naturelle car sans l'intervention de l'Homme.

## II. Transgénèse artificielle et obtention d'OGM

Il faut analyser le document 17, puis le document 18 en plusieurs étapes.

### Étude du document 17 : Caractéristiques du plasmide Ti

Ce document nous montre les différentes parties du plasmide de la bactérie avant le transfert de l'ADN-T. Il contient différentes portions d'ADN codant chacune pour des fonctions particulières. Par exemple l'ADN-T code pour la synthèse d'opines et le développement de la tumeur. Il est délimité par des séquences appelées « transfert du plasmide » qui permettent d'intégrer l'ADN bactérien au génome de la plante. C'est cette capacité qui est utilisée par le génie génétique.

### Étude du document 18 : Transgénèse obtenue à partir d'*Agrobacterium tumefaciens*

#### • Première étape

L'ADN-T du plasmide Ti de la bactérie a été remplacé par un gène permettant l'amélioration de la composition en acides gras des graines de colza et un gène de résistance à un antibiotique.

**Conclusion :** La bactérie est génétiquement modifiée.

#### • Deuxième étape

Des morceaux de feuilles de colza sont mis en contact avec la bactérie génétiquement modifiée. Ce contact entre la bactérie et le morceau de feuille va permettre le transfert des deux gènes qui ont remplacé l'ADN-T au niveau du plasmide.

**Conclusion :** Les cellules de colza sont génétiquement modifiées.

#### • Troisième étape

Après plusieurs jours de contact, les disques de feuille sont mis dans un milieu contenant l'antibiotique contre lequel le gène transféré donne une résistance.

**Conclusion :** C'est un test de sélection. L'antibiotique empêche la croissance des disques non modifiés génétiquement, seules les cellules modifiées ayant le gène de résistance se développent en cal.

#### • Quatrième étape

Les cals développés sont récupérés et mis en culture pour donner des plants entiers. On obtient donc une plante génétiquement modifiée ayant intégré les deux gènes transférés.

### Bilan

La fabrication d'un organisme génétiquement modifié comprend plusieurs étapes :

- modification de la bactérie permettant le transfert des gènes (gène d'intérêt et un gène de résistance à un antibiotique) et création d'un plasmide recombinant (ADN bactérien + ADN à transférer) qui est utilisé comme « véhicule des gènes intéressants » ;
- mise en contact de la bactérie renfermant un plasmide recombinant et des cellules végétales qui seront modifiées, transgénèse ;
- test de sélection pour vérifier le transfert des gènes ;
- mise en culture des organismes génétiquement modifiés intéressants pour l'agronomie car de meilleure qualité au niveau de leurs acides gras.

## 6

## Caractéristiques de la croûte continentale

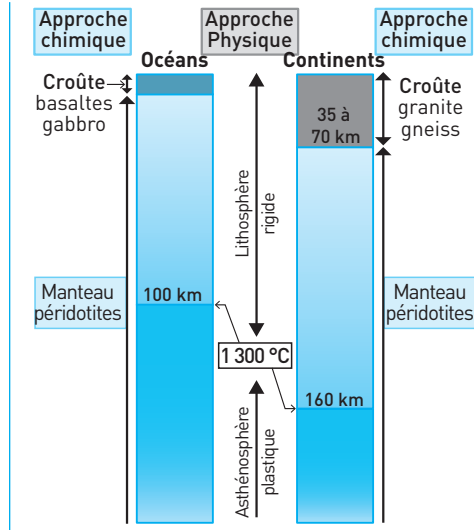
Les plaques lithosphériques sont constituées par des lithosphères océanique et/ou continentale. Au sein d'une même plaque, la lithosphère continentale – majoritairement émergée sauf au niveau de ses marges – est située à une altitude plus élevée que la lithosphère océanique, totalement immergée.

Comment expliquer ces différences de reliefs ?

### I LA LITHOSPHÈRE CONTINENTALE

#### 1. Les caractéristiques de la lithosphère

**Doc 1** Principales différences entre les lithosphères océanique et continentale



#### L'essentiel

Les limites **croûte/manteau (Moho)** et **manteau/noyau** sont marquées par des changements de la **nature chimique des roches** : le manteau est constitué uniquement de péridotite, une roche plus riche en magnésium et contenant moins d'aluminium que les roches de la croûte. En revanche, la limite entre la **lithosphère** et l'**asthénosphère est une limite thermique** : au delà de 1300 °C la péridotite devient molle, « plastique », capable de fluer très lentement (quelques cm/an). Cette limite sépare une lithosphère rigide et une asthénosphère plastique.

## 2. Les caractéristiques de la croûte continentale

Le manteau est le même pour les deux lithosphères qui diffèrent au niveau de leurs croûtes.

■ **Altitude.** Alors que le plancher de la croûte océanique est situé en moyenne à 5 km de profondeur (et plus dans les fosses), la croûte continentale culmine en moyenne à 300 m d'altitude.

■ **Épaisseur.** La croûte continentale (30 km en moyenne) est plus épaisse que la croûte océanique (10 km).

■ **Nature des roches.** Contrairement à la croûte océanique qui est entièrement magmatique, la croûte continentale est constituée de **roches métamorphiques (ex : gneiss) et de roches plutoniques (granitoïdes), d'âges très variables** (voir le chapitre 7). Ces roches constituent le **socle** des continents. Elles sont souvent masquées par une pellicule de roches sédimentaires (de 1 à 3 km d'épaisseur dans les bassins).

■ **Minéraux.** Les minéraux caractéristiques des roches de la croûte continentale sont les quartz, feldspaths et micas, alors que ceux qui dominent dans les roches de la croûte océanique sont les pyroxènes, feldspaths plagioclases et olivines.

■ **Âge.** Les roches de la croûte continentale peuvent atteindre **4 milliards d'années** contre 200 Ma pour la croûte océanique.

### L'essentiel

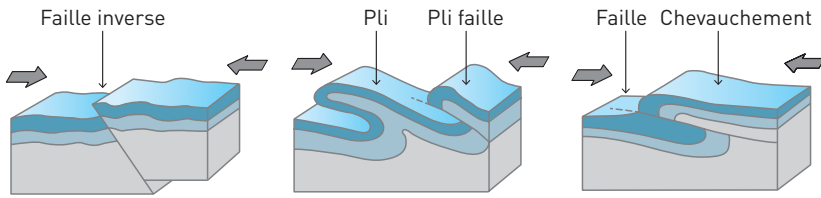
La croûte continentale est caractérisée par des roches hétéroclites, pouvant être âgées de plusieurs milliards d'années. Sa composition chimique globale est celle du granite.

## 3. Épaississement de la croûte au niveau des chaînes de montagnes

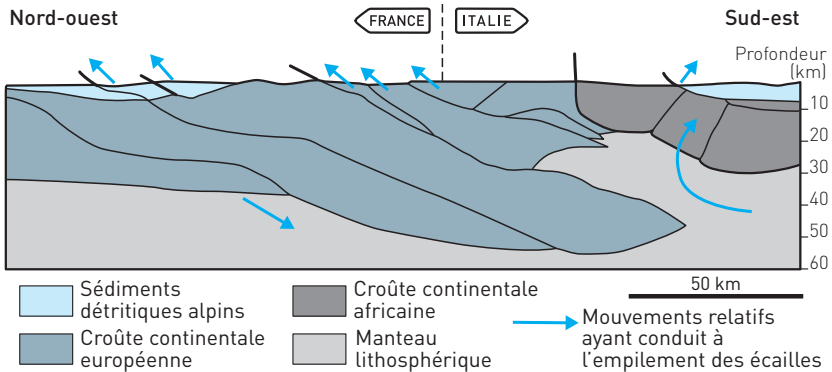
En surface, des marqueurs tectoniques témoignent du raccourcissement et de l'épaississement de la lithosphère continentale sous l'effet des contraintes compressives (**doc. 2**) :

- **plis et failles inverses** ;
- grands **chevauchements** qui superposent des terrains anciens à des terrains plus récents, terrains initialement éloignés. Les terrains charriés sur des dizaines de kilomètres sont appelés « **nappes de charriage** ».

Les reliefs élevés sont l'expression en surface d'un **épaississement important de la lithosphère continentale en profondeur**. En effet, à 40 km de profondeur, dans les régions montagneuses, les études sismiques montrent qu'on trouve de la croûte continentale et non du manteau lithosphérique. Cette croûte constitue une **racine crustale**.

**Doc 2 Structures tectoniques visibles dans les chaînes de montagnes**

La racine crustale est constituée par un empilement d'écailles tectoniques. Sur le document 3, les flèches indiquent les mouvements relatifs : on voit que la lithosphère européenne est passée sous la lithosphère italienne (africaine).

**Doc 3 Les écailles tectoniques de la racine crustale alpine****II ISOSTASIE ET TOPOGRAPHIE****1. Principe**

■ Pour la lithosphère, rigide, l'asthénosphère, solide mais **plastique**, se comporte comme un fluide visqueux : l'asthénosphère ne fait que partiellement obstacle à la gravité et se déforme en fluant (se déplaçant) sous le poids de la lithosphère.

■ La **lithosphère, moins dense que l'asthénosphère**, est soumise à une poussée équivalente à la **poussée d'Archimède** (poussée de l'eau) sur un iceberg.

■ La lithosphère est en équilibre « **isostatique** » lorsque poussée et force de gravité sont égales.

À densités égales, les hauteurs « émergée et immergée » à l'équilibre dans l'asthénosphère sont toujours dans les mêmes proportions. En conséquence, la hauteur émergée est d'autant plus grande que le volume du corps est important.

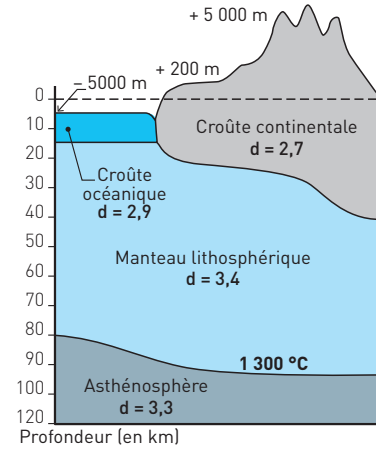
**EXEMPLE :** Un iceberg a toujours  $\frac{1}{10}$  de

son volume émergé et  $\frac{9}{10}$  immergés.

(Pour  $1 \text{ m}^3$  émergé,  $9 \text{ m}^3$  sont immergés ; pour  $10 \text{ m}^3$  émergés,  $90 \text{ m}^3$  sont immergés...)

■ La lithosphère océanique, **plus dense** que la lithosphère continentale, **s'enfonce plus profondément** dans l'asthénosphère, ce qui explique qu'elle soit située **sous le niveau des mers** ( $-5 \text{ km}$  en moyenne).

#### Doc 4 Isostasie et altitude de la lithosphère continentale



## 2. Réajustements isostatiques et mouvements verticaux de la lithosphère

Tout ce qui affecte la lithosphère, son épaisseur, sa densité, perturbe l'équilibre isostatique et entraîne des mouvements verticaux visant à le rétablir.

■ **En domaine continental.** Les modifications (charge/décharge) qui affectent la lithosphère continentale par tectonique, érosion, glaciation, ou fonte des glaces, sont compensées par des mouvements de subsidence (vers le bas) ou de surrection (vers le haut) qui traduisent les déplacements en profondeur des roches asthénosphériques, plastiques.

L'asthénosphère est extrêmement visqueuse et se déplace très lentement (quelques cm/an). Les réajustements isostatiques nécessitent des temps très longs.

– Les mouvements tectoniques qui forment les chaînes de montagnes sont équilibrés isostatiquement de manière continue du fait de leur lenteur : au fur et à mesure qu'elle s'épaissit, la lithosphère continentale s'enfonce dans l'asthénosphère.

– En revanche, des modifications plus rapides comme la fonte des glaces ou l'érosion prennent quelques dizaines de milliers d'années avant que la lithosphère déchargée ne retrouve un équilibre isostatique.

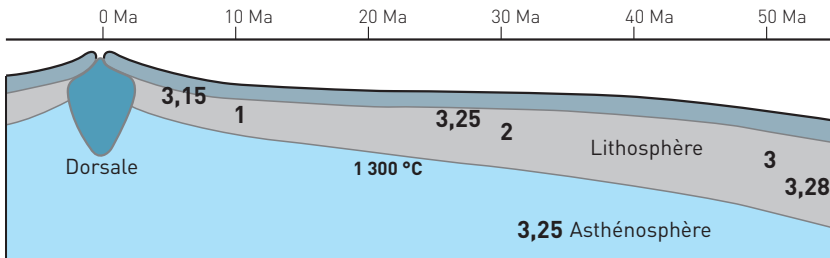
#### EXEMPLES

• La Scandinavie (Norvège + Suède) se rééquilibre par un lent soulèvement de  $1 \text{ cm/an}$  depuis la fonte des glaces il y a  $10\,000$  ans (voir l'exercice 6).

• Les chaînes de montagnes jeunes subissent une érosion de l'ordre de 200 m/Ma. L'équilibre créé suite à la formation d'une racine est rompu par l'érosion qui enlève du poids. Il s'ensuit un réajustement isostatique progressif qui **entraîne une remontée progressive de la racine**, ce qui explique l'affleurement des roches formées à plusieurs km de profondeur (granites et gneiss).

■ **En domaine océanique.** En s'éloignant de la dorsale, la lithosphère océanique se refroidit, s'épaissit et devient plus dense. **Le fond de l'océan s'abaisse** suivant les lois de l'isostasie (2,5 km de profondeur à la dorsale contre 5 km à 2 000 km). L'**équilibre isostatique** est détruit dès que la lithosphère océanique dépasse 50 Ma (la force de gravité l'emporte). Au niveau des marges actives, la lithosphère océanique trop dense s'enfonce dans l'asthénosphère (elle « coule »).

### Doc 5 Rupture de l'équilibre isostatique entre la lithosphère et l'asthénosphère



#### L'essentiel

La lithosphère, peu dense et rigide flotte sur l'asthénosphère, plus dense et plastique. La lithosphère continentale, plus épaisse et moins dense que la lithosphère océanique émerge plus haut que cette dernière, ce qui explique leurs différences d'altitude.

L'état d'équilibre isostatique varie en fonction des modifications subies par la lithosphère, ce qui se traduit par des réajustements isostatiques.

## III LA DATATION DES ROCHES PAR LA MÉTHODE AU RUBIDIUM/STRONTIUM

### 1. Principe

■ La datation absolue repose sur la présence d'éléments radioactifs piégés dans les roches au moment de leur formation (par exemple dans les micas et feldspaths). Les éléments radioactifs instables dits « pères » se désintègrent au cours du temps en éléments plus stables dits « fils ». Le  $^{87}\text{Rb}$  est **radioactif** : son noyau se désintègre en un noyau plus stable, le  $^{87}\text{Sr}$ . Un élément radioactif (père) est caractérisé par sa **constante de désintégration**  $\lambda$  qui est la probabilité de désintégration d'un noyau par unité de temps. Pour le  $^{87}\text{Rb}$ ,  $\lambda = 1,42 \times 10^{-11} \times \text{an}^{-1}$ .

■ On mesure les quantités d'éléments pères et fils actuelles, ce qui permet d'évaluer le **temps de dégradation** de l'élément père depuis la formation de la roche, donc d'évaluer son âge.

■ La date obtenue pour un minéral correspond au moment où il a cristallisé : les éléments ne se déplacent plus, ce qui fixe leur nombre initial. Elle n'est valable que si le **système reste clos** (tous les éléments fils qui se forment proviennent des éléments pères présents initialement dans le système).

## 2. Particularités de la méthode « rubidium-strontium »

La désintégration du  $^{87}\text{Rb}$  donne naissance à un isotope du strontium, le  $^{87}\text{Sr}$ . Mais au moment de la formation, la roche possède une petite quantité de  $^{87}\text{Sr}$  inconnue. Tout le  $^{87}\text{Sr}$  d'un échantillon ne provient donc pas du  $^{87}\text{Rb}$  piégé lors de sa formation. La méthode de datation (**méthode des « isochrones »**) est expliquée en « Savoir-faire ».

### L'essentiel

La datation des roches repose sur la mesure des éléments pères et fils d'isotopes radioactifs naturels à durée de vie longue ( $\lambda$  faible) comme le  $^{87}\text{Rb}$  dans des systèmes clos. La méthode au  $^{87}\text{Rb}$  permet de dater des granites et donne des âges compris entre 0 et 4 milliards d'années.

## SAVOIR-FAIRE

### Vocabulaire

■ **Gabbro** : Roche plutonique de la croûte océanique à **structure grenue**, caractérisée par l'association minérale : pyroxène, plagioclase (+ olivine).

■ **Basalte** : Roche volcanique présente dans la lithosphère océanique en intrusion dans le gabbro ou en coussins au-dessus. Elle peut être formée en domaine continental également.

■ **Granite** : Roche grenue de la croûte continentale, à cristaux de quartz, micas et feldspaths.

■ **Gneiss** : Roche métamorphique d'aspect rubané caractérisée par une foliation (lits clairs de quartz et feldspaths alternants avec des lits sombres de micas).

■ **Isostasie** : État d'équilibre atteint lorsque les forces de gravité et de poussée exercées sur des matériaux peu denses par des matériaux plus denses et plastiques, sont égales.



■ **Nappe de charriage** : Ensemble des terrains charriés sur des dizaines de km, le long d'un grand ensemble de failles inverses horizontales (le « front de chevauchement »).

### Compétences

1. **Savoir utiliser la méthode des isochrones appliquée au couple**  $\frac{^{87}\text{Rb}}{^{87}\text{Sr}}$

■ **Objectifs** :

– savoir construire une courbe isochrone à partir d'un tableau de mesures des rapports  $\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}$  (abscisse) et  $\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$  (ordonnée) ;

– savoir déterminer la pente de la droite obtenue graphiquement :

$$a = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)}$$

■ **Comprendre la méthode de datation pour pouvoir l'utiliser**

À partir de la loi de désintégration, on a établi mathématiquement la relation :

$$^{87}\text{Sr}(\text{actuel}) = ^{87}\text{Sr}(0) + ^{87}\text{Rb}(\text{actuel}) \times (e^{\lambda t} - 1)$$

où  $^{87}\text{Sr}$  est la quantité d'élément fils mesurée dans l'échantillon,  $^{87}\text{Sr}(0)$ , la quantité initiale de cet élément dans le système au moment de sa formation,  $^{87}\text{Rb}$ , la quantité d'élément père mesurée restante dans l'échantillon, et  $t$  la durée de la désintégration.

On ne connaît pas la quantité de  $^{87}\text{Sr}$  initiale :  $^{87}\text{Sr}(0)$  mais on sait que les isotopes d'un même élément, ici les isotopes du Sr, gardent un **rapport constant** dans les minéraux lors de leur formation à partir d'un **même magma**. Ainsi, le rapport  $\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_0$  était **identique dans tous les minéraux**

**de la roche** lors de sa formation, c'est une **constante**.

$$\frac{^{87}\text{Sr}(\text{actuel})}{^{86}\text{Sr}(\text{actuel})} = \frac{^{87}\text{Sr}(0)}{^{86}\text{Sr}(\text{actuel})} + \left(\frac{^{87}\text{Rb}(\text{actuel})}{^{86}\text{Sr}(\text{actuel})}\right) \times (e^{\lambda t} - 1)$$

Mesuré

Constante

Mesuré

Ce qu'on cherche

L'équation est donc celle d'une droite ( $y = b + ax$ ), où  $b$  correspond au rap-

port  $\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_0$  et où  $a$  correspond à  $e^{\lambda t} - 1$ .

On effectue des mesures sur plusieurs minéraux de la roche, dits « **isochrones** » car formés en même temps, et on détermine graphiquement la pente  $(e^{\lambda t} - 1) \approx \lambda t$ . Chaque point correspond aux mesures  $\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)$  et  $\left(\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}\right)$  sur un minéral (échantillon) de la roche.

**EXEMPLE :** Granite de Château Ponsac

$\lambda$  = constante radioactive

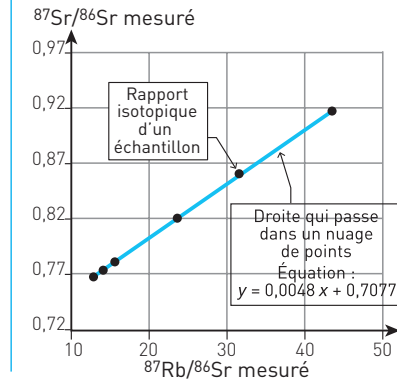
$$= 1,42 \times 10^{-11}$$

$a = 0,048$

$$t = \frac{0,048}{(1,42 \times 10^{-11})}$$

$t = 338 \times 10^6$  ans

### Doc 6 Droite isochrone établie pour le granite de Château Ponsac



## 2. Être capable d'identifier des structures tectoniques sur une photo, une carte ou un schéma (plis, failles, chevauchements)

Lorsqu'on observe **des terrains d'âge plus ancien sur des terrains plus récents**, cela implique un **chevauchement** des terrains les plus vieux sur les plus récents. Les deux unités sont donc séparées par une faille inverse.

## Repères

**1. Connaître** les roches principales des croûtes océanique et continentale :

- gabbro et basalte pour la croûte océanique ;
- granites et gneiss pour la croûte continentale.

**2. Maîtriser** la notion de **rééquilibrage isostatique** qui implique une **remontée ou une descente de la limite lithosphère/asthénosphère** et explique l'affleurement de roches de profondeur (gneiss et granites) après érosion.

## EXERCICES D'APPLICATION

**1** CARACTÉRISTIQUES DES ROCHES CRUSTALES | ★ | 15 min | ► P. 154

**Vrai ou faux ? Indiquez les réponses exactes ; corrigez les autres.**

**1.** La composition de la croûte océanique est granitique, celle de la croûte continentale est basaltique. **2.** Les manteaux des lithosphères continentale et océanique sont constitués de la même roche. **3.** L'âge des roches de la croûte océanique ne dépasse pas 200 Ma. **4.** La croûte continentale a une épaisseur moyenne de 30 km. **5.** La croûte océanique peut atteindre 70 km d'épaisseur. **6.** La lithosphère océanique peut atteindre 70 km d'épaisseur. **7.** La lithosphère continentale peut atteindre 150 km d'épaisseur. **8.** La croûte continentale peut atteindre 70 km d'épaisseur. **9.** Les plus vieilles roches de la croûte continentale ont 4 milliards d'années. **10.** Les roches sédimentaires (calcaire, argiles) sont prépondérantes dans la croûte continentale. **11.** Le relief moyen de la croûte continentale est situé autour de 300 m alors que celui de la croûte océanique est situé autour de - 5 000 m. **12.** Les différences d'altitude des lithosphères océanique et continentale traduisent des différences de densité des roches qui les constituent.

**2** VOCABULAIRE RELATIF  
À LA LITHOSPHERE CONTINENTALE | ★★ | 15 min | ► P. 154

**Remplissez la grille (doc. 7) avec les termes correspondant aux définitions.**

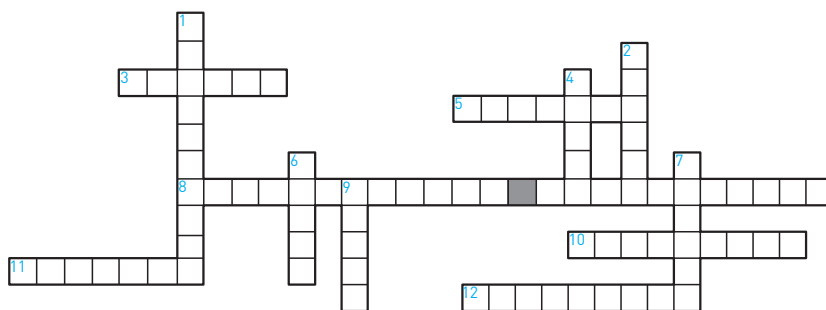
**Horizontalement**

**3.** Minéral caractéristique de la croûte continentale, de formule  $\text{SiO}_2$ . **5.** Roche plutonique qui affleure dans les racines érodées des chaînes anciennes (Massif central/Massif armoricain...). **8.** Terme qui qualifie les mouvements verticaux de la lithosphère en cas de déséquilibre isostatique (en deux mots). **10.** Nom donné au principe qui rend compte de la flottabilité des icebergs dans l'eau. **11.** Force qui s'oppose à la poussée d'Archimède. **12.** Dans la méthode de mesure au Rb/Sr, ce terme qualifie la droite formée à partir des mesures sur les minéraux formés à la même période.

**Verticalement**

**1.** Propriété de l'asthénosphère qui se traduit par son fluage. **2.** Roche métamorphique à l'aspect rubané prépondérante dans la croûte continentale. **4.** Minéraux présents dans le granite et le gneiss qui ont la forme de paillettes et prennent des couleurs vives lorsqu'ils sont observés au microscope polarisé. **6.** À partir d'une droite isochrone, en calculant cet élément, on peut en déduire l'âge de la roche. **7.** Structure formée par l'empilement d'écaillés tectoniques crustales. **9.** Ensemble des roches granitiques et métamorphiques anciennes qui constituent la majorité de la croûte continentale.

## Doc 7 Grille à compléter



## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

## 3 COMPRENDRE LA SIGNIFICATION D'UNE COURBE ISOCHRONE

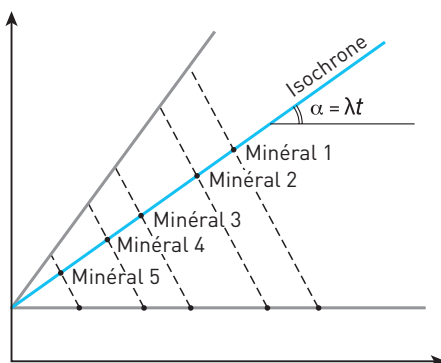
★★ 20 min ► P. 154

1. On mesure l'âge  $t_1$  d'un granite (par exemple) par la méthode Rb/Sr. Placez les légendes appropriées sur les axes du graphique (**doc. 8**).

Se souvenir qu'il y a une seule constante, indépendante du temps et des quantités initiales de chaque élément :  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ , c'est l'ordonnée à l'origine.

2. On imagine les droites qu'on aurait tracées si le granite avait été plus vieux (temps  $t_2$ ) ou s'il venait de se former (temps  $t_0$ ). Placez les légendes correspondantes sur les droites du graphique.

## Doc 8 Diagramme isochrone à compléter



Légendes à placer :

Temps  $t_0$ Temps  $t_1$ Temps  $t_2$  ( $t_2 > t_1$ ) $\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$  mesuré $\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}$  mesuré $\frac{^{87}\text{Sr}_0}{^{86}\text{Sr}}$

3. Identifiez les réponses exactes.

- Au temps  $t_0$ , les minéraux avaient tous le même rapport  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ .
- Au temps  $t_0$ , les minéraux avaient tous le même rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .
- Au temps  $t_1$ , le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans chaque minéral a augmenté par rapport au rapport initial.
- Au temps  $t_2$ , la pente de la droite isochrone a augmenté car les atomes de  $^{87}\text{Rb}$  se sont désintégrés et leur nombre a diminué dans les minéraux.
- Plus les minéraux avaient initialement de  $^{87}\text{Rb}$  (ex : minéral 1), plus leur rapport  $\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$  a augmenté rapidement au cours du temps.

#### 4 FRÉQUENCE DES ALTITUDES SUR TERRE

★★ 20 min ▶ P. 155

À l'aide du document, décrivez la répartition des altitudes terrestres et expliquez-les à partir de vos connaissances sur les lithosphères et l'isostasie.

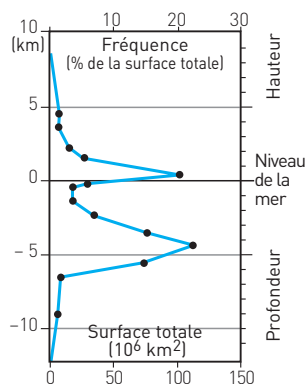
**Lecture du document.** Chaque point de la courbe correspond au pourcentage de la croûte situé à l'altitude indiquée en ordonnée.

**Analyse.** Découper le graphe en deux ensembles.

**Interprétation.** Lier les observations à vos connaissances.

Repère de savoir. Lithosphère océanique, lithosphère continentale, densité et isostasie.

#### Doc 9 Répartition des altitudes de la surface terrestre totale

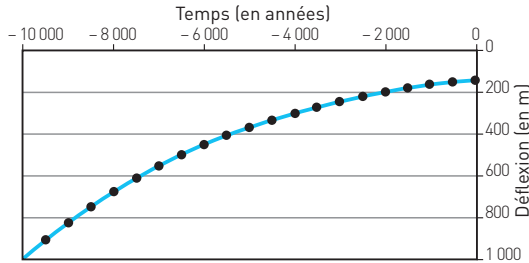


#### 5 LE BOUCLIER SCANDINAVE

★★★ 30 min ▶ P. 155

Les indices géologiques trouvés en Scandinavie (Norvège et Suède) indiquent qu'il y a 20 000 ans elle était recouverte de glaces. Un réchauffement climatique a provoqué une déglaciation entre - 15 000 ans et - 10 000 ans. On constate aujourd'hui que des plages datées de 12 000 ans se trouvent à 400 m d'altitude, et on note une augmentation depuis 10 000 ans du niveau marin global.

### Doc 10 Déflexion de la croûte au niveau de la Scandinavie au cours des derniers milliers d'années



Une déflexion est le déplacement obtenu en un point d'un corps sous l'effet d'une charge. Elle s'exprime par rapport à la position de ce même corps au repos : la croûte scandinave avait au « repos », c'est-à-dire avant d'avoir subi le poids de la glaciation, une déflexion de 0 ; depuis elle revient vers cet état.

Identifiez dans le texte un paradoxe (une contradiction), puis utilisez le document pour proposer une explication.

Le **paradoxe** : plages anciennes et variations du niveau marin...

**Analyse.** Découper. Identifier (même si ce n'est pas net) trois phases dans l'évolution chronologique de la déflexion.

**Interprétation.** Utiliser le principe d'Archimède pour expliquer la déflexion, et la fonte des glaces pour expliquer l'évolution du niveau des océans.

**Principe d'Archimède** : « Tout corps plongé en tout ou en partie dans un fluide au repos, reçoit une poussée qui s'exerce de bas en haut, égale au poids du volume de fluide déplacé. ».

## 6 ÉPAISSISSEMENT ET RACCOURCISSEMENT DANS LES ALPES

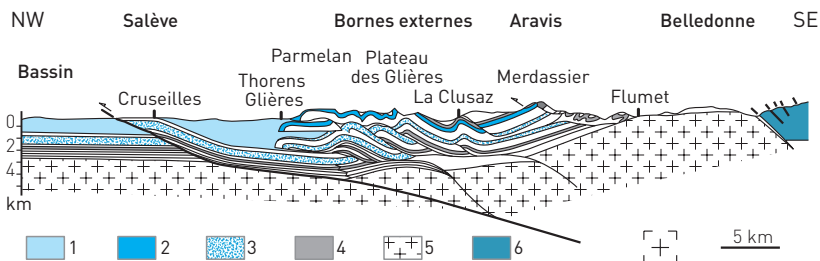
★★ 30 min ► P. 156

À partir des informations extraites du document 11, décrivez les déformations subies par la croûte d'une chaîne de montagnes.

Appuyez-vous sur vos connaissances pour rechercher et identifier différentes déformations visibles sur cette coupe : plis, failles, pli-failles, chevauchements ou nappes de charriage (voir Savoir-faire, **Compétence 2**). Il ne s'agit pas d'être exhaustif mais de repérer les principales déformations dans cette région.

**Doc 11 Coupe dans les Alpes du Salève au massif de Belledonne**

1. Sédiments du Tertiaire, de – 65 Ma à aujourd'hui
2. Calcaires de l'Urgonien, de – 130 à – 112 Ma
3. Calcaires du Tithonien, de – 150 à – 145 Ma
4. Calcaires du Jurassique moyen, de – 175 à – 150 Ma
5. Socle hercynien (rameau externe de Belledonne), de – 400 à – 245 Ma
6. Socle hercynien (rameau interne de Belledonne), de – 400 à – 245 Ma

**7 DATATION D'UN GRANITE**

★★ 20 min ▶ p. 156

Un spectromètre de masse a mesuré dans les minéraux d'un granite les nombres d'atomes ( $N$ ) de  $^{87}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$  et  $^{87}\text{Rb}$ . Les résultats sont exprimés sous la forme d'un rapport isotopique. Le taux de strontium actuel correspond à :

$$\left(\frac{N^{87}\text{Sr}}{N^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{mesuré}} = (e^{\lambda t} - 1) \left(\frac{N^{87}\text{Rb}}{N^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{mesuré}} + \left(\frac{N^{87}\text{Sr}}{N^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{initial}}$$

Avec la constante de désintégration  $\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11}$

Cette équation est celle d'une droite ( $y = ax + b$ ), avec  $t = \frac{\ln(a + 1)}{\lambda}$ .

La méthode des isochrones est utilisée pour déterminer l'âge du granite (doc. 12).

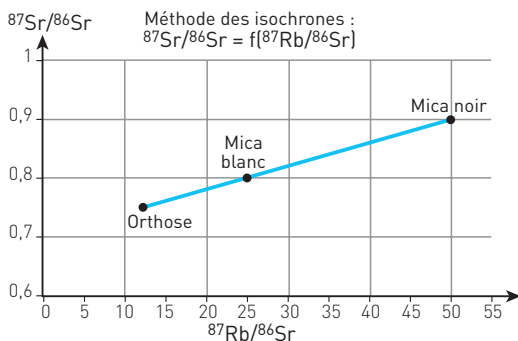
**Doc 12 Méthode des isochrones**

Table de valeurs de la fonction $t = \frac{\ln(a+1)}{\lambda}$					
Coefficient directeur de l'isochrone <b>a</b>	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005
Âge du granite <b>t</b> (millions d'années)	70,4	141	211	281	351
Coefficient directeur de l'isochrone <b>a</b>	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01
Âge du granite <b>t</b> (millions d'années)	421	491	561	631	701

1. Montrez que les trois minéraux proviennent bien d'un même magma.
2. Déterminez l'âge absolu de ce granite.

Voir **Savoir-faire, Compétence 1.**

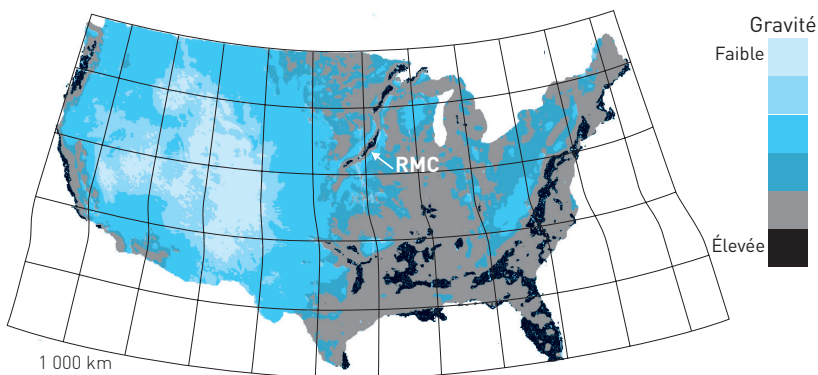
## EXERCICE D'APPROFONDISSEMENT

### 8 ISOSTASIE ET GRAVIMÉTRIE

★★★ 40 min ▶ P. 157

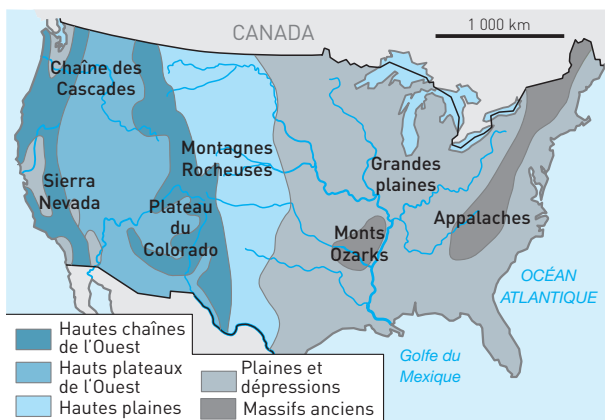
Les géologues utilisent des gravimètres, constitués d'un poids suspendu à un ressort, pour mesurer la force de gravité à certains endroits de la surface terrestre. Une **anomalie gravimétrique** se produit là où la valeur de la gravité ne correspond pas à la valeur attendue calculée. Une anomalie positive indique que la force gravitationnelle est plus forte que ce qu'on attendait, une anomalie négative, qu'elle est plus faible. On rappelle que la force de gravité est d'autant plus importante que la masse du corps sur lequel elle s'exerce est élevée. Ainsi une anomalie positive indique la présence en profondeur de roches ayant une masse volumique (donc une densité) élevée, alors qu'une anomalie négative indique la présence en profondeur de roches ayant une masse volumique moins élevée que la moyenne des roches habituellement trouvées à cette profondeur.

#### Doc 13a Carte des anomalies gravimétriques des USA





## Doc 13b Carte simplifiée du relief des USA



**I.** Faites correspondre chaque proposition de la **liste A** à une ou plusieurs propositions de la **liste B**.

**Liste A**

1. Zone de gravité élevée à l'est
2. Zone de gravité élevée en bordure ouest du continent
3. Zone de gravité faible à l'ouest
4. Rift médio-continentale (RMC), gravité élevée
5. Zone de gravité normale à l'est

**Liste B**

- a. Zone montagneuse qui contient un excédent de roches peu denses (granitoïdes, sédiments continentaux).
- b. Zone dans laquelle le Moho est situé plus bas que sa profondeur moyenne.
- c. Zone d'anciennes montagnes érodées.
- d. Zone qui contient des roches du socle formées à quelques km de profondeur, remontées en surface par rééquilibrage isostatique après érosion.
- e. Zone qui contient des roches plus denses que la densité moyenne des roches des continents.
- f. Zone volcanique, riche en basalte.
- g. Zone continentale proche de la fosse de subduction océan/continent nord-américaine.
- h. Grandes Plaines et lacs.
- i. Appalaches.
- j. Montagnes Rocheuses.
- k. Zones de marges passives, où la lithosphère amincie, subside.

**II.** Expliquez les anomalies gravimétriques au niveau de la marge active au nord-ouest.

**III.** Expliquez les anomalies gravimétriques au niveau des hauts plateaux et des montagnes Rocheuses. Votre réponse fera intervenir la notion d'isostasie.

## CONTRÔLE

### 9 ÉVOLUTION DE LA LITHOSPHERE OCÉANIQUE ET TOPOGRAPHIE DU FOND OCÉANIQUE

★★ | 30 min | ► P. 157

**Doc 14 Propriétés de quelques enveloppes terrestres en fonction de la distance à l'axe de la dorsale**

Distance à l'axe de la dorsale (km)	160	800	2 000	4 800	8 000
Âge de la lithosphère océanique ( $\times 10^6$ ans)	2	10	25	60	100
Flux thermique ( $10^{-2} \text{ W.m}^{-2}$ ) $1 \text{ W} = 1 \text{ J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	20	11	7	5	5
Épaisseur de la croûte océanique*	5	5	5	5	5
Épaisseur du manteau lithosphérique océanique	8	24	41	66	87
Masse volumique de la lithosphère océanique ( $10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ )	3,127	3,222	3,25	3,268	3,275
Masse volumique de l'asthénosphère ( $10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ )	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25

\* Les sédiments ne sont pas pris en compte dans le calcul de l'épaisseur.

Informations complémentaires :

- Flux thermique = quantité de chaleur dégagée par unité de temps pour  $1 \text{ m}^2$  de surface terrestre
- Masse volumique de la croûte =  $2,85 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
- Masse volumique du manteau lithosphérique =  $3,3 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Sélectionnez les informations données dans le **document 14** et aidez-vous de vos connaissances pour réaliser un schéma de l'évolution de la lithosphère océanique depuis l'axe de la dorsale jusqu'à l'une de ses marges continentales.

### 10 STRUCTURES VISIBLES DANS UNE CHAÎNE DE MONTAGNES

★★ | 20 min | ► P. 158

**I. Vrai ou faux ?** Indiquez les propositions exactes, corrigez celles qui sont fausses.

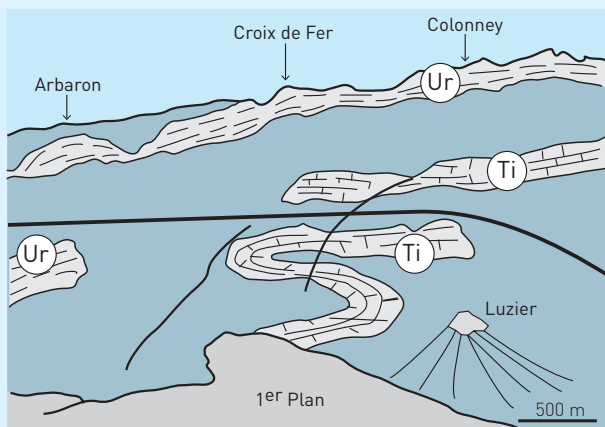
1. Les calcaires sont des roches sédimentaires qui se mettent en place dans des bassins lacustres ou marins.
2. Initialement les couches plissées étaient horizontales : leur plissement résulte d'une tectonique en compression.

3. À la verticale de la Croix de Fer et au voisinage on trouve une série sédimentaire non déformée, contenant notamment à sa base des terrains du Tithonien, et à son sommet de l'Urgonien.
4. Les deux types de déformations visibles sur cet affleurement se retrouvent sur l'ensemble de la chaîne et sont responsables d'un raccourcissement et d'un épaissement des séries sédimentaires.
5. La série sédimentaire supérieure est une nappe de charriage.
6. Le chevauchement en entraînant la superposition anormale des deux ensembles sédimentaires est à l'origine d'un raccourcissement et d'un épaissement.
7. On observe un pli couché au niveau de certains calcaires d'âge urgonien.
8. Les terrains chevauchés et chevauchants étaient initialement juxtaposés.
9. La série sédimentaire supérieure s'est formée en se déposant par-dessus les terrains plissés.
10. Un mouvement tectonique a conduit la série sédimentaire supérieure à recouvrir les terrains sur lesquels elle repose.
11. Il y a un contact anormal entre le pli en S d'âge Tithonien et les terrains du même âge situés au-dessus.

#### Doc 15 Le massif de Platé dans les Alpes

Ur : Calcaire massif de l'Urgonien (– 130 à – 110 Ma)

Ti : Calcaires du Tithonien (– 150 à – 145 Ma)

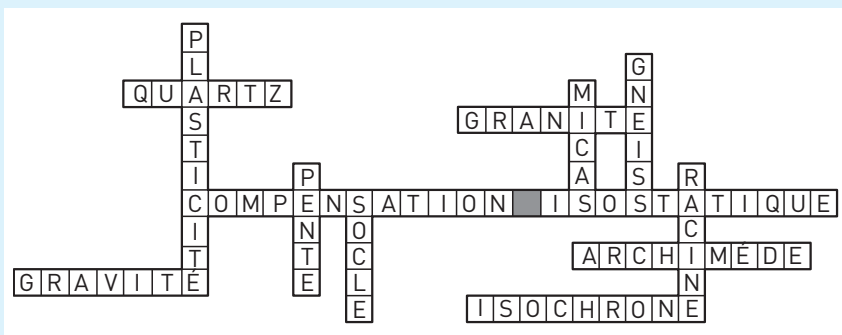


II. Sélectionnez et ordonnez les propositions précédentes de manière à répondre à la question suivante : « À partir des informations extraites du document 15, identifiez les déformations visibles subies par la couverture sédimentaire et précisez-en les conséquences sur cette couverture. »

## CORRIGÉS

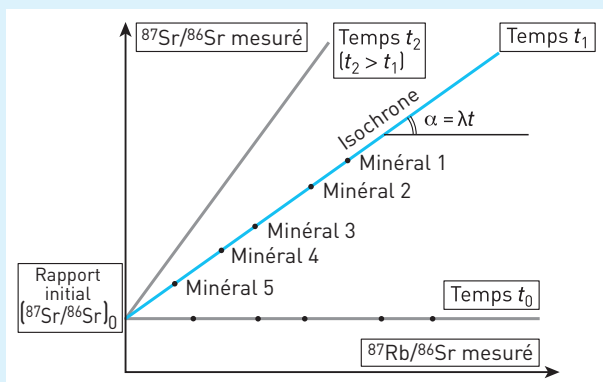
**1** 1. Faux : la croûte océanique est de composition basaltique, la croûte continentale est de composition granitique. 2. Vrai. 3. Vrai. 4. Vrai. 5. Faux : la lithosphère océanique peut atteindre 70 km d'épaisseur mais la croûte océanique ne dépasse pas 10 km d'épaisseur. 6. Vrai. 7. Vrai. 8. Vrai. 9. Vrai. 10. Faux : elles représentent moins de 5 %, soit une mince pellicule de roches à la surface du socle granitique et métamorphique. 11. Vrai. 12. Vrai.

**2** Doc 16 Grille complétée



**3** 1. et 2. Voir le document 17.

**Doc 17** Diagramme isochrone légendé



**3. a.** Faux. **b.** Vrai. **c.** Vrai car une partie du  $^{87}\text{Rb}$  s'est désintégrée en  $^{87}\text{Sr}$ . **d.** Vrai. **e.** Vrai.

**4** Analyse

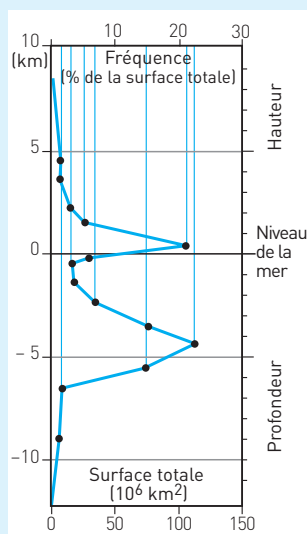
On observe deux pics d'altitude de la surface terrestre : 20 % de la croûte terrestre se trouve à une altitude de 200 m et 20 % se trouve à une profondeur de 5 km.

**Interprétation**

Les deux pics d'altitude les plus fréquentes de la croûte terrestre (200 m et - 5 km) traduisent des différences dans la nature de la croûte.

Une partie est majoritairement **émergée**, c'est la **croûte continentale**, une autre partie est **immergée**, qui correspond à la **croûte océanique**.

La lithosphère océanique **moins épaisse et plus dense** que la lithosphère continentale, s'enfonce plus dans l'**asthénosphère**, suivant les règles de l'**isostasie**, ce qui explique que l'altitude de la croûte océanique est plus basse que l'altitude de la croûte continentale.

**Doc 18** Courbe de répartition des altitudes de la surface terrestre

**5** Le paradoxe : Des plages anciennes datées de - 12 000 ans sont aujourd'hui situées à 400 m d'altitude. Or, depuis 10 000 ans, le niveau des océans augmente. Comment expliquer cette contradiction ?

**Analyse du document 10**

La croûte scandinave s'élève depuis 10 000 ans de quelques cm/an.

- De - 10 000 à - 7 000 ans, la déflexion passe de - 1 000 m à - 500 m, soit 17 cm/an.
- De - 7 000 à - 5 000 ans, la déflexion passe de - 500 à - 300 m, soit 10 cm/an.
- De - 5 000 ans à aujourd'hui, 250 m en 5 000 ans, soit 5 cm/an.

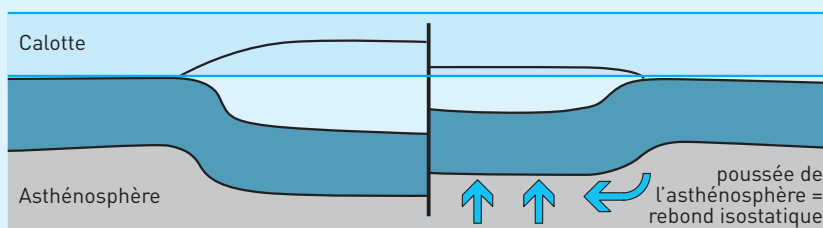
**Interprétation**

D'après le principe d'Archimède, « tout corps plongé en tout ou en partie dans un fluide au repos, reçoit une poussée qui s'exerce de bas en haut, égale au poids du volume de fluide déplacé ».

L'installation d'une **calotte glaciaire** a augmenté le poids du continent qui s'est enfoncé. Ensuite, avec la fonte des glaces, le poids de l'ensemble a fortement diminué : le continent remonte depuis, sous l'effet de la poussée de l'asthénosphère, selon le principe d'Archimède. Cette remontée, rapide au début, devient de plus en plus lente au fur et à mesure que l'**équilibre isostatique** se recrée.

Par ailleurs, suite au **réchauffement climatique**, l'eau libérée par la fonte des glaces (de la Scandinavie et d'autres glaciers) a provoqué une **élévation du niveau des océans**, mais beaucoup moins importante que l'**élévation isostatique** de la croûte continentale.

## Doc 19 Rebond isostatique lié à la fonte des glaces



### 6 Première analyse

- Au nord-ouest de la région, on observe sur le socle une succession de couches sédimentaires d'âge jurassique à crétacé non déformées.
- Au niveau de Saleve, en allant vers le sud-est, on observe que des terrains tithoniques recouvrent les sédiments tertiaires, donc plus jeunes, du bassin.

#### Interprétation

Cela montre l'existence à ce niveau d'un contact anormal qui a provoqué la **superposition** de terrains âgés sur des terrains plus récents, c'est-à-dire un **chevauchement**.

#### Deuxième analyse

- Le document montre que ce contact est le **front d'un grand chevauchement qui affecte l'ensemble de la croûte** (sédiments et socle).
- En allant encore plus vers le sud-est, on arrive au niveau du massif des Bornes externes puis d'Aravis. Ils sont constitués de sédiments d'âge jurassique plissés et découpés en écaillés qui se chevauchent du sud-est vers le nord-ouest. Certains de ces chevauchements affectent également le socle, découpé en unités plus grandes.
- Le massif de Belledonne au sud-est est constitué du socle qui se prolonge sous les sédiments du massif d'Aravis.

#### Interprétation

Ces sédiments devaient autrefois se trouver en position horizontale sur le massif de Belledonne, mais celui-ci semble avoir été soulevé vers le nord-ouest, et ses sédiments poussés, charriés sous la forme des écaillés des massifs d'Aravis et des Bornes, **écaillés qui se chevauchent les unes les autres** jusqu'au bassin sédimentaire.

#### Bilan

Les unités chevauchées et chevauchantes qui constituent les massifs des Bornes et d'Aravis étaient initialement contiguës et non plissées. Le chevauchement, en entraînant leur superposition, a été à l'origine d'un raccourcissement et d'un épaissement de la croûte continentale, tout comme les plissements qui ont affecté les sédiments.

- 7** 1. Les points relatifs aux trois minéraux du granite sont disposés suivant une droite. Ils ont donc le même âge, ce qui signifie qu'ils peuvent provenir de la cristal-

lisation d'un même magma. Cette droite recoupe l'axe des ordonnées à 0,70, ce qui donne le rapport  $\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$  initial dans le magma à l'origine du granite.

2. On détermine graphiquement le coefficient directeur de la droite :

$$a = \frac{(0,90 - 0,70)}{50} = \frac{0,20}{50} = 0,004$$

D'après la table de valeur de la fonction  $t = \frac{\ln(a+1)}{\lambda}$ , l'âge du granite est :

$$t = 281 \text{ Ma.}$$

**8** I. 1. e. 2. e, g, k. 3. a, b, j. 4. e, f, h. 5. c, d, i

II. La bordure ouest américaine est une marge active : la plaque océanique pacifique dense passe sous la plaque américaine, ce qui explique la forte anomalie positive. Du matériel très dense passe en subduction sous la marge.

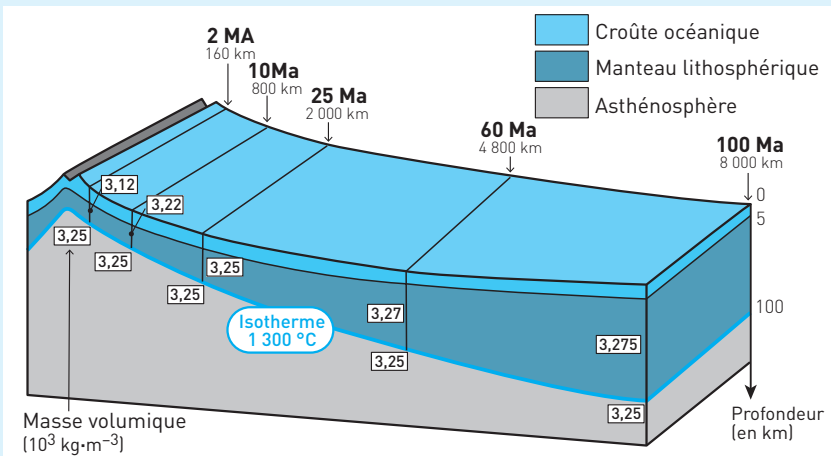
III. Une montagne est formée par déformation des roches crustales qui s'épaississent. Par isostasie, la zone de la plaque épaissie s'enfonce dans l'asthénosphère. Elle présente, par rapport aux roches des régions voisines moins déformées, un excès de roches peu denses, ce qui est à l'origine des anomalies gravimétriques négatives enregistrées.

**9**

Parmi les nombreuses indications de densité, celles nécessaires à la compréhension de l'évolution de la lithosphère océanique sont relatives à la lithosphère dans son ensemble et à l'asthénosphère.

**Interprétation sous forme de schéma**

**Doc 20** Évolution de la lithosphère océanique au cours du temps



## Analyse

En s'éloignant de l'axe de la dorsale :

- l'âge de la lithosphère océanique augmente, elle vieillit ;
- le flux thermique diminue ;
- l'épaisseur de la croûte océanique reste constante ;
- l'épaisseur du manteau lithosphérique augmente ;
- la masse volumique de la lithosphère augmente ;
- la masse volumique de l'asthénosphère reste constante.

**10** I. 1. Vrai. 2. Vrai. 3. Vrai. 4. Vrai. 5. Vrai. 6. Vrai. 7. Faux : On observe un pli couché au niveau de certains calcaires d'âge tithonien. 8. Vrai. 9. Faux : La série supérieure (3) s'est formée à la même période que les terrains plissés, elle a été charriée par-dessus ces terrains plissés. 10. Vrai. 11. Vrai.

II. 1. Les calcaires sont des roches sédimentaires qui se mettent en place dans des bassins lacustres ou marins.

7. On observe un pli couché au niveau de certains calcaires d'âge **tithonien**.

2. Initialement les couches plissées étaient horizontales : leur plissement résulte d'une tectonique en compression.

3. À la verticale de la Croix de Fer et au voisinage, on trouve une série sédimentaire non déformée, contenant notamment à sa base des terrains du Tithonien, et à son sommet de l'Urgonien.

11. Il y a un contact anormal entre le pli en S d'âge tithonien et les terrains du même âge situés au dessus puisqu'il s'agit de la même série sédimentaire doublée.

10. Un mouvement tectonique a conduit la série sédimentaire supérieure à recouvrir les terrains sur lesquels elle repose.

9. La série sédimentaire supérieure **a été charriée par-dessus** les terrains plissés.

5. La série sédimentaire supérieure est une nappe de charriage.

8. Les terrains chevauchés et chevauchants étaient initialement juxtaposés.

6. Le chevauchement en entraînant leur superposition anormale est à l'origine d'un raccourcissement et d'un épaissement.

4. Les deux types de déformations visibles sur cet affleurement se retrouvent sur l'ensemble de la chaîne et sont responsables d'un raccourcissement et d'un épaissement des séries sédimentaires.



## 7

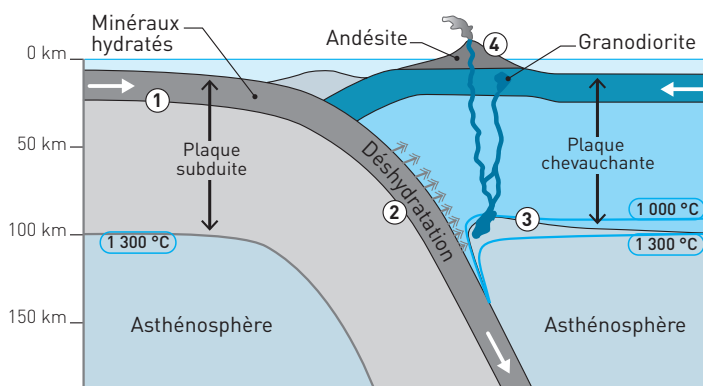
# Formation et recyclage de la croûte continentale

La croûte continentale, comme la croûte océanique, est en permanence formée, partiellement détruite et recyclée.

## I PRODUCTION DE CROÛTE CONTINENTALE DANS LES ZONES DE SUBDUCTION

Les zones de subduction sont des zones de convergence entre deux lithosphères : une lithosphère océanique subducte sous une lithosphère océanique ou continentale. De manière paradoxale, c'est la « mort » de la croûte océanique qui, directement ou non, a donné et donne encore naissance à la croûte continentale au niveau des plaques chevauchantes (**doc. 1**).

### Doc 1 Subduction de la lithosphère océanique et production des granodiorites



### 1. Au niveau de la plaque subduite : production d'eau par métamorphisme

#### ■ De la dorsale à la fosse de subduction (1)

– Après sa formation à l'axe d'une dorsale, la lithosphère océanique fracturée est hydratée par l'eau de mer. Les roches de la lithosphère océanique qui entre en

subduction sont riches en minéraux hydroxylés (présence de groupes « OH<sup>-</sup> » issus des molécules d'eau).

– Lorsque l'épaisseur de la lithosphère océanique dépasse 50 km, à plusieurs milliers de km de l'axe de la dorsale, la densité de la plaque océanique devient supérieure à celle de l'asthénosphère. L'équilibre fragile peut alors être rompu, ce qui provoque son entrée en subduction.

### ■ La subduction de la lithosphère océanique et son métamorphisme (2)

Au cours de sa subduction, la lithosphère océanique est soumise à des pressions de plus en plus importantes, conditions dans lesquelles certains minéraux deviennent instables. Des réactions métamorphiques très lentes se produisent entre ces minéraux, au cours desquelles les minéraux hydroxylés perdent leurs groupes (OH<sup>-</sup>), ce qui libère des molécules d'eau qui **hydratent le manteau** de la plaque chevauchante.

## 2. Au niveau de la plaque chevauchante : fusion partielle des péridotites hydratées

### ■ La genèse du magma (3)

Tous les volcans de subduction sont situés entre 100 et 200 km verticalement au-dessus du plan de Benioff (toit de la lithosphère subduite délimité par les foyers sismiques sous la plaque chevauchante). À cette profondeur, la température est voisine de 1 000 °C. Dans ces conditions la péridotite ne devrait pas fondre. Mais l'eau produite par la plaque subduite abaisse son point de fusion : les éléments chimiques ayant les points de fusion les plus bas fondent. Il s'agit d'une **fusion partielle**.

L'eau provenant de la plaque subduite transforme la péridotite mantellique (située sous la plaque chevauchante), normalement rigide à 1 000 °C, en asthénosphère plastique.

### ■ Du magma aux roches continentales (4)

– Du fait de cette **fusion partielle**, le magma produit a une **composition originale**, différente de celle de la péridotite. Par ailleurs il est riche en eau. Il s'injecte dans les couches sus-jacentes, remonte jusqu'à la croûte où il est stocké.

– Il refroidit et **crystallise de manière fractionnée** : les premiers minéraux formés s'accumulent au fond de la chambre magmatique. La partie restée liquide a une **composition différente de celle du magma d'origine**, plus proche de la composition actuelle de la croûte continentale. Ce **magma secondaire granitique** migre dans les roches sus-jacentes et s'accumule dans un nouveau réservoir.

– Lorsqu’il parvient en surface, le magma donne des volcans constitués notamment d’« **andésite** ». Lorsqu’il cristallise en profondeur, le magma donne des plutons de « **granodiorite** ».

Les **amphiboles, minéraux hydratés**, sont caractéristiques des andésites et granodiorites, ce qui est à relier à la présence de l’eau lors de la formation du magma.

### L’essentiel

L’augmentation de la densité de la lithosphère océanique constitue le moteur de la subduction.

**Plaque subduite.** Lors de la subduction, l’augmentation de la pression provoque un métamorphisme de la lithosphère océanique. Ces réactions libèrent de l’eau.

**Plaque chevauchante.** À 1 000 °C vers 100 km de profondeur et plus, il y a **fusion partielle de la péridotite hydratée** située au contact de la croûte subduite. Le magma formé donne naissance à des **granodiorites**, donc à de la croûte continentale.

## ■ Genèse de la croûte continentale

Entre –4 et –2,5 Ga, le flux de chaleur terrestre était plus important qu’actuellement. La croûte océanique était plus chaude lorsqu’elle entrait en subduction. Hydratée, c’était elle qui fondait et non le manteau sus-jacent. Le magma qui en résultait avait une **composition proche de celles des granites actuels** constitutifs du socle des continents. On estime que 80 % de la croûte continentale s’est formée entre –3,5 et –2,5 Ga.

## II FORMATION DES CHAÎNES DE MONTAGNES ET RECYCLAGE DE LA CROÛTE

### 1. Création des montagnes : orogénèse

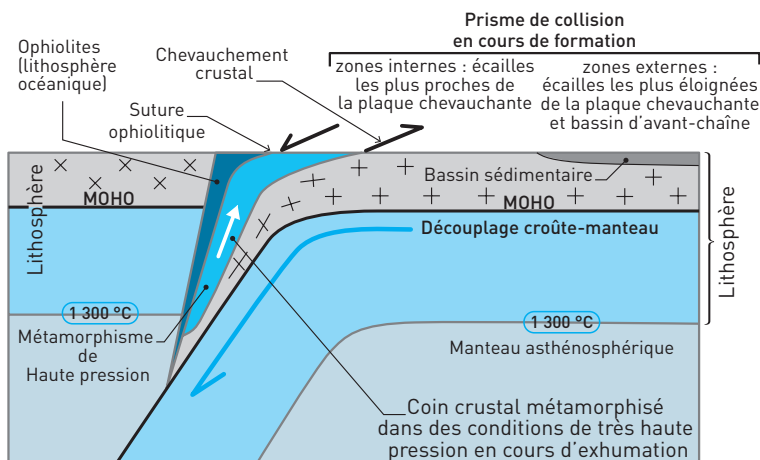
■ En fin de subduction, l’ancien océan qui séparait les **deux lithosphères continentales** a disparu : c’est au tour de la marge continentale amincie (car découpée en blocs basculés) de la plaque subduite de plonger. Cependant, de densité plus faible que la croûte océanique, la croûte continentale ne peut s’enfoncer indéfiniment dans le manteau : alors que le mouvement de convergence se poursuit, **la subduction se bloque**. Une écaille de croûte se désolidarise du socle et remonte au niveau d’un ancien système de failles.

■ Sous cette première écaille continentale, la croûte continentale continue à subduire. Le phénomène se renouvelle : après avoir atteint quelques dizaines de km, la croûte cesse sa subduction, forme une deuxième écaille et remonte. À terme, la croûte apparaît débitée en écailles superposées, ce qui constitue un **prisme de collision** et crée le relief.

■ Parmi les écaïlles qui constituent les prismes de collision, on trouve des **ophiolites** qui sont constituées de basaltes en coussins situés au-dessus de gabbros recouvrant eux-mêmes des péridotites. Ce sont des **vestiges d'une ancienne lithosphère océanique**. Les ophiolites sont associées à d'anciens **sédiments marins**, plissés, faillés, vestiges des prismes sédimentaires formés lors de la subduction.

■ Les plus vieilles écaïlles, ophiolitiques ou continentales, remontées en surface conservent des traces de leur subduction : on y trouve des roches métamorphisées dans des conditions de **haute pression** (deux minéraux caractéristiques : grenat, glaucophane). Cependant certaines ophiolites ont été charriées sur la lithosphère continentale sans avoir subi la subduction ; c'est notamment le cas des ophiolites du Chenaillet, riches en minéraux hydroxylés de basse pression (actinote, chlorite).

### Doc 2 Subduction de la lithosphère continentale et écaillage de la croûte



Ainsi les chaînes de montagnes conservent les traces des diverses étapes qui leur ont donné naissance : subduction d'un ancien océan, subduction d'une marge continentale, formation d'un prisme de collision.

#### L'essentiel

- La convergence entre deux plaques mixtes débute par la **subduction** de la partie océanique et se poursuit par celle de la partie continentale.
- La collision commence avec la subduction d'une marge continentale. Mais la croûte continentale peu dense ne subduit pas indéfiniment. Au-delà de 100 km de profondeur, elle forme des écaïlles qui se désolidarisent du manteau ou du socle et remontent. Les blocages successifs engendrent la formation d'un **prisme de collision**.

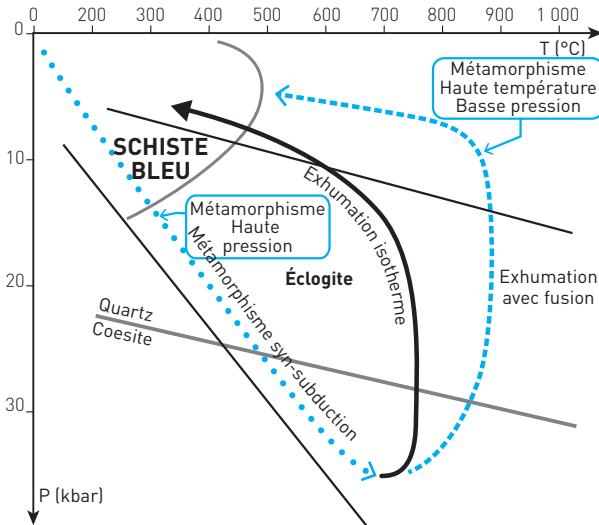
## 2. Recyclage de la croûte continentale

### ■ Recyclage par fusion partielle : migmatites et granites

– Lorsque les écaïlles de croûte continentale en subduction atteignent des **profondeurs élevées**, elles subissent de fortes pressions et contraintes. Elles sont alors transformées en **gneiss**. Associé à de hautes températures, ce métamorphisme conduit parfois à une fusion de la croûte à forte profondeur. Ainsi se forment les **migmatites**, qui sont des gneiss partiellement fondus ainsi que des **granites** qui résultent de la migration des magmas formés.

– Par la suite, lorsque les écaïlles les plus anciennes des racines remontent vers la surface (= exhumation), par tectonique et rééquilibrage isostatique lié à l'érosion, elles sont chauffées par l'accumulation de leurs **éléments radioactifs**. À nouveau métamorphosées, cette fois dans des conditions de **faible profondeur et de températures élevées**, elles se transforment en de nouvelles migmatites et donnent naissance au magma à l'origine des granites les plus récents des chaînes actuelles.

### Doc 3 Évolutions pression-température associées à la subduction continentale et à l'exhumation



→ : trajet des roches continentales au cours des mouvements tectoniques liés à la collision

L'exhumation isotherme est en général associée aux charriages en début de collision, l'exhumation avec fusion, à l'exhumation tardive des roches des racines.

■ **Érosion et altération des roches.** Dès leur formation, les reliefs sont soumis à une **érosion intense** par l'eau et le vent. Cela se traduit par leur fracturation lors des phases de gel, leur rabotage par les glaciers, leur désolidarisation en blocs lors

du dégel. Par son action chimique, l'eau est aussi l'agent de leur **altération**. Les minéraux les plus réactifs (feldspaths) perdent une partie de leurs éléments chimiques et se transforment en minéraux argileux.

■ **Transport et sédimentation des produits de l'altération.** Les matériaux, entraînés par les eaux de ruissellement, rejoignent les rivières puis les fleuves. D'énormes dépôts sédimentaires remplissent les bassins sédimentaires au pied des chaînes. Dans les océans, les **particules plus fines sédimentent, certains ions précipitent** (formation des calcaires).

**EXEMPLE :** Dans l'Himalaya, les vitesses de surrection (élévation isostatique) et d'érosion sont égales. Les dépôts sédimentaires du bassin du Gange forment un cône de 3 000 km de long sur 350 km de large. Leur épaisseur atteint 22 km, c'est le plus important système d'érosion de la planète.

L'ensemble de ces processus provoque un **retour à l'épaisseur normale de la croûte** continentale (30 km). Des anciennes montagnes, il ne reste plus que les roches métamorphiques et granitiques créées et remaniées au cours de l'orogénèse.

#### L'essentiel

La croûte continentale est donc recyclée :

- par **métamorphisme et fusion**, ce qui est à l'origine de nouvelles roches gneissiques et granitiques intégrées dans la croûte ;
- par **érosion, transport et sédimentation**.

## SAVOIR-FAIRE

### Vocabulaire

■ **Métamorphisme :** Recristallisation des roches à l'état solide qui dépend de la pression, de la température et de la nature des fluides en contact avec les minéraux.

■ **Fusion partielle :** Fusion de certains éléments constitutifs des minéraux d'une roche, ayant le point de fusion le plus bas alors que les autres ne fondent pas. Le magma qui en résulte a une composition différente de celle de la roche de départ, il donne naissance à une nouvelle roche.

■ **Cristallisation fractionnée :** Dans un réservoir, les premiers minéraux à cristalliser sont ceux ayant le point de fusion le plus élevé. Par gravité, ils tombent au fond du réservoir. Le magma qui reste est différent chimiquement, il donnera naissance à d'autres minéraux.

■ **Andésite :** Roche volcanique présentant une texture microlitique, de couleur grise. Les andésites sont souvent riches en gros cristaux de feldspaths plagioclases et de minéraux ferromagnésiens (amphiboles, pyroxènes...), noyés dans une pâte.

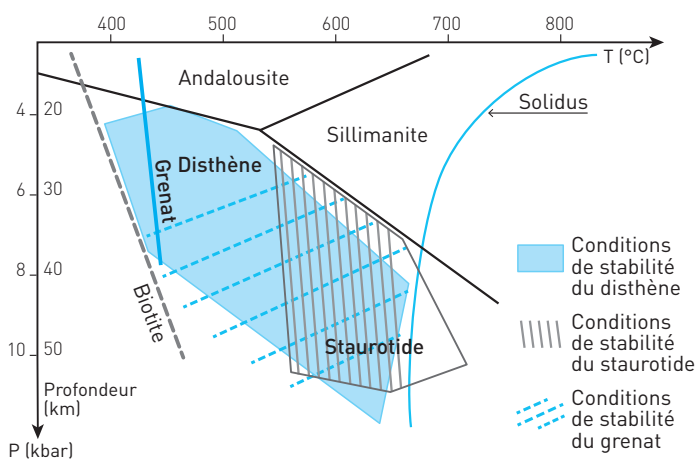
- **Granodiorite** : Roche plutonique grenue proche du granite. Elle est principalement constituée de quartz et de feldspaths, mais contrairement au granite, ceux-ci sont majoritairement des plagioclases. Les minéraux secondaires sont la biotite, l'amphibole et le pyroxène.
- **Recyclage** : Création de nouvelles roches à partir de roches préexistantes (par métamorphisme et fusion).
- **Ophiolite** : Vestiges de lithosphère océanique charriés sur les continents.
- **Prisme de collision** : Structure formée par l'écaillage de la croûte continentale lors de sa subduction incomplète.
- **Altération** : Destruction des reliefs par réaction des minéraux des roches avec l'eau.
- **Érosion** : Destruction des reliefs par action physique de l'eau (gel/dégel) et du vent.
- **Gneiss** : Roche métamorphique foliée formée de quartz, de micas, de feldspaths.

## Compétences

### 1. Retrouver les conditions de formation de minéraux présents dans un échantillon à partir d'un diagramme « pression-température »

**EXEMPLE** : Dans une région on trouve des gneiss à disthène, grenat et staurotide. On se pose la question du contexte dans lequel s'est formée cette roche. Pour cela on repère les domaines de stabilité de ces minéraux à l'aide d'un diagramme « pression-température ».

#### Doc 4 Conditions de stabilité (pression-température) de quelques minéraux déterminées en laboratoire



**Analyse :** On observe que l'association disthène + grenat + staurotite (zone bleu + hachures grises et bleues) est stable entre 30 et 60 km de profondeur environ, pour des températures élevées de 550 à 750 °C.

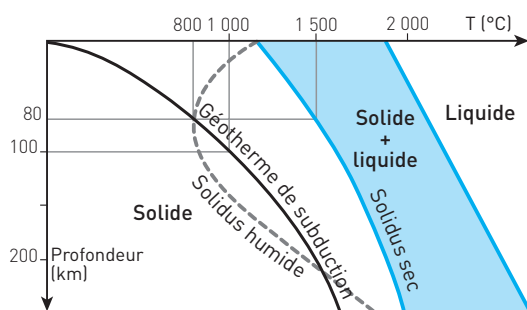
**Interprétation :** Nous pouvons en déduire que la roche s'est trouvée à une profondeur située entre 30 et 60 km et à une température comprise entre 550 et 750 °C. Ces conditions sont typiques des racines des chaînes de montagnes : on peut supposer que ce gneiss s'est formé dans un contexte de collision (enfouissement tectonique d'unités crustales).

## 2. Être capable de dessiner une plaque en subduction sous une autre à partir de données sur les foyers sismiques

Pour cela, il faut bien comprendre que les séismes n'ont lieu que dans la lithosphère : l'asthénosphère étant plastique, elle ne casse pas. La profondeur des foyers permet de suivre le trajet d'une plaque océanique en subduction.

## 3. Savoir expliquer, à partir d'un diagramme présentant les conditions de fusion de la péridotite, la formation des magmas de subduction

### Doc 5 Diagramme P/T et origine du magmatisme sous la plaque chevauchante ; conditions de fusion de la péridotite



**Solidus :** Courbe déterminée en laboratoire qui donne les conditions de **pression** et de **température** au-delà desquelles une roche, ici la péridotite, **commence à fondre**.

**Solidus « humide » :** Idem, mais la roche qui fond est hydratée.

Le **géotherme** est la courbe qui donne l'évolution de la **température en fonction de la profondeur**, déterminée dans différents contextes (ici c'est l'évolution de la température dans la plaque chevauchante qui est étudiée).

**Analyse :** À la profondeur de 80 km, le solidus « sec » se situe à 1 500 °C. La péridotite ne peut pas fondre. En revanche, le solidus « humide » se situe à 800 °C : hydratée, la péridotite peut entamer sa fusion. Cette eau provient du métamorphisme de la plaque plongeante.

**Interprétation :** À partir de 80 km de profondeur et jusqu'à 200 km la péridotite hydratée fond partiellement.

**Conclusion.** On a déterminé que c'est à 100 km, pour une température de 1 000 °C que la majorité de la fusion partielle a lieu (plus en profondeur, la plaque plongeante fournit moins d'eau aux péridotites sus-jacentes).



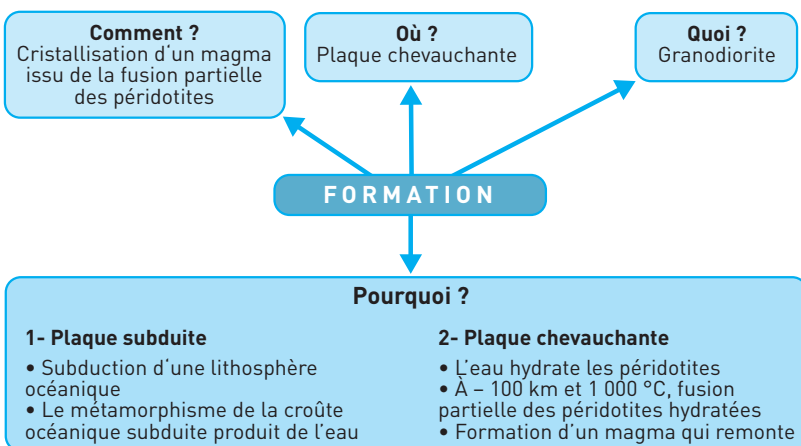
## Repères

## 1. Connaître le schéma bilan de la subduction de la lithosphère océanique (document 1)

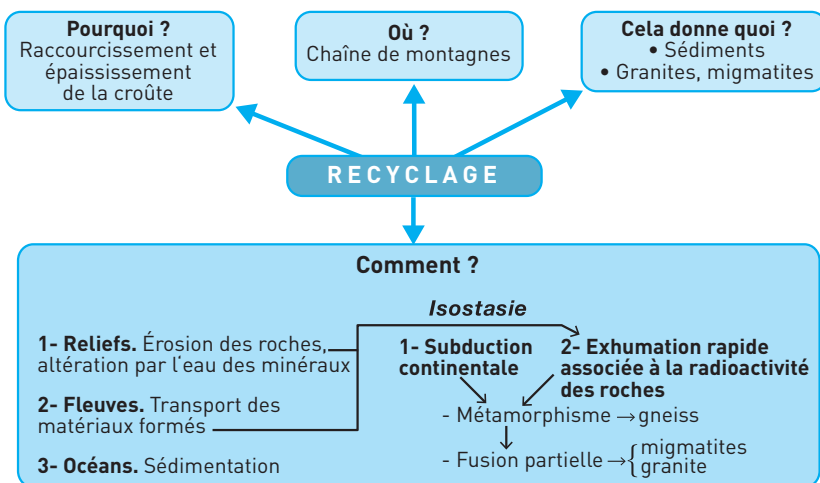
Ce schéma est un repère qu'il faut être capable de redessiner rapidement, qu'il soit demandé ou non lors d'un exercice. Il ne faut pas oublier les légendes des plaques et des profondeurs.

## 2. Connaître les schémas bilans concernant formation et recyclage de la croûte continentale

## Doc 6 Formation de la croûte continentale au niveau des zones de subduction



## Doc 7 Recyclage de la croûte continentale par métamorphisme, érosion et fusion



### 3. Repères chronologiques

Prenons l'exemple des Alpes.

- La subduction de l'océan alpin a eu lieu au cours du Crétacé, elle a duré environ **20 Ma** et a été cause des premiers reliefs érodés.
- La subduction continentale qui a suivi a donc débuté il y a **65 Ma** (âge de la limite Crétacé/Tertiaire), et a également été source permanente de sédiments, repris dans les déformations tectoniques (la moitié des reliefs alpins créés au cours de l'histoire de la chaîne ont été érodés).
- La collision proprement dite (contact des croûtes continentales) a démarré il y a **35 Ma**. La fin de l'exhumation des écailles profondes et les chevauchements d'avant-chaîne datent d'une dizaine de millions d'années. Les reliefs actuels ne datent donc que de **quelques millions d'années**, ils sont plus récents que les roches qui les constituent.

## EXERCICES D'APPLICATION

1 QCM

★ 15 min ▶ P. 182

Indiquez la ou les réponses exactes parmi les propositions suivantes.

1. Ce terme désigne un minéral :

- |               |             |              |                |
|---------------|-------------|--------------|----------------|
| a. Gabbro     | b. Pyroxène | c. Amphibole | d. Granite     |
| e. Péridotite | f. Olivine  | g. Andésite  | h. Plagioclase |
| i. Quartz     |             |              |                |

2. Cette roche est caractéristique de la lithosphère océanique :

- |           |                 |            |               |
|-----------|-----------------|------------|---------------|
| a. Gabbro | b. Granodiorite | c. Basalte | d. Péridotite |
| e. Gneiss |                 |            |               |

3. La subduction est :

- a. dans certains cas, la plongée d'une plaque océanique sous une plaque océanique.
- b. dans certains cas, la plongée d'une plaque continentale sous une plaque océanique.
- c. la plongée d'une plaque océanique dans l'asthénosphère.
- d. la conséquence du refroidissement et de l'épaississement de la plaque océanique lors de son éloignement par rapport à l'axe de la dorsale.
- e. un phénomène qui entraîne la production de magma.

4. Lorsqu'elle entre en subduction, la lithosphère océanique est :

- a. riche en minéraux métamorphiques hydroxylés.
- b. déshydratée.
- c. plus dense que l'asthénosphère.
- d. moins dense que l'asthénosphère.
- e. chaude.

5. Il y a formation de magma au niveau d'une zone de subduction :

- a. vers 100 km de profondeur sous l'arc volcanique.
- b. vers 150 km de profondeur sous l'arc volcanique.
- c. vers 300 km de profondeur sous l'arc volcanique.
- d. quand la plaque qui plonge se réchauffe.
- e. parce que la plaque qui plonge se déshydrate.
- f. lorsque la péridotite située au-dessus de la croûte subduite fond.
- g. lorsque la péridotite de la plaque subduite passe son solidus hydraté.

**6. La croûte continentale :**

- a. ne peut pas subduire car elle est moins dense que l'asthénosphère sous-jacente.
- b. peut subduire jusqu'à 100 km de profondeur au moins.
- c. se désolidarise du manteau sous-jacent, s'écaille et forme un prisme lorsqu'elle ne peut pas subduire.

**7. Les roches crustales caractéristiques d'une racine de collision sont :**

- a. les péridotites.
- b. les gabbros.
- c. les granodiorites.
- d. les andésites.
- e. les granites.
- f. les gneiss.
- g. les migmatites.

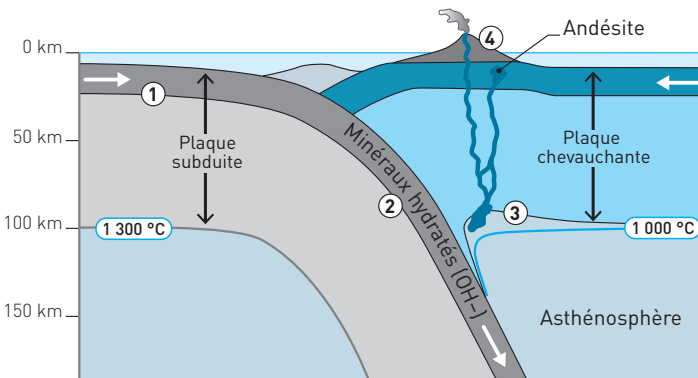
**2 TYPEX**

★ 10 min ► P. 182

Le schéma (doc. 8) et le texte qui l'accompagne, comportent des erreurs ou des oublis. **Corrigez-les.**

*Titre de la leçon :* « Les mécanismes générateurs de magma au niveau des zones de subduction »

« Lorsqu'une plaque océanique entre en subduction (1), elle est hydratée. Au fur et à mesure que la plaque subduite, ces minéraux subissent un métamorphisme croissant, caractérisé par des températures élevées. Ces transformations minéralogiques conduisent à libérer de l'eau (2) qui, vers 50 km de profondeur, permet la fusion du manteau de la plaque plongeante (3). »

**Doc 8 Schéma élève : Création de roches continentales dans une zone de subduction**

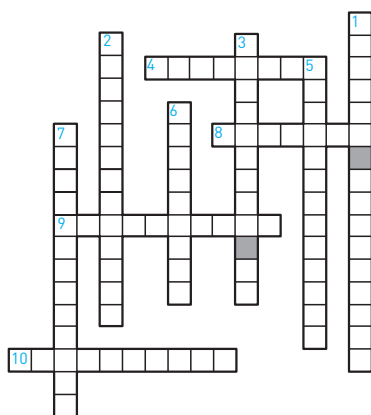
Aide : Sur le schéma, 7 erreurs sont à trouver.

## 3 VOCABULAIRE : « FORMATION ET RECYCLAGE

## DE LA CROÛTE CONTINENTALE »

★ 20 min ▶ P. 183

## Doc 9 Grille à compléter



## Horizontalement

4. Ils se forment par fusion dans les écaïlles continentales prises au sein des prismes de collision et constituent une forme de recyclage de la croûte continentale.

8. Processus de dégradation et de transformation des reliefs, causé par divers agents externes comme l'eau et le vent.

9. Vestiges de lithosphère océanique charriés sur les continents.

10. Phénomène qui produit les argiles et les éléments dissous dans les rivières.

## Verticalement

1. Mécanisme qui permet, à partir d'une roche initiale, d'obtenir un magma de composition chimique différente, donc une nouvelle roche.

2. Transformation des roches à l'état solide, souvent associée à une hydratation ou à une déshydratation des minéraux.

3. Obtenu par des expériences en laboratoire, ce type de graphe permet d'avoir une idée des conditions dans lesquelles se sont formées les roches qui affleurent.

5. Processus dans lequel des particules en suspension dans une rivière, un lac ou l'océan, cessent progressivement de se déplacer et tombent sur le fond en formant des couches.

6. Ensemble des phénomènes qui créent de nouvelles roches à partir d'anciennes.

7. Roches plutoniques de nature continentale formées dans les plaques chevauchantes des zones de subduction.

## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

## 4 LES CARACTÉRISTIQUES DE LA SUBDUCTION

★★ 15 min ▶ P. 183

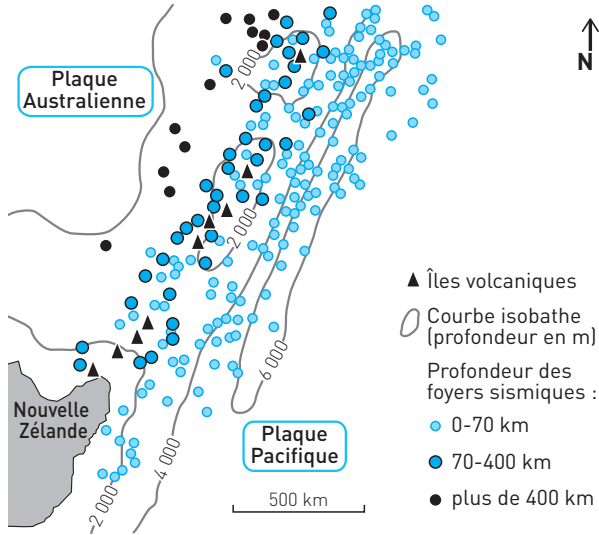
L'archipel des îles Kermadec dans l'océan Pacifique au nord-est de la Nouvelle Zélande correspond à une frontière de plaques en convergence.

1. Relevez dans le **document 10** les marqueurs d'une zone de subduction et indiquez le sens de la subduction.

Voir Savoir-faire, Compétence 2.

2. Précisez les caractéristiques des roches qui se forment en profondeur sous l'arc volcanique et quelle est la plaque qui fond.

**Doc 10 Données géophysiques et géographiques des îles Kermadec**



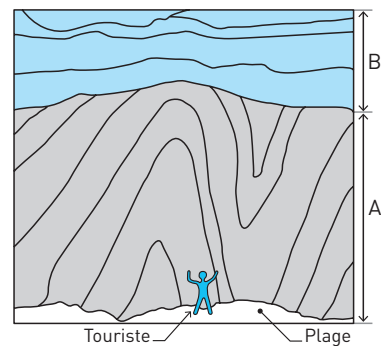
**5 UNE ANCIENNE MONTAGNE**

★★ 15 min ► P. 184

Quels sont les événements caractéristiques de l'évolution d'une chaîne de montagnes visibles sur cette falaise ?

**Doc 11 Falaise au sud du Portugal**

**A** = Carbonifère (– 330 à – 320 Ma) ;  
**B** = (– 230 Ma)



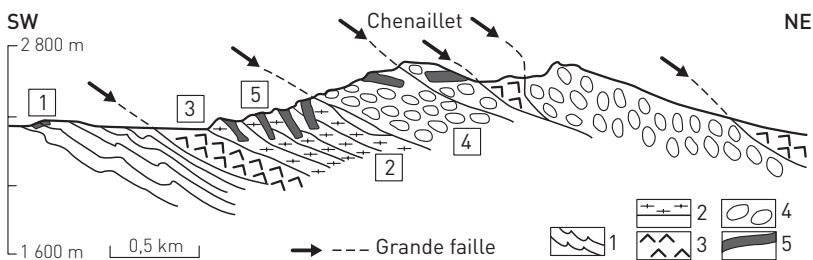
**6 UN ANCIEN OCÉAN ALPIN**

★★ 20 min ► p. 184

Les géologues pensent que la chaîne des Alpes résulte de la fermeture d'un domaine océanique, conséquence de la convergence des plaques lithosphériques. Expliquez en quoi le Chenaillet constitue l'un des éléments ayant permis de proposer cette hypothèse.

**Doc 12 Coupe au niveau du massif du Chenaillet dans les Alpes**

1. Sédiments océaniques.
2. gabbros.
3. Péridotites serpentinisées (hydratées).
4. basalte en coussins.
5. Filons de basalte.



Deux types d'indices sont à retrouver : ceux de nature pétrographique (nature des roches) et ceux de nature structurale.

**7 CRÉATION DES RELIEFS ALPINS**

★★ 30 min ► p. 184

À l'aide des documents et de vos connaissances, expliquez les mécanismes qui ont contribué à épaissir la croûte continentale alpine.

**Doc 13 Roches du Galibier (entre Belledonne et Grand Paradis sur le document 13)**

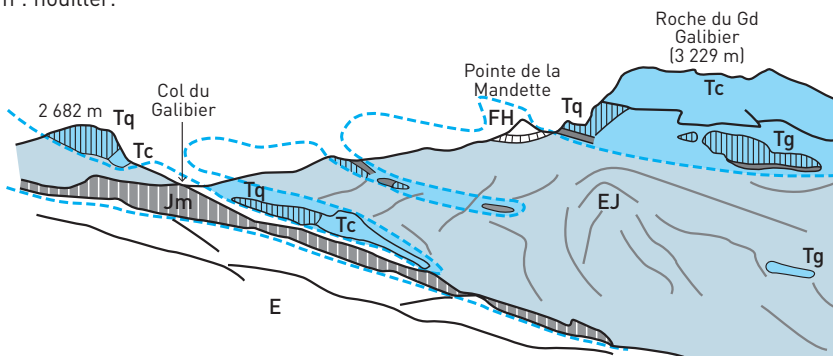
E : Éocène (– 56 à – 34 Ma).

EJ : formations sédimentaires du Jurassique (– 205 à – 130 Ma) à l'Éocène.

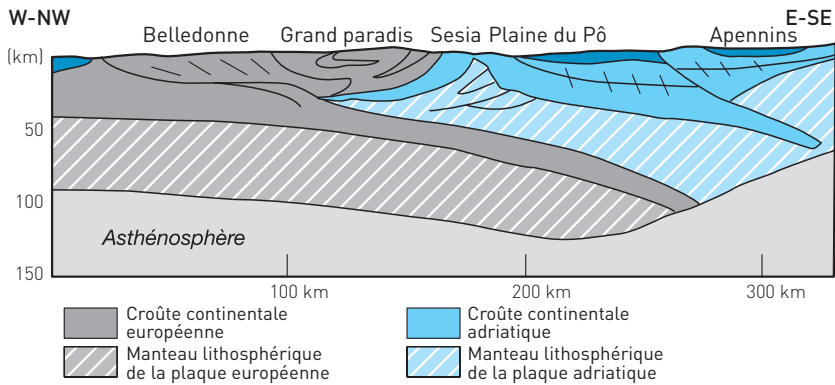
FH : flysh à helminthoïdes = formations sédimentaires (– 80 à – 65 Ma), considérés comme les premières manifestations de l'érosion des reliefs alpins.

T : divers sédiments du Trias (– 245 à – 205 Ma), sédiments ante-alpins.

h : houiller.



### Doc 14 Profil de sismique réflexion interprété dans les Alpes



#### Investigation guidée

**Diviser/Simplifier.** Ne vous perdez pas dans les détails des différentes structures et sélectionnez celles qui sont les plus représentatives de ce que vous observez dans le reste de la région.

Sur le **document 12**, repérez les terrains superposés d'âges discordants

Sur le **document 13** (profil des Alpes), repérez trois zones qui présentent des caractéristiques de déformation différentes, interprétez-les chacune séparément et situez la zone du Galibier dans l'un de ces trois grands domaines de déformation.

Regroupez vos observations et organisez-les afin de réaliser une synthèse des phénomènes qui interviennent dans l'épaississement crustal.

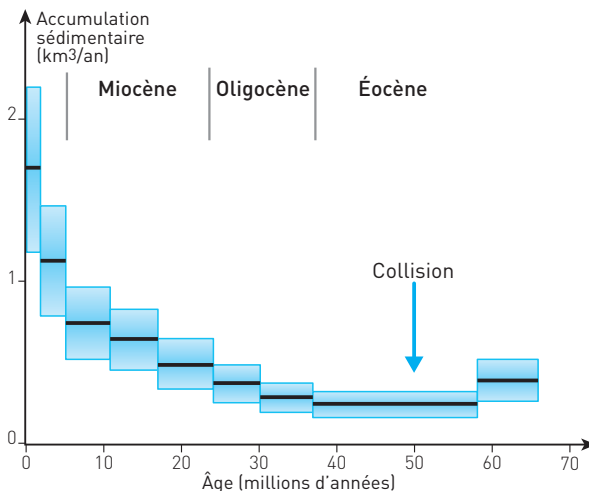
## 8 RECYCLAGE DES RELIEFS HIMALAYENS

★★

20 min

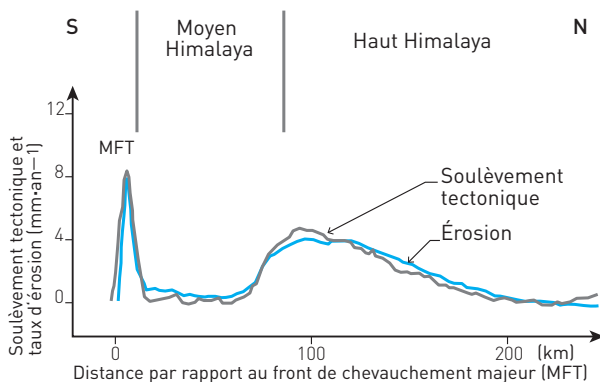
► p. 185

### Doc 15 Taux d'accumulation des sédiments himalayens dans les bassins tectoniques depuis 70 Ma





**Doc 16** Couplage entre tectonique et érosion pour la chaîne himalayenne (estimé par une modélisation numérique validée par des mesures de terrain)



**Diviser.** Le document 16 peut sembler complexe. Commencer par bien identifier les deux paramètres mesurés.

**Trouvez les réponses exactes en exploitant les documents.**

1. Le document 15 montre que :

- La collision Inde/Asie a débuté il y a 50 Ma.
- Le volume de sédiments émis chaque année, issu de l'érosion du Tibet, est constant depuis 50 Ma.
- L'érosion de la chaîne a tendance à s'atténuer actuellement.
- L'érosion de la chaîne est deux fois plus importante depuis 2 Ma qu'il y a 10 Ma.
- Avant la collision, les reliefs liés à la subduction étaient également soumis à une érosion forte.

2. Le document 16 montre que :

- Les zones qui s'élèvent actuellement sont situées au niveau du front de chevauchement majeur frontal et au niveau des zones du haut Himalaya (zones internes du prisme de collision).
- La largeur de la barrière himalayenne entre l'Inde et l'Asie est de 200 km.
- La longueur de la barrière himalayenne entre l'Inde et l'Asie est de 200 km.
- La chaîne s'élève en moyenne de 4 mm par an.
- La hauteur de la chaîne reste constante partout.
- Plus le soulèvement tectonique est important, plus l'érosion l'est également.

## 9 PRODUCTION DE MAGMA DANS LES ANDES

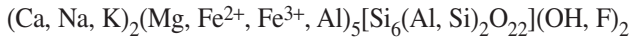
★★★ 45 min ▶ p. 185

Les Andes se caractérisent par un volcanisme majoritairement explosif lié à la forte teneur en vapeur des magmas produits. Les roches volcaniques produites présentent fréquemment en plus de leurs minéraux majoritaires (plagioclases, pyroxènes et quartz), d'autres minéraux tels que l'amphibole et la biotite (mica noir).

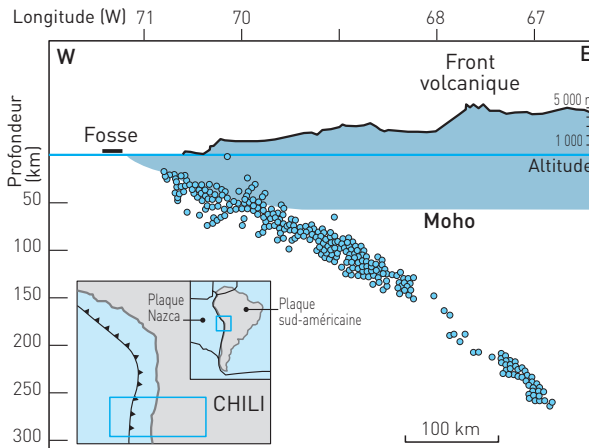
- **Formules**

- Formule de la biotite :  $K(Mg, Fe)_3(OH, F)_2(Si_3AlO_{10})$

- Formule de la hornblende (amphibole brune) :



**Doc 17 Répartition des séismes au toit de la plaque plongeante dans la zone de subduction de la cordillère des Andes**

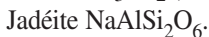
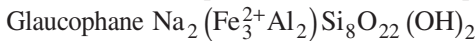


- **Caractéristiques de quelques associations minérales de haute pression**

Ces associations sont communes dans les ophiolites subduites puis exhumées présentes dans les chaînes de collision.

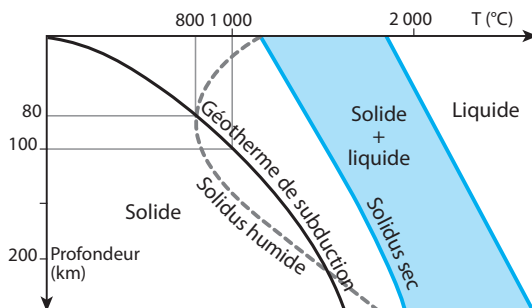
- *Ophiolites de type schiste bleu* : présence de glaucophane (amphibole bleue), stable entre 15 et 40 km de profondeur.

- *Ophiolites de type écolite* : Grenat + Pyroxène vert de type « Jadéite », association caractéristique au-delà de 40 km de profondeur.



**Doc 18 Fusion de la péridotite et du basalte dans différentes conditions**

La fusion des basaltes et gabbros de la croûte océanique a lieu dans les mêmes conditions de température, de pression et d'hydratation que celle de la péridotite.



À partir des informations extraites des documents et de vos connaissances :

**I. Représentez ou indiquez sur le document 17 :**

– la zone de fusion à l'origine du magma, la migration de ce magma et le nom des roches produites ;

N'oubliez pas que la migration du magma est verticale.

– le nom du mécanisme qui permet la production du magma.

**II.** Décrivez ce qui, dans les informations apportées par les documents, permet d'affirmer que le magma provient de la fusion de la plaque chevauchante et non de celle de la plaque subduite.

C'est une question difficile car elle implique un **raisonnement précis et structuré**.

**Investigation guidée**

**Diviser** : sélectionner, un par un, les indices apportés par les différents documents en cherchant l'élément de réponse qu'ils apportent.

**Lier** : faire des corrélations entre ces différents indices et vos connaissances.

**Conclure** : réaliser la synthèse des corrélations établies afin de répondre à la question.

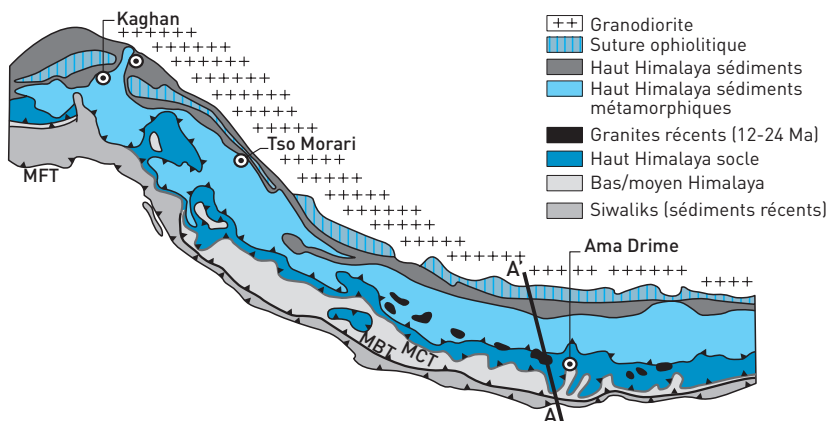
## EXERCICE D'APPROFONDISSEMENT

10 ÉLÉMENTS DE RECONSTITUTION  
DE L'HISTOIRE DE L'HIMALAYA

★★★ 45 min ▶ P. 187

## Doc 19 Carte géologique simplifiée de la région himalayenne

MCT : chevauchement central. MFT : chevauchement frontal. MBT : chevauchement intermédiaire.



Quelques zones remarquables himalayennes :

- Dans les gneiss du dôme du Tso Morari des reliques à coesite et diamant âgées de 55 Ma ont été observées.
- Dans les gneiss de Kaghan, on trouve également de la coesite, datée de – 46 Ma.
- Dans le socle ancien métamorphisé (gneiss migmatitique) d'Ama Drime, on enregistre plusieurs épisodes métamorphiques :
  - abondants gneiss migmatitiques à sillimanite datés de 13 à 14 Ma, associés à des granites récents (12 Ma) ;
  - présence en inclusions rares dans les gneiss à sillimanite, d'anciennes migmatites à disthène, staurotite et grenat, âgées de 33 Ma.

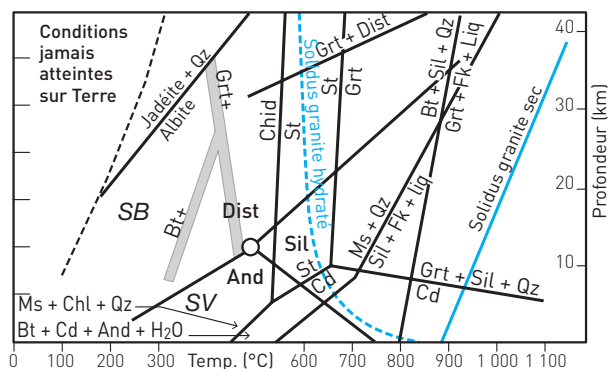
Le **document 20** (page ci-contre) nous donne les conditions de stabilité « pression-température » de quelques minéraux.

Andalousite, disthène et sillimanite sont trois formes cristallines d'un même minéral de formule  $(Al_2SiO_5 + \text{traces d'autres éléments})$ . Ces trois formes sont stables dans des conditions de pression et de température différentes.

La coésite est une forme de quartz caractéristique de pressions très fortes (plus de 80 km de profondeur), le diamant indique des conditions de pression correspondant à des profondeurs supérieures à 100 km.

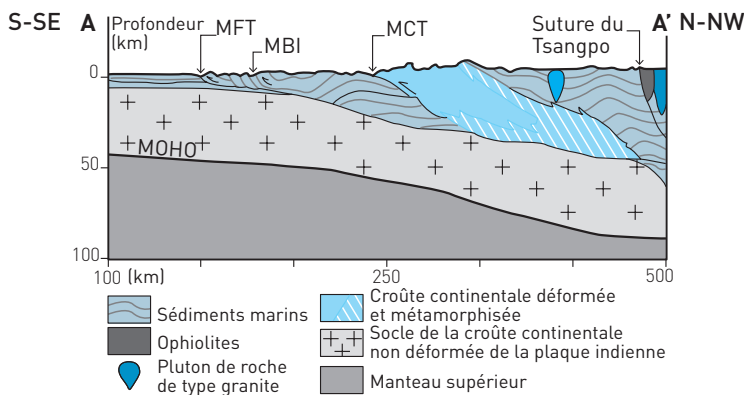
### Doc 20 Conditions de stabilité (pression-température) de quelques minéraux

Ms : muscovite. And : andalousite. Disth : disthène. Sil : sillimanite. Cd : cordiérite. FK : feldspath potassique. CP : clinopyroxène. ClD : chloritoïde. St : staurotide. Bt : biotite.



### Doc 21 Coupe synthétique simplifiée de l'Himalaya sur la transversale AA'

MCT : chevauchement central. MFT : chevauchement frontal. MBT : chevauchement intermédiaire.



Les migmatites sont des gneiss ayant partiellement fondu, le magma ayant recristallisé sans s'extraire des gneiss.

I. Placez les unités d'Ama Drime citées dans le texte sur le diagramme du document 20.

II. Appuyez-vous sur le **document 21** pour relever les propositions exactes.

1. **La coupe montre une subduction :**

- a. de la plaque indienne sous l'Asie orientée du sud vers le nord.
- b. de la plaque asiatique sous la plaque indienne orientée N-S.
- c. de la plaque asiatique sous la plaque indienne orientée S-N.

2. **On observe un prisme de collision :**

- a. à deux écaïlles.
- b. à trois écaïlles.
- c. à cinq écaïlles.

3. **Les écaïlles les plus récentes sont situées :**

- a. au niveau de la suture du Tsangpo.
- b. au niveau du MFT.

4. **La suture du Tsangpo :**

- a. est un vestige de la marge continentale asiatique.
- b. est un vestige d'un ancien océan.
- c. est une limite entre les plaques asiatique et indienne.

III. Dater la subduction de la marge continentale indienne sous la marge asiatique et indiquez la profondeur maximale atteinte.

IV. Citez, à partir des documents, les marqueurs himalayens qui témoignent d'un recyclage de la croûte continentale et datez ces événements de recyclage.

V. Résumez les deux étapes principales caractéristiques de la formation des chaînes de montagnes, enregistrées dans la nature et la structure des roches himalayennes.

## CONTRÔLE

**11** PRODUCTION DE MAGMA  
DANS LES ZONES DE SUBDUCTION | ★★ | 50 min | ► P. 188

Expliquez comment la plongée de la lithosphère océanique entraîne la genèse d'un magma à l'**origine** du magmatisme des zones de subduction.

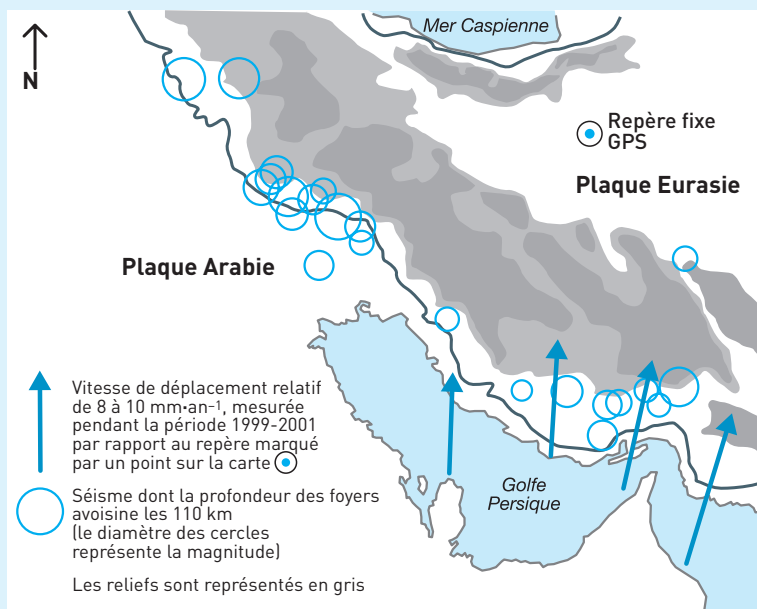
Vous illustrerez vos explications par un schéma situant les différents éléments d'une zone de subduction entrant en jeu.

**12** LA COLLISION ARABIE/EURASIE | ★★★ | 40 min | ► P. 189

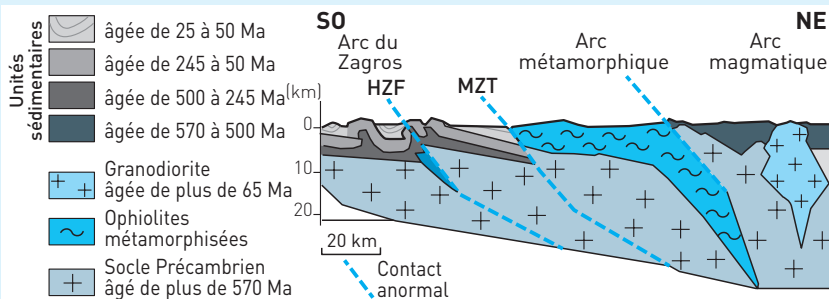
Exploitez les documents afin de retrouver les grandes étapes géologiques ayant donné naissance aux montagnes situées entre les plaques Arabie et Eurasie.

Les documents sont riches en informations. Ce sujet fait appel à votre sens de l'**observation** et à votre capacité à **hiérarchiser**, **ordonner** les idées puis **synthétiser**. Vous devez impérativement utiliser un brouillon ou annoter les documents directement. (Voir l'annexe **Méthodologie**.)

### Doc 22 Répartition des reliefs, des séismes et des vecteurs de déplacement GPS



### Doc 23 Coupe géologique localisée sur le document 22



## CORRIGÉS

1. **b.** Pyroxène ; **c.** Amphibole ; **f.** Olivine (caractéristique de la péridotite et des roches de la croûte océanique : gabbro/basalte) ; **h.** Plagioclase ; **i.** Quartz (caractéristique des roches de la croûte continentale comme le granite ou la granodiorite).

2. **a.** Gabbro (croûte) ; **c.** Basalte (croûte) ; **d.** Péridotite (manteau).

3. **a.** La subduction est, dans certains cas, la plongée d'une plaque océanique sous une plaque océanique ; **c.** la plongée d'une plaque océanique dans l'asthénosphère ; **d.** la conséquence du refroidissement et de l'épaississement de la plaque océanique lors de son éloignement par rapport à l'axe de la dorsale ; **e.** un phénomène qui entraîne la production de magma.

4. **a.** Lorsqu'elle entre en subduction, la lithosphère océanique est riche en minéraux métamorphiques hydroxylés ; **c.** est plus dense que l'asthénosphère.

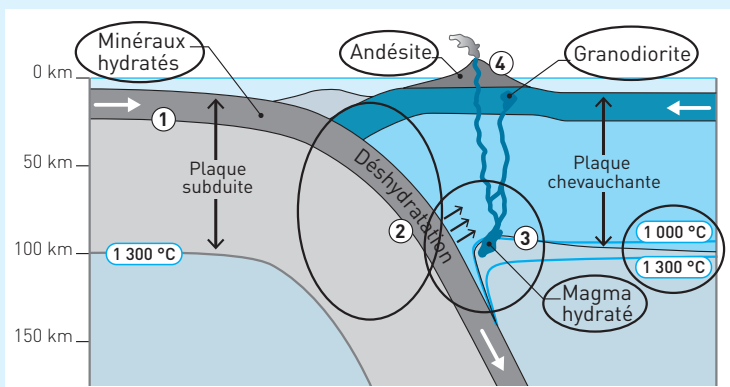
5. Voir **Savoir-faire, Compétence 3.**

**a.** Il y a formation de magma au niveau d'une zone de subduction vers 100 km de profondeur sous l'arc volcanique ; **b.** mais aussi vers 150 km ; **c.** parce que la plaque qui plonge se déshydrate ; **f.** lorsque la péridotite située au-dessus de la croûte subduite fond ; **g.** lorsque la péridotite de la plaque subduite passe son solidus hydraté.

6. **b.** La croûte continentale peut subduire jusqu'à 100 km de profondeur au moins ; **c.** se désolidarise du manteau sous-jacent, s'écaille et forme un prisme lorsqu'elle ne peut pas subduire.

7. Les roches crustales caractéristiques d'une racine de collision sont : **e.** les granites ; **f.** les gneiss ; **g.** les migmatites.

## 2 Doc 24 Schéma élève corrigé

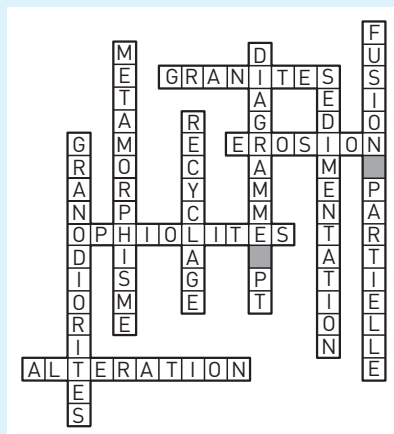


« Lorsqu'une plaque océanique entre en subduction (1), elle est hydratée. Au fur et à mesure que la plaque subduite, ces minéraux subissent un métamorphisme croissant, caractérisé par des **pressions** élevées. Ces transformations minéralogiques conduisent



à libérer de l'eau (2) qui, vers **100 km** de profondeur, permet la fusion du manteau de la plaque plongeante (3). »

### 3 Doc 25 Grille complétée



### 4 1. Analyse du document

- Présence d'un arc volcanique constitué par l'alignement des îles volcaniques.
- Foyers des séismes dépassant 100 km de profondeur (allant jusqu'à 400 km de profondeur).
- Présence à l'est de l'arc volcanique d'une fosse qui passe de 2 000 à 6 000 m en moins de 200 km.
- Séismes de plus en plus profonds sous la Nouvelle-Zélande en s'éloignant de la fosse vers l'ouest/nord-ouest.

#### Interprétation

- L'arc volcanique est parallèle à la fosse océanique et aux alignements constitués par les foyers de même profondeur, ce qui est caractéristique des zones de subduction.
  - Les foyers des séismes dépassent la profondeur de 100 km, ce qui indique qu'une lithosphère est en subduction dans l'asthénosphère.
  - et d. Le plan matérialisé par la profondeur des foyers sismiques (de plus en plus profonds quand on s'éloigne de la fosse par l'ouest) démontre que la plaque pacifique plonge sous la plaque indo-australienne avec un pendage orienté ouest/nord-ouest.
2. En profondeur, le magma qui a migré est stocké dans la croûte de la plaque chevauchante. Par cristallisation fractionnée et migration, il donne des magmas qui cristallisent sous la forme de **granodiorites**. Les granodiorites contiennent du **plagioclase**, du **quartz**, des **micas** et des **amphiboles** qui sont des **minéraux hydroxylés**, traduisant la richesse en eau des magmas produits.

C'est le manteau hydraté de la plaque indo-australienne qui fond vers **100 km** de profondeur, pour une température de **1 000 °C**.

## 5 Observations

Les roches du Carbonifère sont très fortement plissées, ce qui indique qu'elles ont subi des contraintes fortes. Les roches du Trias reposent sur ces roches plissées. La surface de contact avec les roches du Carbonifère est plane, elle coupe horizontalement les plis du Carbonifère.

Les deux unités sont dites en « discordance angulaire ».

### Interprétation

- Épisode 1 : la **collision** est postérieure au dépôt des couches d'âge carbonifère puisqu'elle modifie leur géométrie ; elle est révélée par les **plis**.
- Épisode 2 : l'**érosion** de la chaîne à laquelle appartenaient ces roches plissées, qui ont été complètement **aplanies**, s'est produite avant que ne se déposent les sédiments du Trias.

**6 Analyse** : La succession péridotite (manteau) / gabbros (croûte) / basaltes (croûte) est caractéristique de la lithosphère océanique (nature pétrographique).

**Interprétation** : Le massif du Chenaillet est un fragment de lithosphère océanique, c'est-à-dire une **ophiolite**.

**Analyse** : L'ensemble péridotites-gabbros chevauche les sédiments océaniques, il est lui-même chevauché par des écaïlles de basaltes en coussins. Le Chenaillet est constitué de la superposition d'écaïlles de lithosphère océanique qui chevauchent des sédiments.

**Interprétation** : Ces écaïlles se sont mises en place lors d'une tectonique en compression, au cours de la convergence de deux plaques.

### Conclusion

Le Chenaillet est un vestige de lithosphère océanique charrié sur la lithosphère continentale lors de la fermeture d'un ancien océan alpin.

## 7 Analyse du document 13

On observe une série de chevauchements associés à des plis : au niveau du Grand Galibier on observe un grand chevauchement d'âge triasique (début de l'ère secondaire) sur des terrains plus récents qui vont du Jurassique à l'Éocène (Tertiaire). Au niveau du col du Galibier, on retrouve ce chevauchement, mais on en observe également un autre qui superpose l'unité Jurassique/Éocène (EJ) sur une unité d'âge Éocène (E).

### Interprétation

En « surface », la croûte terrestre, soumise à des mouvements de compression s'est déformée en se fracturant et en se plissant. Des unités crustales (du Trias ici) ont été charriées le long de grandes failles inverses couchées (les chevauchements), ce qui a conduit à leur empilement et donc à un épaississement, mais en plus, ces roches ont subi des plissements, ce qui a également contribué à les épaissir.

### Analyse du document 14

On observe que ce processus d'épaississement affecte l'ensemble de la croûte continentale ainsi qu'une partie du manteau lithosphérique.

- La plaque européenne s'est enfoncée sous la plaque adriatique, ce qui a créé une racine crustale.
- Le Grand Paradis et Sesia sont des zones intensément déformées qui forment un prisme de collision, c'est-à-dire une succession d'écailles crustales qui ont d'abord été entraînées en subduction puis se sont désolidarisées du manteau sus-jacent, sont remontées et se sont empilées.
- À partir de Belledonne et vers les zones externes, les déformations sont moins intenses, on retrouve surtout des chevauchements et des plis comme ceux que l'on peut observer au niveau du massif du Galibier qui est une zone de transition entre les zones très déformées et celles qui le sont moins.

### Conclusion

La croûte alpine s'est épaissie lors de la subduction de la lithosphère européenne sous la lithosphère adriatique. Celle-ci a conduit à la formation d'un prisme de collision dans les zones internes, par rétro-charriage des écailles les plus proches de la suture entre les deux lithosphères. Ce prisme constitue en profondeur la racine de la chaîne. Par ailleurs, plus en surface et dans les zones externes, les roches se sont épaissies par chevauchements, plis, failles, et plis-failles.

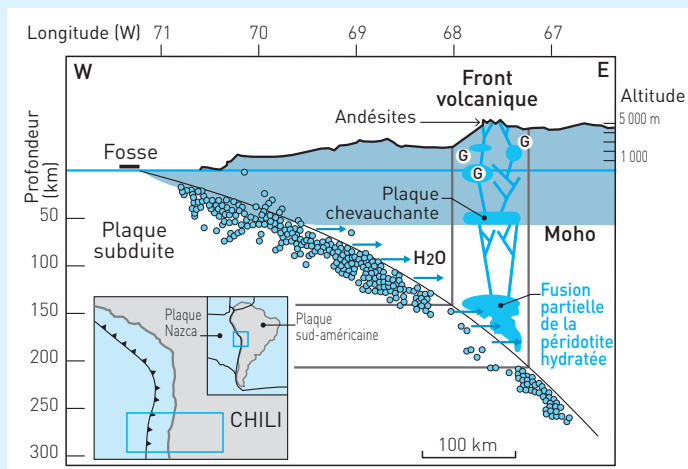
**8** 1. Les propositions exactes sont **a, d et e**.

Vous devez savoir qu'un prisme de collision est formé par l'empilement de grandes unités tectoniques. Les chevauchements sont matérialisés par les « fronts de chevauchement ». Sur la carte, on voit que la distance entre le front de chevauchement principal et l'arrière de la chaîne, c'est-à-dire ce qui correspond à la largeur de la chaîne, fait à peu près 200 km.

2. Les propositions exactes sont **a, e et f**.

**9** I. **Doc 26** Formation de magma sous l'arc volcanique des Andes

G : granodiorites.



## II. 1. Analyse des manifestations volcaniques et des roches associées

– Les Andes se caractérisent par un volcanisme majoritairement explosif **lié à la forte teneur en vapeur** des magmas produits.

– Les roches volcaniques produites présentent des minéraux hydroxylés :

la biotite (mica noir)  $K(Mg, Fe)_3(OH, F)_2(SiAlO_{10})$

et l'amphibole  $(Ca, Na, K)_2(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al)_5[Si_6(Al, Si)_2O_{22}](OH, F)_2$ .

### Conclusion

Le magma qui donne naissance à l'arc volcanique est un **magma riche en eau**, ce qui conduit à la formation de minéraux hydroxylés dans les roches et à un volcanisme explosif.

### 2. Mise en relation des documents

– À partir de la coupe, on a pu mettre en évidence que **la fusion partielle se situe entre 140 et 200 km de profondeur**.


– Analyse des ophiolites métamorphiques issues des zones de subduction

Les roches de la croûte océaniques sont transformées en **éclogites** à ces profondeurs, leur teneur en eau est très faible, les minéraux grenat et jadéite ne présentent pas de groupes OH.

### Conclusion

Il est peu probable que leur fusion donne un magma aussi hydraté que ce qui est décrit, d'autant plus que rien n'indique une hydratation secondaire du magma au niveau de la croûte de la plaque chevauchante.

### 3. Analyse du document 18

 Voir Savoir-faire, Compétence 3.

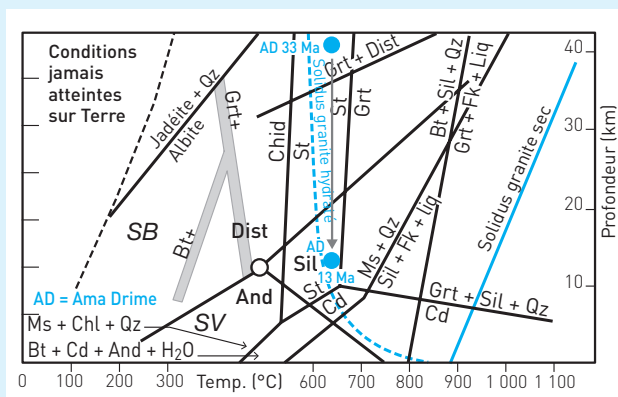
La température de fusion des gabbro, basalte et péridotite à 150 km de profondeur est située autour de 1 500 °C.

La température de fusion de ces roches est abaissée à 1 000 °C en présence d'eau, ce qui correspond à la température estimée au niveau du manteau de la plaque chevauchante. La plaque subduite située à ces profondeurs est plus froide.

### Bilan

La seule solution pour que les roches de la croûte ou du manteau fondent est donc qu'elles soient hydratées. Entre 140 et 200 km de profondeur, les seules roches hydratées à la température de 1 000 °C sont les péridotites du manteau chevauchant qui a reçu l'eau libérée par la croûte océanique au cours de sa subduction.

## 10 I. Doc 27 Métamorphismes de quelques unités himalayennes



## II. 1. a.

2. c. On observe un prisme de collision à cinq écailles (écaille des ophiolites, écaille des sédiments océaniques, écaille du socle, deux écailles des sédiments d'avant-chaîne).

3. b. Les écailles les plus récentes sont situées au niveau du MFT (la déformation progresse vers l'avant de la chaîne).

4. b. et c.

III. Anciens sédiments de la marge indienne métamorphisés et remontés : gneiss du dôme du Tso Morari, –55 Ma : au moins 120 km et gneiss de Kaghan, –46 Ma : au moins 100 km de profondeur.

Ancien socle : Ama Drime, –33 Ma : au moins 40 km atteints.

La subduction de la marge continentale indienne a donc atteint plus de 100 km de profondeur il y a 55 Ma (Tso Morari). Alors que cette unité remontait, d'autres subductaient mais moins profondément (Kaghan puis Ama Drime). Entre – 55 et – 35 Ma, la marge continentale indienne était donc en subduction.

IV. Recyclage par **fusion de la croûte continentale** : migmatisation au niveau d'Ama Drime, il y a 33 Ma et deuxième événement de migmatisation, il y a 13 à 14 Ma, à l'origine de **granites** récents (–12 Ma). Recyclage par **érosion** : les granites se forment à quelques km de profondeur. L'affleurement de granites récents témoigne de l'érosion intense qu'ont subi les roches qui les recouvraient.

V. Étape 1 : **subduction** d'un ancien océan. Les **ophiolites** sont les restes de cet ancien océan ; la **granodiorite**, le témoignage de l'activité magmatique qui existait au niveau de cette marge pendant la subduction océanique.

Étape 2 : **subduction de la marge continentale indienne** et formation d'un **prisme de collision**. Les zones métamorphiques de (très) haute pression sont le témoignage de la subduction de la marge, leur remontée, le témoignage de l'écaillage de la croûte, donc de la formation du prisme de collision.

11

Cette restitution porte sur la première partie de ce chapitre (I Formation de croûte continentale dans les zones de subduction). Nous donnons donc ici quelques éléments de correction sans détailler.

### Introduction

- Définition et description d'une zone de subduction : zone de convergence où disparaît la lithosphère océanique, marquée par une intense activité volcanique (arc volcanique).
- Problématique : Comment se forme le magma rejeté par les volcans ?

### I. Subduction et formation de magma dans la plaque chevauchante

■ Métamorphisme de la plaque subduite hydratée : transformation à l'état solide des minéraux de la croûte. Sous les effets conjugués de la pression et de la température, des réactions chimiques se produisent entre les minéraux qui conduisent à la formation de nouveaux minéraux et à la **libération d'eau**.

■ Localisation de la formation du magma

Le magma se forme vers **100 km de profondeur et jusqu'à 200 km**, à l'aplomb des volcans, dans le **manteau de la plaque chevauchante**. À cette profondeur, la **température est de 1 000 °C**.

■ Conditions de la formation de ce magma

Le manteau lithosphérique est constitué de péridotites, dont la fusion se produit vers 1 200 °C. Mais en présence d'eau, la fusion des péridotites commence dès 1 000 °C : **l'eau abaisse le point de fusion des péridotites**.

### II. Propriétés et devenir du magma

Il s'agit d'une **fusion partielle** : seuls certains éléments de la péridotite fondent. Le liquide obtenu par fusion partielle forme un magma :

- qui monte en surface par les fissures générées par la tectonique compressive et alimente les volcans andésitiques ;
- qui se solidifie en profondeur et donne naissance à un pluton de granodiorite.

### Conclusion

La conclusion peut prendre la forme d'un **schéma bilan explicatif**, accompagné éventuellement d'une question ouverte : « Que se passe-t-il lorsque la subduction est terminée ? » par exemple.

Voir le **document 1**.

Les éléments attendus dans le schéma explicatif sont les suivants.

#### Au niveau de la plaque chevauchante

##### ■ Lithosphère

- Épaisseur de la croûte continentale (granites, gneiss) de 35 km en moyenne.
- Limite lithosphère/asthénosphère au niveau de l'isotherme 1 300 °C sauf au niveau du coin mantellique qui fond à 1 000 °C et se comporte comme de l'asthénosphère.

##### ■ Magmatisme

- Zone de fusion entre 100 et 200 km dans le manteau de la plaque chevauchante, sous les volcans.
- Montée du magma : plutons de granodiorite et volcans andésitiques.

#### Au niveau de la plaque subduite

##### ■ Lithosphère

- Épaisseur de la croûte océanique de 7 km environ.
- Limite lithosphère/asthénosphère à 100 km de profondeur environ.

##### ■ Métamorphisme

- Libération d'eau de la croûte vers le manteau sus-jacent, entre 30 et 200 km de profondeur environ.

### 12 ■ Étude du document 22

#### • Observation

- Les plaques Arabie et Eurasie sont séparées par une chaîne de montagnes orientée NW/SE.
- La plaque Arabie remonte de **8 à 10 mm/an vers le N/N-O**.

#### Analyse

La frontière entre les deux plaques est une frontière de **convergence** car les deux plaques se **rapprochent l'une de l'autre**.

#### • Observation

Les **foyers** des séismes enregistrées à l'avant de la chaîne vers l'Arabie sont situés une profondeur de **110 km**.

#### Analyse

La profondeur des foyers sismiques indique que des déformations importantes ont lieu à 110 km de profondeur dans des zones sans reliefs. À cette profondeur, on devrait trouver de l'asthénosphère et la tectonique ne devrait pas être cassante.

#### • Conclusion

On en déduit qu'une plaque subit des déformations importantes à cet endroit parce qu'elle est en **subduction** sous une autre.

### ■ Étude du document 23

#### • Analyse

- La coupe dans la chaîne montre que la croûte arabique est débitée sous la forme d'**écailles crustales** qui constituent une racine de 40 km de profondeur, et que les couches sédimentaires en surface sont plissées et faillées.
- La croûte arabique est séparée de la croûte eurasiennne par une zone d'**ophiolites**, métamorphisées et déformées. Les ophiolites sont des vestiges de la lithosphère océanique.

### Conclusion partielle

La croûte de la **plaque arabique** est passée **en subduction** vers le nord/nord-est **sous la plaque eurasiennne**, ce qui a entraîné son écaillage. La structure de la chaîne est celle d'un **prisme de collision** encore en formation, les deux croûtes ne sont pas vraiment en contact, mais ce sont actuellement les zones externes de la chaîne qui enregistrent les déformations : **la chaîne est en début de collision**.

#### • Analyse

Par ailleurs, on observe du côté de la plaque eurasiennne des **granodiorites**, qui sont des roches typiques du magmatisme des zones de subduction. L'« arc magmatique » est le témoin de l'ancienne marge active eurasiennne.

#### Chronologie

- La granodiorite date de – 65 Ma.
- Les ophiolites se sont déposées entre – 500 et – 245 Ma.
- Les sédiments les plus récents repris dans les déformation à l'avant de la chaîne sont âgés de – 25 Ma.

#### ■ Synthèse

Les grandes étapes qui ont donné naissance à la chaîne de montagnes située entre l'Arabie et l'Eurasie sont :

1. La **subduction** d'un ancien océan (âgé de – 500 à – 245 Ma) qui a commencé probablement il y a **245 Ma** (âge des ophiolites les plus jeunes), cette subduction était encore **active il y a 65 Ma**, âge de cristallisation de la granodiorite au niveau de l'ancienne marge active eurasiennne.
2. La **subduction partielle de la lithosphère continentale** arabique sous la plaque eurasiennne qui a commencé après 65 Ma, et a entraîné la formation d'un prisme de collision constitué d'écailles d'ophiolites et de croûte arabique.
3. La **collision proprement dite** : elle a mis en contact les croûtes des deux plaques, séparées par la suture ophiolitique. Elle est aussi caractérisée par la déformation des zones plus externes. Elle est postérieure à **25 Ma**, puisqu'elle a repris les sédiments les plus jeunes.
4. Tout au long de l'histoire de la chaîne : l'érosion. L'**érosion** des premiers reliefs a formé des sédiments aujourd'hui déformés. Actuellement, c'est l'érosion qui façonne la chaîne telle qu'on peut l'observer.



## 8

# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

**J**e suis une source d'énergie.  
Disponible partout, hiver comme été, de jour et de nuit.  
Durable et qui ne produit pas de CO<sub>2</sub>.  
Gratuite, mais pour me trouver il faut creuser.  
Je suis...

## I UNE RESSOURCE D'ÉNERGIE : LA GÉOTHERMIE

### 1. Géothermie

La chaleur de la Terre ou **géothermie** est mise en évidence par les sources thermo-minérales (« sources d'eau chaude ») où l'eau peut être à plus de 80 °C. Dans certains cas, elle permet aussi la production d'électricité.

On distingue classiquement trois types de géothermie.

■ La **géothermie « privilégiée »** exploite des sources hydrothermales très chaudes, au niveau de forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Elle est surtout utilisée pour produire de l'électricité.

– La géothermie « haute énergie » (aux températures supérieures à 200 °C) permet la production d'électricité grâce à la vapeur sous pression.

– La géothermie « moyenne énergie » (aux températures comprises entre 100 et 200 °C) nécessite pour la production d'électricité un fluide intermédiaire, chauffé en profondeur. On parle aussi de géothermie sèche car c'est l'énergie thermique des roches qui est utilisée et non celle de fluides circulant naturellement.

■ La **géothermie de basse énergie** exploite des nappes d'eau profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100 °C. Elle est particulièrement développée pour le chauffage urbain.

■ La **géothermie de très basse énergie** exploite la chaleur du sol et du sous-sol à faibles profondeurs à des niveaux de température compris entre 10 et 30 °C. C'est le chauffage et la climatisation individuelle par « pompe à chaleur ».

**L'essentiel**

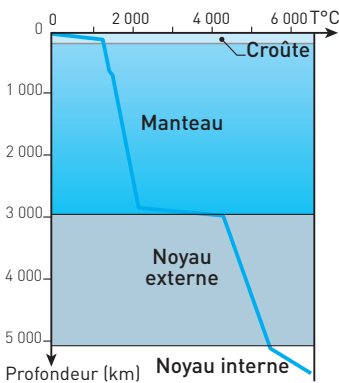
L'énergie géothermique utilisable par l'Homme est variable d'un endroit à l'autre. Utilisée pour le chauffage, elle permet aussi de produire de l'électricité. C'est une énergie non productrice de  $\text{CO}_2$  et pratiquement inépuisable.

**II LA TERRE, UNE MACHINE THERMIQUE****1. Gradient géothermique**

■ Le **gradient géothermique** exprime la variation de la température en fonction de la profondeur. Il est élevé dans la croûte ( $30\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ ), il s'abaisse progressivement jusqu'à  $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$  dans le manteau. Il y a donc une source d'énergie thermique à l'intérieur du globe.

■ L'énergie terrestre provient de trois sources :

- l'énergie thermique emmagasinée lors de la création du globe par accréation, et qui se dissipe depuis déjà 4,6 milliards d'années ;
- l'énergie thermique provenant de la cristallisation du fer à la limite manteau/noyau ;
- l'énergie thermique libérée lors de la **désintégration d'éléments radioactifs** principalement présents dans le manteau inférieur. C'est le cas de l'uranium ( $^{235}\text{U}$  et  $^{238}\text{U}$ ), du thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) et du potassium ( $^{40}\text{K}$ ).

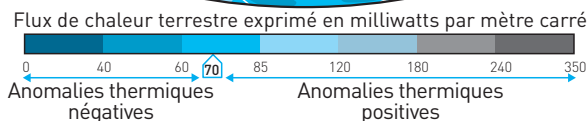
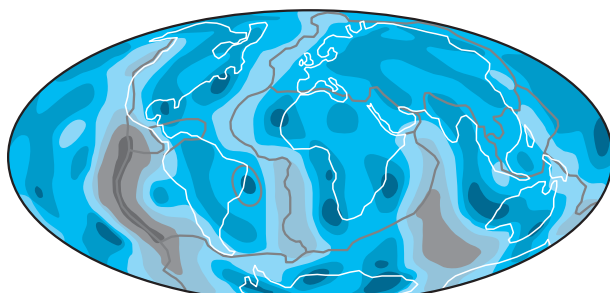
**2. Flux géothermique et transfert thermique****Doc 1 Géotherme terrestre**

■ Le **flux géothermique** est une mesure de la quantité d'énergie thermique ou chaleur dissipée à travers les roches. Le fait que la température augmente avec la profondeur démontre qu'il existe des transferts d'énergie thermique du centre de la Terre vers sa surface. Le **géotherme** de la Terre est un modèle mathématique qui décrit l'évolution de la température des roches terrestres en fonction de la profondeur.

**■ Un flux thermique inégal**

L'étude des températures de la surface de la Terre a permis de mettre en évidence des zones de dissipation thermique anormales ou zones d'anomalies thermiques.

## Doc 2 Carte des flux thermiques terrestres de surface



Le flux géothermique a une valeur moyenne de  $70 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ , mais est loin d'être uniforme. Il est supérieur à la moyenne dans les régions volcaniques dorsales et au niveau des points chauds, on parle alors de zones d'**anomalie thermique positive**. Il est inférieur à la moyenne au niveau des marges passives et des zones de subduction, on parle alors de zones d'**anomalie thermique négative**.

### 3. La machine thermique

■ **Deux mécanismes** permettant la transmission d'énergie thermique.

– Dans la lithosphère, il y a **conduction**. L'énergie thermique se propage d'atomes en atomes par agitation thermique sans mouvement de matière. Cela se traduit par un fort gradient géothermique de 10 à 20 °C par km de profondeur. La température à la surface est de 15 °C alors que celle à la base de la lithosphère est de 1 300 °C.

– Dans le manteau, l'énergie thermique est transmise par **convection**. La matière chauffée perd de la densité et tend à remonter lentement. Plus tard, refroidie, elle gagne en densité et redescend. Ce mécanisme est très lent, mais permet un transfert d'énergie beaucoup plus efficace et à grande échelle.

■ La machine Terre est une machine thermique : flux d'énergie et flux de matière sont étroitement associés. Dans le manteau, l'**inégalité répartition de l'énergie thermique** entraîne une circulation de la matière appelée **convection mantellique** (document 3).

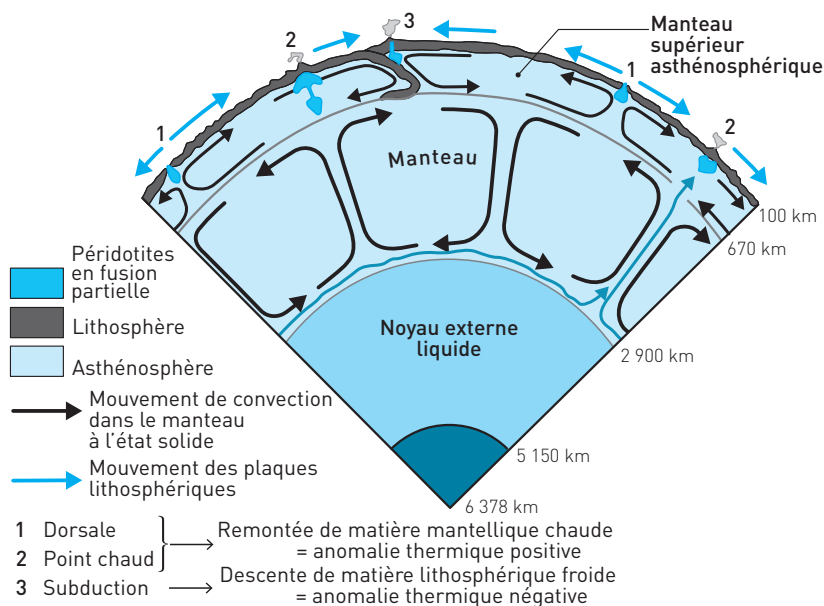
– La matière chaude, peu dense, remonte. Cela se produit au niveau des dorsales (1) et des points chauds (2), zones de création de la croûte océanique.

– La matière froide, plus dense, descend. Cela se produit au niveau du plongement de la lithosphère dans les zones de subduction (3), zones de disparition de la croûte océanique âgée et dense.

– Ces mouvements de matière du manteau entraînent le mouvement relatif des plaques à la surface et donc la tectonique globale du globe.

■ Le plongement de la lithosphère dans les zones de subduction participe à la convection en faisant descendre du matériel froid.

### Doc 3 Un des modèles de la convection mantellique



#### L'essentiel

Gradients et flux varient selon le contexte géodynamique.

- Dans les dorsales, le flux fort est associé à la production de lithosphère océanique nouvelle.
  - Les zones de subduction présentent un flux faible associé au plongement de la lithosphère âgée devenue dense et sa disparition.
- La Terre est une machine thermique.

## SAVOIR-FAIRE

## Vocabulaire

- **Géotherme** : Profil de la température en fonction de la profondeur ou augmentation de température constatée dans le sous-sol à mesure que l'on s'éloigne de la surface (voir document 1).
- **Gradient géothermique** : Évaluation de la variation de la température en fonction de la profondeur. En °C par km.
- **Flux géothermique** : Quantité d'énergie thermique qui se dissipe sur une surface donnée, en un temps donné. En joule par seconde (watt) et par mètre carré de surface. Le flux moyen à la surface de la Terre est de 70 mW/m<sup>2</sup>.
- **Ondes sismiques** : Ondes mécaniques libérées lors d'un séisme. Leur vitesse dépend des caractéristiques du milieu traversé : densité, température, nature des roches. Elles permettent l'élaboration de profils tomographiques (voir Compétence 1).
- **Conduction** ou diffusion thermique : il y a transfert d'énergie thermique entre deux corps de température différente par contact et sans transfert de matière. Le transfert de chaleur est provoqué par des différences de température au sein d'un même matériau solide ou entre deux matériaux solides en contact, l'agitation des atomes se transmettant de proche en proche. Un exemple concret : si vous posez une main sur un objet chaud, celui-ci vous transmet de la chaleur par conduction.
- **Convection** : Un corps qui se déplace transfère avec lui l'énergie qu'il contient. Un exemple concret : le sèche-cheveux, qui transmet de la chaleur en déplaçant de l'air chauffé. C'est la différence de température qui crée une différence de densité et donc le mouvement.
- **Convection mantellique** : Phénomène physique se produisant à l'intérieur du manteau terrestre. Elle est le moteur profond de la tectonique des plaques. Les roches du manteau sont soumises à une forte différence de température entre la base du manteau inférieur (3 000 °C environ) d'une part et la transition asthénosphère-lithosphère (1 330 °C) d'autre part. Les parties chaudes, moins denses, auront tendance à s'élever, tandis que les parties froides, plus denses, auront tendance à s'enfoncer. Il y a mouvement des péridotites du manteau à l'état solide.
- **Géothermie** : Littéralement chaleur de la Terre : géo (Terre) et thermie (chaleur). La géothermie désigne aussi les techniques permettant d'utiliser l'énergie géothermique du globe comme source de chaleur ou pour la convertir en électricité.

## Compétences

### 1. Exploiter les données d'un profil de tomographie sismique

La **tomographie sismique** permet d'établir des « coupes » du globe terrestre grâce à une analyse des vitesses de propagation des ondes sismiques P et S. Les vitesses enregistrées dépendent, notamment, des caractéristiques physiques du milieu traversé (température, pression et minéralogie). On a alors un aperçu des structures de l'intérieur de la Terre.

Les ondes sismiques ralentissent dans un milieu plus chaud ou moins dense, accélèrent dans un milieu plus froid ou plus dense.

Une anomalie négative de vitesse des ondes (ralentissement) met en évidence une anomalie thermique positive (milieu plus chaud que la normale). Une anomalie positive de vitesse des ondes (accélération) met en évidence une anomalie thermique négative (milieu plus froid que la normale).

### 2. Repérer des sites de géothermie

Savoir utiliser des données de flux ou de gradients géothermiques afin de localiser et d'évaluer des sites de géothermie.

## Repères

### 1. Connaître l'origine de l'énergie terrestre.

### 2. Maîtriser les notions de flux, convection et conduction thermiques.

### 3. Comprendre et modéliser la dynamique du globe liée à la géothermie.

Comprendre la convection mantellique, son origine et ses conséquences sur la tectonique globale. (Voir le paragraphe II.3 du cours.)

### 4. Comprendre le principe d'une exploitation géothermique.

## EXERCICES D'APPLICATION

1 QCM

★★ 15 min ▶ P. 211

Chaque affirmation peut comporter une ou plusieurs suites exactes. Relevez les affirmations correctes et corrigez celles qui sont fausses.

## 1. La convection mantellique :

- a. est due à un flux thermique qui dissipe l'énergie thermique interne terrestre.
- b. entraîne une remontée de matière froide.
- c. est un des moteurs de la tectonique des plaques.
- d. répartit la chaleur par contact.

## 2. Au niveau d'une dorsale il y a :

- a. une remontée de péridotites plus chaudes.
- b. un flux thermique important.
- c. une anomalie tomographique positive.
- d. une anomalie thermique positive.

## 3. Au niveau d'un point chaud :

- a. la source de chaleur est à la limite noyau/manteau.
- b. il y a remontée de péridotites en fusion grâce à la convection mantellique.
- c. il y a remontée de péridotites solides grâce à la convection mantellique.
- d. les volcans sont alignés car la plaque sur laquelle ils sont se déplace sur le point chaud fixe.

## 4. Au niveau d'une zone de subduction :

- a. il y a une anomalie thermique positive.
- b. c'est le refroidissement de la plaque océanique vieillissante qui provoque son plongement.
- c. c'est la densité de la plaque océanique supérieure à celle de l'asthénosphère qui provoque son plongement.
- d. la plaque océanique est refroidie en plongeant.

## 5. La géothermie :

- a. permet d'utiliser la chaleur interne de la Terre.
- b. n'est possible que dans les régions de fort magmatisme.
- c. permet de produire de la chaleur et de l'électricité.
- d. donne une énergie propre et pratiquement inépuisable.

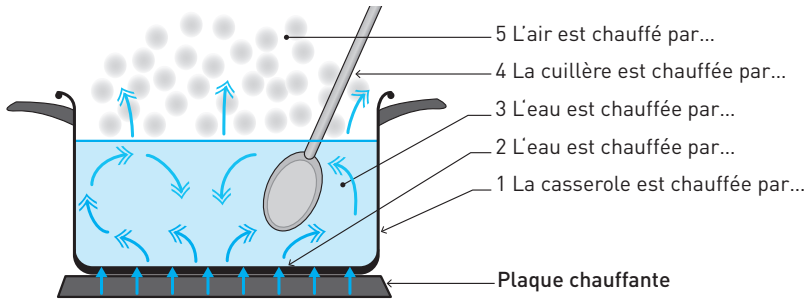
2 CONVECTION ET CONDUCTION

★★ 15 min ▶ P. 211

Complétez la légende du schéma du document 4 avec les termes de conduction ou convection. Justifiez votre choix en expliquant comment l'élément acquiert de l'énergie thermique.

Voir Savoir-faire, Vocabulaire.

#### Doc 4 L'énergie thermique dans une casserole



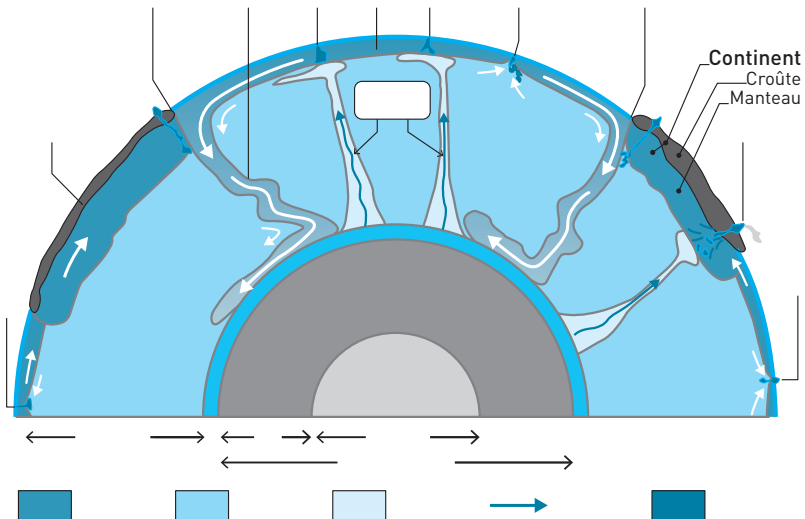
### 3 CONVECTION ET TECTONIQUE

★★ 15 min ► P. 212

Annotez et légendez le schéma simplifié de la convection mantellique et de la tectonique globale (**document 5**).

Voir Savoir-faire, Repère 3.

#### Doc 5 Schéma simplifié de la convection mantellique à l'origine de la tectonique des plaques





## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

## 4 FLUX GÉOTHERMIQUES DES OCÉANS ET DES CONTINENTS

★★ | 25 min | P. 212

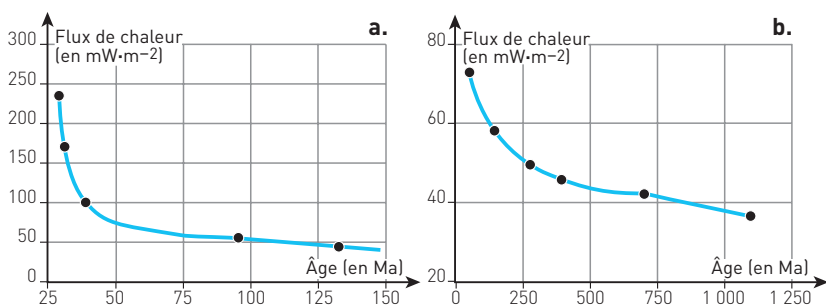
Exploitez le **document 6** pour répondre aux questions suivantes.

1. Quel est l'âge du plancher océanique ou socle continental au niveau duquel on mesure un flux géothermique moyen de  $50 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  ?
2. Quelle est la valeur du flux géothermique mesuré dans la zone d'origine du plancher océanique ? Quelle est cette zone ?
3. On parle, à ce dernier niveau, d'anomalie géothermique positive. À quoi est-elle due ?
4. Comment évolue le flux géothermique du plancher océanique au cours du temps ? Pourquoi ?

Découper la courbe Pacifique en deux parties et identifier la signification en terme de flux thermique (refroidissement très rapide / lent), utiliser cela pour interpréter et comparer l'évolution thermique au niveau des continents.

5. Quelles en sont les conséquences tectoniques ?
6. Que peut-on déduire de l'évolution des flux géothermiques océaniques et continentaux ?

**Doc 6 Valeurs du flux géothermique (en  $10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) en fonction de l'âge (en millions d'années) des plaques au niveau du Pacifique (a) et en milieu continental (b)**

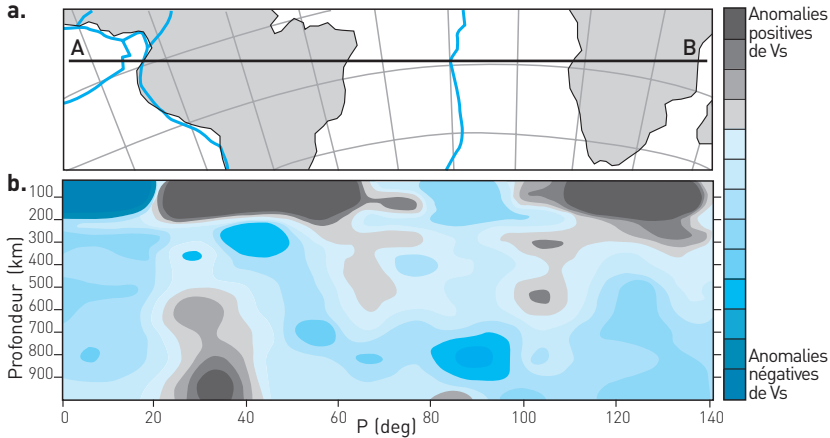


Voir aussi le chapitre 7 : Métamorphisme hydrothermal des plaques océaniques.

## 5 QCM TOMOGRAPHIE

★★ 20 min ▶ P. 212

## Doc 7 Tomographie sismique au niveau de l'Atlantique Sud

a. Carte. b. Profil tomographique selon la coupe AB. ( $V_s$  = vitesse des ondes S.)

En analysant le **document 7**, corrigez les phrases incorrectes.

1. Les zones en bleu foncé montrent une vitesse des ondes sismiques nettement supérieure à la moyenne.
2. Une anomalie négative de la vitesse des ondes S signifie que ces ondes se propagent moins rapidement que la normale.
3. Une anomalie négative de la vitesse des ondes S signifie que ces ondes se propagent dans un milieu plus froid.
4. Une anomalie négative de la vitesse des ondes S correspond à une anomalie thermique négative.
5. Les continents sont des zones plus froides.
6. Au niveau des dorsales l'anomalie positive des  $V_s$  montre la présence d'une anomalie positive thermique due à la présence de magma plus chaud.

Voir Savoir-faire, Compétence 1.

## 6 TOMOGRAPHIE AU NIVEAU DE L'HIMALAYA

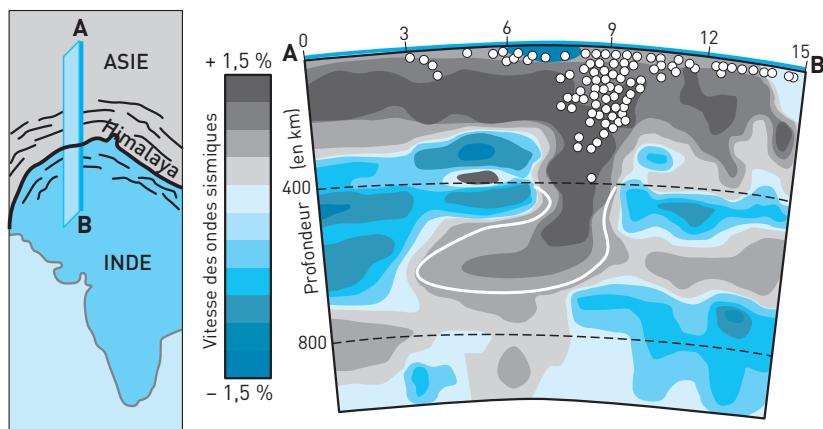
★★★ 30 min ▶ P. 213

À l'aide du **document 8**, montrez quel est le type d'anomalie thermique présent au niveau de l'Himalaya et à quel phénomène tectonique on peut l'associer.

Il y a deux questions : la première nécessite la lecture du document (voir Compétence 1), pour la seconde, l'interprétation, il est possible de s'aider des chapitres 6 et 7.

**Doc 8 Localisation et profil tomographique himalayen selon la coupe AB**

(Points blancs = localisation des séismes.)

**EXERCICES D'APPROFONDISSEMENT****7 LA GÉOTHERMIE EN FRANCE**

★★ 30 min ▶ p. 213

La géothermie de moyenne énergie consiste à exploiter les capacités thermiques des roches superficielles. On injecte de l'eau froide en profondeur et on la récupère, chaude, en surface. On peut produire de l'électricité si l'énergie thermique récupérée est suffisante. Pour cela les forages doivent atteindre des profondeurs où la température des roches est de voisine de 180 °C.

On considère que la température de surface moyenne est de 15 °C et qu'il y a une évolution linéaire de la température en profondeur sur les cinq premiers kilomètres.

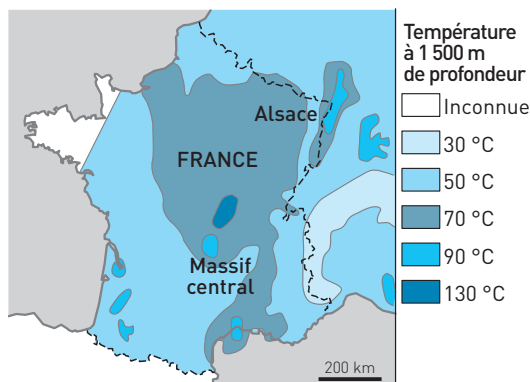
**1.** Calculez le gradient géothermique de chacune des cinq zones thermiques illustrées sur la carte de France (**document 9**).

Le gradient géothermique est l'élévation de la température en °C par kilomètre de profondeur.

**2.** Dans chaque cas, estimez la profondeur de forage à atteindre pour permettre une production d'électricité en géothermie sèche. Déterminez les régions propices à cette technique.

Commencer par chercher dans le texte l'information qui permet de savoir quelles sont les conditions pour produire de l'électricité, puis en déduire à quelle profondeur minimale il faut forer.

## Doc 9 Les ressources géothermiques en France

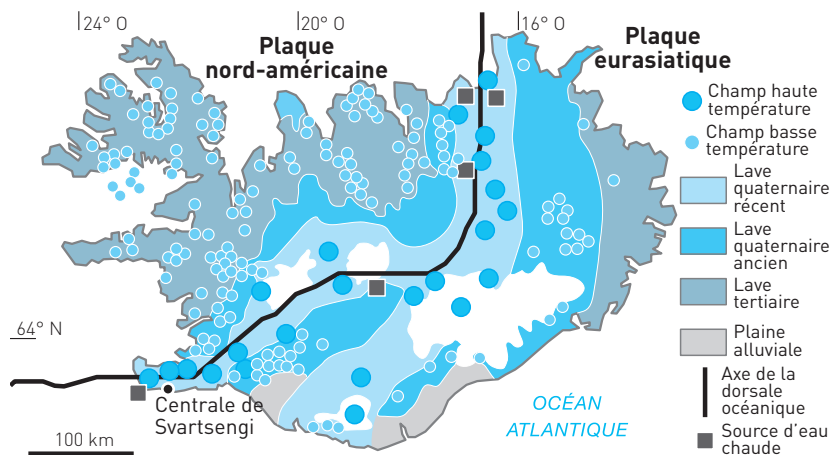


### 8 ISLANDE ET GÉOTHERMIE

★★★ 35 min ▶ P. 214

Les Islandais, conscients de la force de la nature dans leur pays, utilisent les ressources naturelles comme énergie. C'est ainsi que la géothermie est devenue la source d'énergie principale de l'Islande. Du fait de sa position géographique et géologique, l'Islande bénéficie de sources de chaleur multiples. L'île est une partie émergée de la dorsale atlantique, de plus elle est située sur un point chaud.

#### Doc 10a Répartition des champs géothermiques en Islande



#### Doc 10b Exploitation

Les ingénieurs islandais sont devenus experts dans l'exploitation géothermique de leur site. Ils utilisent la chaleur de la Terre comme énergie nationale.

Grâce aux progrès techniques et à la technologie, tous les bâtiments publics, les piscines, les serres de fruits et légumes et même certains trottoirs de Reykjavík sont chauffés grâce à la géothermie. Au total c'est 85 % de la population qui est chauffée par géothermie.

Les usines géothermiques sont visibles près des sources. Elles sont reconnaissables au dégagement d'intenses nuages de vapeur.

Au-delà du chauffage, les Islandais exploitent aussi la géothermie pour créer de l'électricité. Il existe trois centrales électriques comme celle de Svartsengi qui fournissent plus de 20 % de la production électrique du pays.

### Doc 10c L'avenir

L'exploitation des richesses naturelles du pays permet à l'Islande d'être classée parmi les pays les moins pollués au monde. Elle n'a pas de centrale nucléaire.

Un des projets de l'Islande est d'utiliser au mieux de ces ressources sans les épuiser, de créer de nouvelles technologies d'utilisation des ressources naturelles pour se passer, à terme, des énergies fossiles telles que le pétrole.

1. En quoi la position géologique de l'Islande lui confère-t-elle un intérêt géothermique ?
2. Quelle est la différence entre géothermie à haute et à basse température ?
3. Comment sont situés les champs (zones d'exploitation) de géothermie ?
4. Quels sont les intérêts de la géothermie par rapport aux énergies fossiles telles que le pétrole ?

## 9 LA DÉCOUVERTE DE YELLOWSTONE

★★★ 40 min ▶ P. 215

Le **parc de Yellowstone**, situé dans le Wyoming, le Montana et l'Idaho, est le premier parc national des États-Unis, créé en 1872. Il est célèbre pour sa faune très variée et ses phénomènes géothermiques. Il contient deux tiers des **geysers**\* de la planète, des fumerolles et de nombreuses sources chaudes. L'une des figures emblématiques du parc est le « Old Faithful » le deuxième geyser le plus important au monde après le Strokkur qui se situe en Islande.

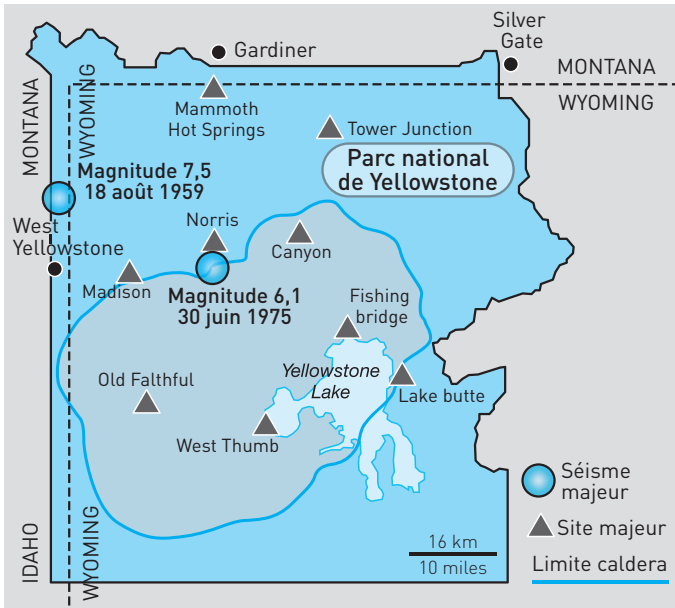
À partir du milieu des années 1960, les scientifiques ont réexaminé de près la géologie de Yellowstone, mais ils ne s'attendaient nullement à ce qu'ils allaient découvrir. Jusqu'à présent, on pensait qu'il s'agissait d'un site hydrothermal comme il y en avait en Islande, mais qu'il n'était pas associé à un volcan.

Le géologue Bob Christiansen et son équipe examinèrent le sous-sol de Yellowstone et mirent en évidence d'importantes traces de cendres compactes qui s'étendaient sur une épaisseur de 30 cm. Elles pouvaient être le produit de l'activité d'un volcan aujourd'hui disparu, mais il n'y en avait plus aucune trace : cratère ou **caldera**\*\* . Celle-ci existe, mais sa taille englobe pratiquement tout le parc, ce qui ne permet pas de la voir depuis le sol. Elle est visible sur la carte du parc de Yellowstone (**document 11**).

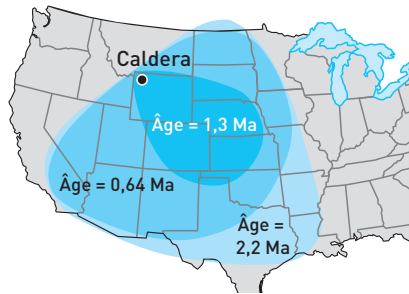
\* Source chaude des champs volcaniques jaillissant en panaches à intervalles réguliers lorsqu'en profondeur la pression de vapeur d'eau dépasse un certain seuil.

\*\* Ou caldeira : mot d'origine portugaise signifiant chaudron, désignant un cratère géant de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres, à contour circulaire ou elliptique. Ces dépressions sont produites par l'effondrement de la partie centrale du volcan, la chambre magmatique sous-jacente ayant été en partie vidée par des éruptions.

## Doc 11 Carte du parc de Yellowstone



## Doc 12 Âges et extensions des cendres issues du volcan Yellowstone



1. Quels sont les indices de volcanisme donnés par les documents ?
2. Pourquoi parle-t-on de super-volcan ?
3. En décembre 2009, des **études sismiques** ont permis de mettre en évidence la présence d'une anomalie thermique sous Yellowstone représentée sur le **document 13**.

Pourquoi utiliser la vitesse des ondes sismiques pour repérer des différences de température dans le globe ?

4. Que révèle l'étude du **document 13** ?

5. Le site de Yellowstone est très étudié, car la présence d'une chambre magmatique gigantesque située à une dizaine de kilomètres en dessous de la surface pourrait entraîner une nouvelle éruption. Les fumerolles, les sources hydrothermales et les geysers que l'on observe un peu partout à travers le parc représentent des fissures et des cheminées très localisées dans la caldera à travers lesquelles

le super volcan « fuit » et libère lentement son excès de pression. Chaque année, toute la région subit en outre des centaines de secousses sismiques dont l'intensité est très variable, mais en moyenne relativement faible.

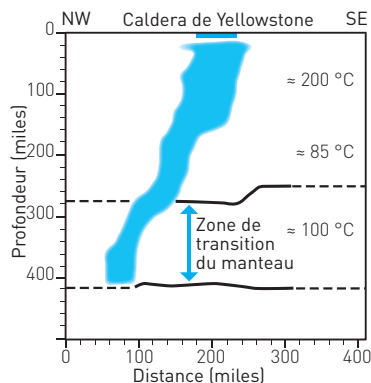
Des études GPS ont montré des déplacements verticaux au niveau de la caldera et l'enregistrement de l'activité sismique est fait en continu. Les résultats de ces études sont reportés dans le **document 14**.

De combien de centimètres s'est élevé le sol de la caldera entre 1970 et 1980 ? Quel peut-être le mécanisme à l'origine de ce soulèvement ?

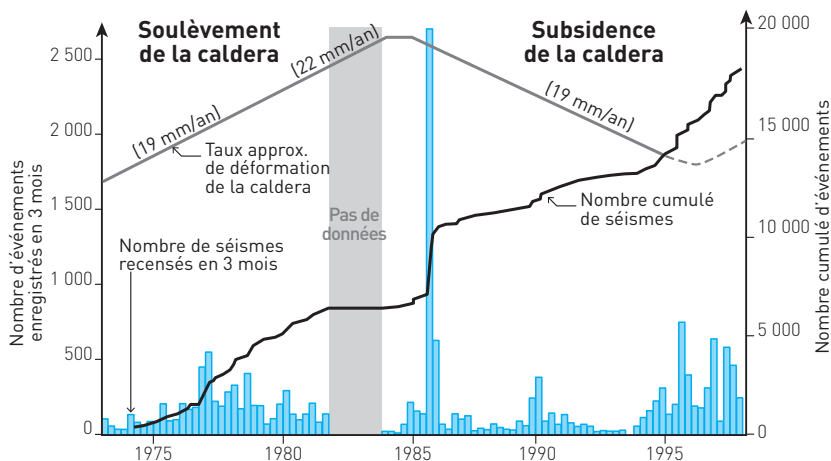
6. Quel indice apporte l'étude des séismes ?

7. L'élévation est-elle continue ? Comment l'expliquer ?

### Doc 13 Anomalie thermique de Yellowstone (1 mile = 1,6 km)



### Doc 14 Activité sismique et déformation de la caldera de 1970 à 2000



## CONTRÔLES

### 10 TOMOGRAPHIE AU NIVEAU DE L'ISLANDE ★★★ 30 min ▶ p. 216

L'Islande est une île au volcanisme intense. Il existe deux hypothèses pour expliquer l'origine de cette activité : un magmatisme de dorsale océanique ou un magmatisme de point chaud.

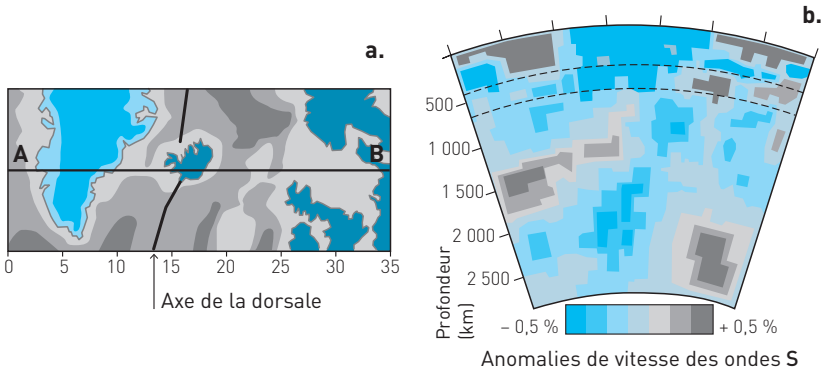
D'après le document 15, expliquez quelle est l'hypothèse la plus probable.

Il faut valider les hypothèses à partir de l'étude des anomalies thermiques et de la position géographique de l'Islande.  
Voir Savoir-faire, Compétence 1.

#### Doc 15 Profil tomographique sous l'Islande

a. Localisation de la coupe AB.

b. Profil selon la coupe AB.



### 11 EXEMPLE FRANÇAIS DE GÉOTHERMIE ★★★ 45 min ▶ p. 217

#### I. Première partie

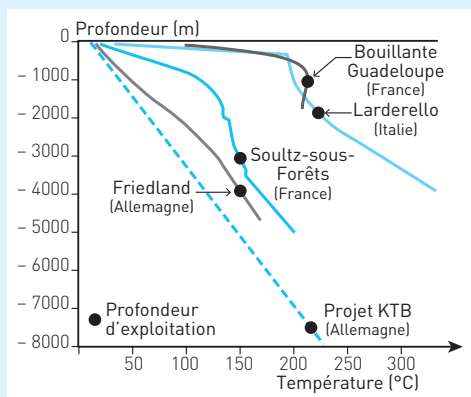
Après vingt-deux années de recherches et de travaux, le site pilote en géothermie profonde de Soultz-sous-Forêts produit de l'électricité qui suffit à alimenter un village de 1 500 habitants grâce à la chaleur des roches du sous-sol. Le **document 16** montre les géothermes de plusieurs sites de géothermie remarquables au niveau mondial, dont celui de Soultz-sous-Forêts.

D'après l'étude du graphique du **document 16**, dites si les phrases suivantes sont correctes ou erronées. Dans ce dernier cas modifiez-les pour qu'elles soient justes.

1. La température augmente en fonction de la profondeur dans tous les sites.
2. À 1 kilomètre de profondeur, la température est de plus de 100 °C pour tous les sites.



### Doc 16 Géothermes comparés de sites de géothermies remarquables



3. L'augmentation de la température est proportionnelle à celle de la profondeur.
4. Le gradient géothermique du projet KTB est constant.
5. Le gradient géothermique des autres sites est plus important en surface.
6. Les forages d'exploitation sont effectués à la même profondeur pour tous les sites.
7. La température de la roche exploitée est toujours la même.
8. Un forage de 5 000 mètres de profondeur au niveau du site de Soutz-sous-Forêts permet d'avoir une température de la roche de 200 °C.
9. Le site le plus intéressant est celui de Bouillante.

### II. Deuxième partie

Le site géothermie profonde de Soutz-sous-Forêts est localisé dans le fossé rhénan.

D'après l'étude des **documents 17 et 18**, expliquez l'origine de l'intérêt géothermique de Soutz-sous-Forêts.

Le **Moho** ou discontinuité de Mohorovicic est la limite entre la croûte terrestre et le manteau supérieur.

### III. Troisième partie

Une nouvelle phase de forage a permis d'atteindre 5 000 m de profondeur à Soutz-sous-Forêts.

À 5 000 m de profondeur, l'eau circule dans les fractures naturelles des roches dont la température est voisine de 200 °C. Elle est pompée (4) et remontée sous pression ensuite en surface (1), avec une température qui avoisine les 180 °C. Elle passe par un système d'échangeurs de chaleur (2) avant de rejoindre son milieu d'origine par l'intermédiaire du puits d'injection (3). Là,

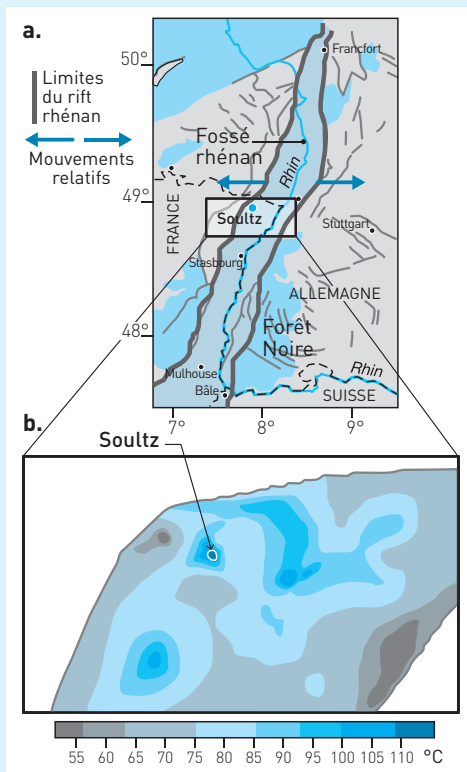
elle se réchauffe au contact des roches avant d'être à nouveau aspirée quelques jours ou quelques mois plus tard. L'eau est réinjectée dans le sous-sol après utilisation, dans un cycle permanent, sans incidence sur l'environnement. En passant par le système d'échangeurs de chaleur (2), l'eau géothermale cède son énergie thermique à un fluide de travail (isobutane) qui va se transformer en vapeur sèche et entraîner une turbine, couplée à un générateur qui produit l'électricité.

Après étude du **document 19**, repérez les phrases incorrectes et corrigez-les.

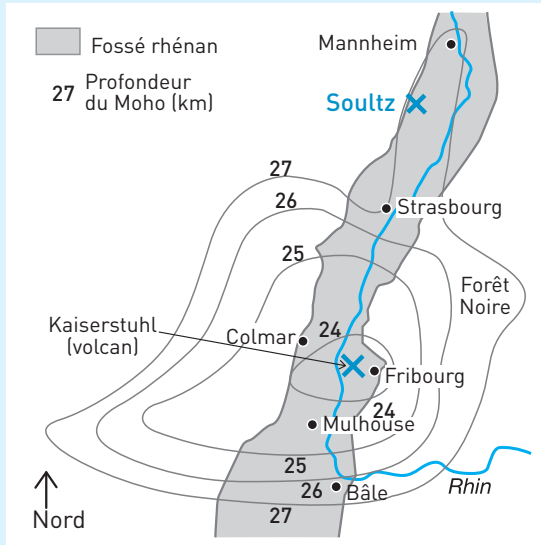
1. Ce site utilise une source d'eau chaude naturelle souterraine pour extraire son énergie thermique.
2. L'eau injectée se réchauffe en circulant dans les roches.
3. La température de l'eau sous pression atteint celle des roches avant d'être pompée.
4. Ce site utilise un forage de faible profondeur.
5. L'eau remonte naturellement en surface sous pression.
6. Cette technique permet de produire de l'électricité.
7. C'est l'eau géothermale qui entraîne une turbine et permet la production d'électricité.
8. C'est un exemple de géothermie sèche.
9. C'est un exemple de géothermie de moyenne énergie.
10. Il s'agit d'une énergie propre.
11. Il s'agit d'une énergie facilement disponible, renouvelable et durable.

### Doc 17 Localisation géographique et caractéristiques thermiques du site de Sultz-sous-Forêts

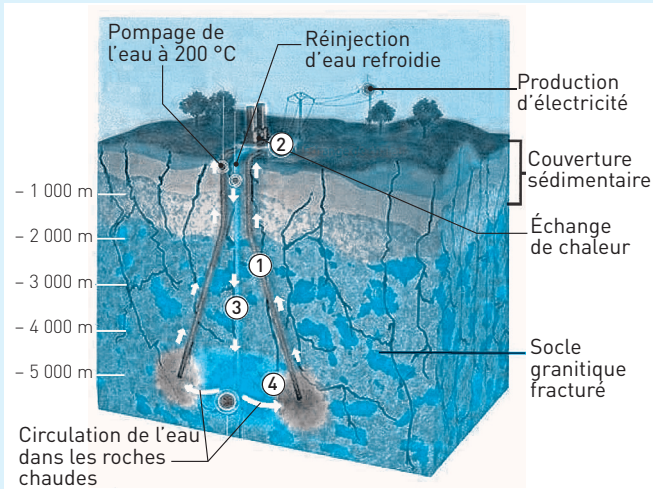
- Carte du bassin rhénan.
- Anomalies thermiques au niveau de Sultz-sous-Forêts.



### Doc 18 Courbes d'égale profondeur (isobathes) du Moho sous le fossé rhénan



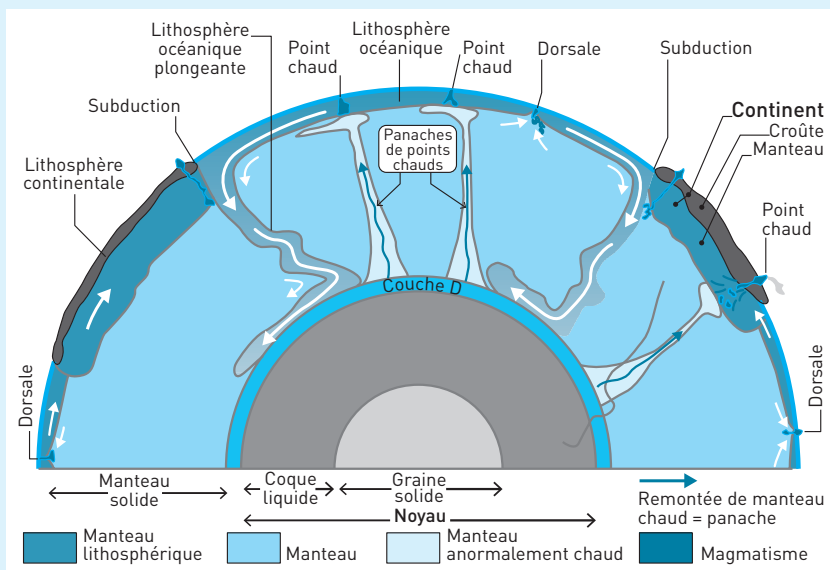
### Doc 19 Site de Soultz-sous-Forêts



## CORRIGÉS

- 1** 1. **a.** Vrai. **b.** Faux. Elle entraîne une remontée de matière **chaude**. **c.** Vrai. **d.** Faux. Elle répartit la chaleur par **mouvement de matière chaude** et non par contact comme la conduction.
2. **a.** Vrai. **b.** Vrai. **c.** Faux. Il y a une anomalie tomographique **négative**, car les ondes sismiques sont ralenties. C'est l'anomalie thermique qui est positive. **d.** Vrai.
3. **a.** Vrai. **b.** Faux. **c.** Vrai. Les péridotites anormalement chaudes remontent à l'état solide, la fusion partielle pour former le magma ne se fait que près de la surface. **d.** Vrai. Les volcans de point chaud sont alignés car la plaque sur laquelle ils sont créés au fur et à mesure se déplace sur le **point chaud fixe**.
4. **a.** Vrai. Il y a une anomalie thermique **négative**. **b.** Vrai. **c.** Vrai. C'est le refroidissement de la plaque océanique en vieillissant qui provoque l'augmentation de sa densité. Lorsque sa densité est supérieure à celle de l'asthénosphère il y a plongement. **d.** Faux : la plaque océanique **plonge car elle est refroidie**.
5. **a.** Vrai. **b.** Faux. Elle est possible dans des régions non magmatiques car elle utilise des gradients géothermiques même faibles. **c.** Faux. Elle permet de produire de la chaleur dans tous les cas, mais de l'électricité **seulement si** la quantité d'énergie thermique prélevée est suffisante, c'est le cas de la géothermie privilégiée. **d.** Vrai.
- 2** 1. La casserole est chauffée par **conduction** : la base de la casserole est chauffée directement par contact avec la plaque chauffante.
2. L'eau est chauffée par **conduction** : l'eau est chauffée au contact de la base de la casserole chaude.
3. L'eau est chauffée par **convection** : l'eau chaude remonte vers la surface entraînant un mouvement de convection répartissant la chaleur.
4. La cuillère est chauffée par **conduction** : la cuillère est chauffée au contact de l'eau et la chaleur se propage dans toute la cuillère par conduction. Cette conduction est plus importante dans une cuillère en métal que dans une cuillère en bois.
5. L'air est chauffé par **convection** : la vapeur d'eau émise par l'eau monte et chauffe l'air par convection.

### 3 Doc 20 Schéma légendé



4 1. D'après les graphiques a et b le flux géothermique moyen de  $50 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  correspond à un plancher océanique de 110 Ma et un socle continental de 250 Ma.

2. La valeur du flux géothermique mesuré dans la zone d'origine du plancher océanique est la plus forte, elle est d'au moins de  $240 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Cette zone est celle de la dorsale où le plancher océanique est créé par accréation.

3. La valeur très élevée ou anomalie thermique positive de la dorsale est due à la remontée de péridotites par convection mantellique qui accentue la déperdition d'énergie géothermique en surface.

4. Le flux géothermique diminue rapidement au cours du temps, passant de  $240$  à  $80 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  en 25 Ma, puis plus lentement à  $50 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  en 100 Ma. Ceci est dû au refroidissement du plancher océanique au cours du temps en fonction de son éloignement de la dorsale.

5. Les conséquences de ce phénomène de refroidissement sont une augmentation de la densité de la plaque océanique en vieillissant, jusqu'à être plus dense que l'asthénosphère sous-jacente. Alors, elle plonge, ce qui entraîne une subduction.

6. La comparaison de l'évolution des flux géothermiques océaniques et continentaux montre que dans les deux cas le flux géothermique diminue lors du vieillissement de la plaque. La différence réside dans la valeur du flux à l'origine qui est très important pour le milieu océanique avec  $240 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  et beaucoup plus faible pour le milieu continental avec  $75 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

5 1. Faux. Les zones en bleu foncé montrent une vitesse des ondes sismiques nettement **inférieure** à la moyenne, puisqu'il y a anomalie négative des vitesses.

2. Vrai.

3. Faux. Une anomalie négative de la vitesse des ondes P signifie que ces ondes se propagent dans un milieu plus **chaud**, car les ondes sont ralenties en milieu plus chaud ou moins dense.

4. Faux. Une anomalie négative de la vitesse des ondes P correspond donc à une anomalie thermique **positive**.

5. Vrai.

6. Faux. Au niveau des dorsales l'anomalie **négative** (en bleu) des vitesses des ondes montre la présence d'une anomalie thermique positive due à la présence de magma plus chaud.

**6** **Analyse** : Sous l'Himalaya l'anomalie des vitesses des ondes sismiques est fortement positive (+ 1,5 %) sur une bande orientée sud-nord (B-A) jusqu'à 600 km de profondeur.

**Interprétation** : Les ondes accélèrent dans les milieux plus denses et plus froids. Il existe une zone anormalement froide et dense qui plonge vers le nord sous la plaque asiatique. C'est une anomalie thermique négative. Ce sont les caractéristiques d'une lithosphère océanique en subduction. C'est la plaque indienne qui subducte sous la plaque asiatique.

**Analyse** : Les séismes sont surtout présents en surface, et s'enfoncent jusqu'à seulement 300 km de profondeur au contact des deux plaques. Il n'y a pas d'activité volcanique. Il y a seulement une zone d'anomalie sismique négative autour de 400 km de profondeur sous la plaque asiatique.

**Interprétation** : Les ondes ralentissent dans les milieux plus chauds. Il existe une zone d'anomalie thermique positive qui correspondrait à la présence de magma lié à une subduction. Cependant comme les autres indices de la subduction – séismes profonds et volcanisme actif – sont absents, on en déduit que cette subduction est ancienne.


**Conclusion** : L'Himalaya est une zone d'anomalie thermique négative qui montre une subduction ancienne. L'océan présent entre l'Asie et l'Inde a totalement disparu par subduction. Actuellement les plaques asiatique et indienne toutes deux continentales sont en collision.

**7** **1. Analyse des données** : La carte donne la température des roches du sous-sol à 1 500 m de profondeur et on sait que la température de surface est de 15 °C. On peut donc calculer l'élévation de cette température sur les 1 500 m, et comme elle est linéaire la reporter en °C par km.

**Calculs**

– Zone à 30 °C : élévation de 15 °C en 1 500 m de profondeur, donc un gradient géothermique de  $\frac{15}{1,5} = 10$  °C/km.


- Zone à 50 °C : élévation de 35 °C en 1 500 m de profondeur, donc un gradient géothermique de 23,3 °C/km.
- Zone à 70 °C : élévation de 55 °C en 1 500 m de profondeur, donc un gradient géothermique de 36,6 °C/km.
- Zone à 90 °C : élévation de 75 °C en 1 500 m de profondeur, donc un gradient géothermique de 50 °C/km.
- Zone à 130 °C : élévation de 115 °C en 1 500 m de profondeur, donc un gradient géothermique de 76,6 °C/km.

2.  Une production d'électricité en géothermie sèche ou de moyenne énergie nécessite une température minimale de 180 °C des roches.

Calculs  $\left( \text{profondeur} = \frac{\text{température}}{\text{gradient}} \right)$

- Zone à 30 °C : gradient géothermique de 10 °C/km, il faut donc forer à plus de 18 km pour avoir une température de 180 °C. Ceci n'est pas sûr, car on estime l'élévation de la température linéaire sur seulement 5 km.
- Zone à 50 °C : gradient géothermique de 23,3 °C/km, il faut donc forer à plus de 7,7 km.
- Zone à 70 °C : gradient géothermique de 36,6 °C/km, il faut donc forer à plus de 6 km.
- Zone à 90 °C : gradient géothermique de 50 °C/km, il faut donc forer à plus de 3,6 km.
- Zone à 130 °C : gradient géothermique de 76,6 °C/km, il faut donc forer à plus de 2,35 km.

Les régions les plus propices sont celles où le forage nécessaire est le moins profond, car le moins onéreux. C'est le cas de l'Alsace et du Massif central.

 Ces zones, bassin alsacien et bassin de Limagne, sont des bassins d'effondrement sous lesquels il y a remontée de l'asthénosphère et donc une anomalie thermique positive.

**8** 1. La dorsale tout comme le point chaud sont des zones d'anomalie géothermique positive, où le sous-sol est anormalement chaud. En effet le magmatisme intense de la dorsale qui forme un alignement de volcans et la remontée de magma liée au point chaud constituent une zone volcanique intense, source de chaleur.

2. **La géothermie haute température** ou haute énergie exploite des sources hydrothermales très chaudes (températures supérieures à 200 °C) ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Dans le cas de l'Islande, c'est l'eau circulant naturellement dans les laves chaudes qui est prélevée. Elle est surtout utilisée pour **produire de l'électricité** dans des centrales comme celle de Svartsengi.

La **géothermie de basse température** ou de basse énergie exploite des nappes d'eaux profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux tem-



pératures situées entre 30 et 100 °C. Cette eau est pompée et sert principalement pour le **chauffage** urbain.

**3.** Les champs de géothermie à haute température sont situés le long de l'axe principal du rift (effondrement central de la dorsale), au niveau de la zone de laves les plus jeunes du Quaternaire récent et donc les plus chaudes. Leur énergie permet la production d'électricité.

Ensuite les champs de géothermie à basse température sont situés symétriquement entre 50 et 400 km du rift. Plus les laves sont anciennes, du Quaternaire ancien, mais aussi du Tertiaire, plus elles ont refroidi et moins elles sont exploitables. Leur énergie ne permet que le chauffage.

**4.** La géothermie est une ressource d'énergie **renouvelable** car perdue en continu par la surface de la Terre. Elle est **pratiquement inépuisable**, car l'énergie utilisée ne représente que quelques pour-cent de l'énergie perdue par la Terre et ceci pour des milliards d'années encore. L'épuisement de la ressource est possible si le rythme d'exploitation excède celui du renouvellement des eaux chaudes.

C'est une énergie **propre** car son utilisation ne produit pas de gaz à effet de serre comme le pétrole, ni de déchets toxiques comme le nucléaire. C'est une énergie fiable et stable dans le temps, car elle ne dépend pas des conditions atmosphériques ou conditions climatiques comme l'énergie solaire.

Les intérêts sont surtout écologiques. Il faut aussi que ce système soit rentable économiquement, ce qui n'est pas encore toujours le cas à cause du faible nombre d'études et d'exploitations. Si l'énergie prélevée est gratuite, les coûts d'investissement et de maintenance sont, en revanche, très élevés.

**9** **1.** Les indices du volcanisme sont les manifestations d'une source de chaleur liée au volcanisme comme les geysers, les fumerolles. C'est aussi la présence d'une couche de 30 centimètres d'épaisseur de cendres dues à des éruptions volcaniques.

**2. Analyse du document 11 :** Si, du sol, Bob Christiansen n'était pas parvenu à localiser la caldera, c'est parce qu'elle englobe pratiquement tout le parc. La caldera forme une dépression entre les chaînes de montagnes et s'étend sur une superficie gigantesque de 70 sur 30 km du NE au SO à travers le Yellowstone.

**Analyse du document 12 :** Il y a eu trois éruptions explosives avec dispersion de cendres sur une très grande surface. Il y a 2,2 millions d'années les cendres ont recouvert les deux tiers des États-Unis actuels, ce qui montre l'importance du matériel magmatique.

**Conclusion :** La taille de la caldera, la quantité énorme de matériel volcanique, la force des explosions éruptives montrent l'importance de ce volcan. On parle donc de super volcan.

**3.** Les ondes sismiques se déplacent rapidement à travers les roches froides et plus lentement à travers les roches chaudes. Les mesures de vitesse des ondes sismiques permettent d'obtenir une image en trois dimensions des milieux qu'elles traversent. Un ralentissement des ondes sismiques ou anomalie négative de vitesse des ondes sismiques correspond à une anomalie thermique positive.

**4. Analyse :** Les images obtenues à partir des données sismiques révèlent la présence d'une zone d'anomalie thermique positive, large de 40 miles (65 km), qui descend de la surface en formant un angle de 60° et s'étire sur une distance de 240 km en direction de l'ouest-nord-ouest pour plonger à une profondeur de 400 miles (650 km) à hauteur de la limite entre les états de Montana et de l'Idaho, limite au-delà de laquelle ne peut aller l'imagerie sismique.

**Interprétation :** Cette zone d'anomalie thermique positive, à l'origine très profonde, est due une remontée de matériel très chaud. La profondeur, supérieure à 80 km, indique que ce sont des péridotites du manteau. Il y a donc un panache mantellique lié à un **point chaud**.

**5.** Le taux approximatif de déformation sur cette période est de 19 mm par an, sur 10 ans il y a donc élévation de 19 cm.

Ce bombement traduit le gonflement de la chambre magmatique située à une dizaine de kilomètres au-dessous de la surface. Remplie de magma et de gaz dissous à haute pression, elle pousse lentement le plateau de la caldera vers le haut.

**6.** Les séismes sont très courants mais peu intenses, avec parfois plus de 500 événements en 3 mois. Ils mettent en évidence des mouvements et des fracturations des roches. La croûte, poussée vers le haut sous la pression des gaz, se bombe et se fracture.

**7. Analyse du document 14 :** Après 1985, le déplacement de la surface de la caldera est inversé, il y a subsidence et donc affaissement à une vitesse de 19 mm/an. Les années 1985 et 1986 sont remarquables par la fréquence des séismes (plus de 2 500 en 3 mois fin 1985).

**Interprétation :** Depuis 1985, le plateau de la caldera s'affaisse, ce qui montre une baisse de la pression dans la chambre magmatique à cause de la perte de gaz par les geysers, et les fumerolles. La poussée depuis la chambre magmatique diminue et la surface du sol s'affaisse.

#### Information complémentaire

Le soulèvement de la caldera ayant repris de plus belle depuis 2004, certains géologues pensent à des signes avant-coureurs d'une éruption. Celle-ci serait catastrophique pour les États-Unis mais aussi pour le reste du monde, en perturbant durablement le climat global.

**10**

Il faut partir de chacune des hypothèses et rechercher des arguments dans les documents présentés.

## I. Hypothèse de la dorsale émergée

### Analyse du document 15a

L'Islande est positionnée sur l'axe de la dorsale médio-océanique atlantique.

### Analyse du document 15b

Il y a une anomalie tomographique négative très importante (- 0,5 %) au niveau de l'Islande jusqu'à une profondeur de 700 km, il existe donc une zone anormalement chaude. De part et d'autre de cette zone, l'anomalie est positive en surface.

**Interprétation :** L'anomalie thermique positive peut être due à la présence d'une chambre magmatique sous la dorsale où la pression est anormalement faible. Les anomalies thermiques négatives sont dues au refroidissement des plaques océaniques lors de leur vieillissement. La fusion partielle des péridotites et donc la production de magma est due à une dépression subie par le matériel mantellique qui remonte dans l'asthénosphère.

## II. Hypothèse du volcanisme de point chaud

**Analyse du document 15b :** Il existe aussi une zone d'anomalie négative des vitesses des ondes sismiques sous l'Islande, qui se prolonge jusqu'à 2 900 km de profondeur. Elle montre la présence d'une partie du manteau anormalement chaude et cela depuis la limite manteau/noyau (à 2 900 km de profondeur).

**Interprétation :** Cette zone plus chaude présente les caractéristiques d'une remontée de matériel mantellique très chaud depuis une zone très profonde et caractérise le mécanisme de **point chaud**. La fusion partielle des péridotites et donc la production de magma est due à une élévation de la température dans l'asthénosphère.

**Conclusion :** Il existe des arguments en faveur de chacune des deux hypothèses. L'Islande serait le résultat de la présence d'une dorsale et d'un point chaud. Le volcanisme de dorsale est normalement sous-marin, mais ici il affleure à cause du point chaud, on peut parler de **dorsale émergée**.

### 11 I. Première partie

1. Vrai.
2. Faux. Pour les sites de Friedland (60 °C) et le projet KTB (50 °C) en Allemagne, la température est inférieure à 100 °C.
3. Faux. C'est vrai seulement au niveau du site KTB, car le géotherme est une droite.
4. Vrai. Le gradient géothermique représente l'augmentation de la température en fonction de la profondeur en °C par km. Si le géotherme est une droite le gradient est toujours le même. Il est dans ce cas d'environ 30 °C/km.
5. Vrai. La température augmente plus en surface surtout pour les sites de Bouillante et Larderello. Le gradient géothermique y atteint 200 °C/km.
6. Faux. Le forage de bouillante atteint 1 km, celui de Larderello presque 2 km, Soultz 3 km, Friedland 4 km et le projet KTB plus de 7 km.
7. Faux. Pour Soultz et Friedland elle est proche de 150 °C, pour les trois autres elle est de plus de 200 °C.
8. Vrai. Sur le géotherme on lit bien qu'à 5 km de profondeur, la température du sous-sol atteint 200 °C.
9. Vrai. Le forage permet d'accéder à des roches à plus de 200 °C, à seulement 1 km de profondeur.

## II. Deuxième partie

**Analyse du document 17a :** Le site de Soultz se trouve en bordure du fossé rhénan au nord de Strasbourg. Il y a à ce niveau un mouvement de divergence symbolisé par les flèches bleues.

**Interprétation :** Le site de Soultz est localisé dans une zone de divergence, dans un bassin d'effondrement ou rift. Il a été vu en première S qu'une zone de distension au

sein d'une plaque continentale est à l'origine d'une dorsale et de la création de plaque océanique. Il y a donc amincissement de la plaque continentale et remontée de l'asthénosphère. Ce doit être le cas au niveau du bassin rhénan.

**Analyse du document 17b :** Il existe une anomalie thermique positive très importante au niveau de Soultz et dans l'axe du bassin rhénan. Plus on s'éloigne de l'axe, plus la température diminue.

**Interprétation :** L'anomalie thermique serait due à la remontée de l'asthénosphère plus chaude au niveau de l'axe du rift.

**Analyse du document 18 :** Le Moho est la limite entre la croûte et le manteau supérieur. Le site de Soultz se trouve entre 26 à 27 km au-dessus du Moho alors qu'en moyenne les croûtes continentales ont une épaisseur de 35 km. Il y a amincissement de la croûte au niveau du rift.

**Interprétation :** Dans les zones de divergence l'amincissement de la croûte s'accompagne d'une remontée de l'asthénosphère. C'est cette remontée qui serait à l'origine de l'anomalie thermique de cette zone, car du matériel chaud (péridotites du manteau) normalement plus profond est présent plus proche de la surface et dissipe plus d'énergie thermique.

### **Bilan**

La remontée de l'asthénosphère due à la distension au niveau du fossé rhénan crée une anomalie thermique positive importante. Elle permet la présence de roches **très chaudes à Soultz-sous-Forêts qui peuvent être exploitées en géothermie.**

### **III. Troisième partie**

1. Faux. Ce site utilise l'énergie thermique du sous-sol. De l'eau est injectée dans la roche pour être chauffée à son contact, puis utilisée.
2. Vrai.
3. Faux. La température de l'eau sous pression atteint « seulement » 180 °C au contact de roches à 200 °C.
4. Faux. Le forage fait 5 km de profondeur, ce qui est très important.
5. Faux. L'eau est pompée.
6. Vrai.
7. Faux. L'eau géothermale transmet son énergie thermique à un fluide (isobutane) qui va passer en phase gazeuse. Ce sont ces gaz qui entraînent une turbine couplée à un générateur et permettent la production d'électricité.
8. Vrai. C'est l'énergie thermique de roches qui est utilisée pour chauffer de l'eau.
9. Vrai. L'eau est assez chaude (180 °C) pour permettre de produire de l'électricité.
10. Vrai. Cette énergie ne produit ni de déchets ni de gaz à effet de serre.
11. Faux. Cette énergie est durable et renouvelable, mais son exploitation nécessite des forages importants et onéreux. Elle n'est pas facilement disponible, et parfois son exploitation n'est pas rentable.

## 9 La réaction immunitaire

La varicelle se déclare à trois mois, et l'état du bébé empire rapidement. Il est transporté en urgence à l'hôpital. Diagnostic : DICS-X, une maladie génétique très rare qui se traduit par l'absence de lymphocytes T. Le bébé, protégé par les anticorps maternels pendant les trois premiers mois, doit être placé dans une chambre où tout est stérile ; il ne peut respirer, manger, toucher tout ce qui pourrait apporter un microbe. Il est devenu un « bébé bulle ». Seule la thérapie génique peut apporter une solution.

Sans système de défense, un être vivant ne peut pas survivre.

### I AGRESSEURS ET DÉFENSEURS

2 m<sup>2</sup> de peau, 250 m<sup>2</sup> de muqueuse pulmonaire, 300 m<sup>2</sup> de muqueuse intestinale, telles sont les surfaces qui séparent le soi (notre population de cellules) du non-soi (le milieu extérieur où les microorganismes sont omniprésents). Une lésion de la peau ou d'une muqueuse, c'est une porte ouverte pour la pénétration de ces microorganismes, c'est aussi un signal qui déclenche une réponse de notre système immunitaire...

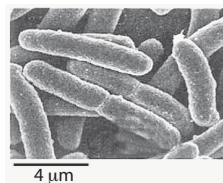
#### 1. Quelques agresseurs

■ Les **bactéries** sont des procaryotes avec un ADN présent dans le cytoplasme, leur membrane plasmique est entourée par une paroi résistante (**document 1**). Les bactéries peuvent se multiplier et envahir l'organisme (méningites), se multiplier localement et produire des toxines (diphthérie, tétanos...).

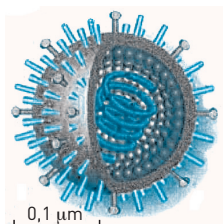
■ Les **virus** (**document 2**) sont responsables de nombreuses maladies : grippe, rhume, hépatite, poliomyélite, rougeole, oreillons...

Le virus de la **grippe** se transmet facilement par voie aérienne. Il se fixe sur les cellules de la muqueuse respiratoire et y injecte son information génétique. La cellule produit de nouveaux virus qui vont bourgeonner, se propager et infecter de nouvelles cellules.

#### Doc 1 Bactérie



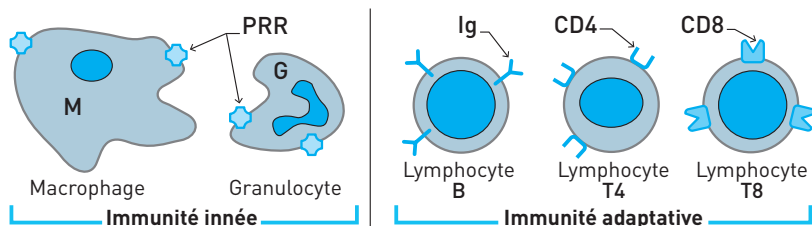
#### Doc 2 Virus



## 2. Principaux défenseurs du soi

Les principaux défenseurs sont les macrophages, les granulocytes et les lymphocytes (**document 3**).

### Doc 3



## II LA RÉPONSE INNÉE, UNE RÉPONSE IMMÉDIATE

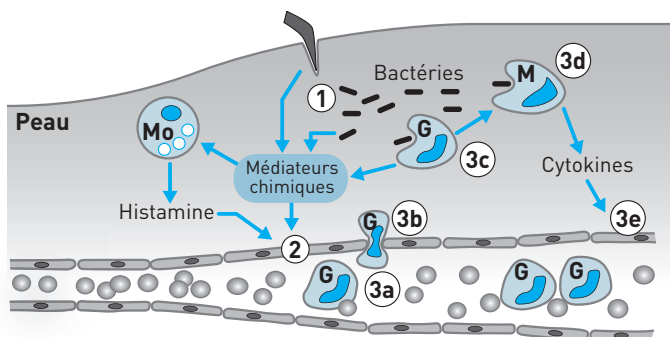
La défense innée ou naturelle est active dès la naissance et immédiatement disponible en cas d'infection. Elle est présente chez les vertébrés et les invertébrés.

### 1. La réaction inflammatoire locale

L'inflammation est une réaction de défense stéréotypée à une agression, elle se manifeste par un gonflement, une rougeur, une douleur et une sensation de chaleur. Elle comporte trois phases principales (**document 4**).

#### Doc 4 Réaction inflammatoire locale

Mo = mastocyte. G = granulocyte. M = macrophage.



■ **Détecter.** La lésion d'un tissu provoquée par une blessure ou par un micro-organisme ① déclenche la formation de médiateurs chimiques par le tissu lésé.

■ **Alerter.** Ces médiateurs chimiques provoquent ② :

- une augmentation du débit sanguin (rougeur et chaleur) et de la perméabilité du vaisseau sanguin, la fuite de liquide sanguin provoque un œdème (gonflement) ;
- la libération d'histamine par les mastocytes, ce qui renforce la vasodilatation.

■ **Éliminer.** Rapidement, des granulocytes adhèrent aux parois du vaisseau ③a), le quittent par diapédèse ③b) et se déplacent vers la zone lésée, guidés par les

médiateurs chimiques. Les granulocytes phagocytent les microorganismes (3c) et libèrent des médiateurs chimiques qui attirent les macrophages et renforcent l'inflammation. Les macrophages phagocytent les microorganismes (3d) présents et libèrent des cytokines, médiateurs chimiques (3e) qui renforcent l'inflammation.

## 2. La réaction inflammatoire aiguë

Si les microorganismes résistent à la phagocytose, la réaction se prolonge par une phase aiguë : la température corporelle augmente pour inhiber la croissance des pathogènes, des médiateurs sont libérés pour activer la défense adaptative.

### L'essentiel

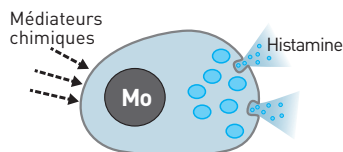
La lésion de la peau ou d'une muqueuse provoque une inflammation, réaction de défense stéréotypée à une agression. Les médiateurs chimiques libérés augmentent localement la circulation sanguine, stimulent la diapédèse des phagocytes et l'élimination des microorganismes par phagocytose.

## 3. Approfondissement

### ■ Libération d'histamine

L'histamine est présente dans les granulations des mastocytes. Les médiateurs chimiques provoquent une dégranulation : l'histamine est libérée (document 5).

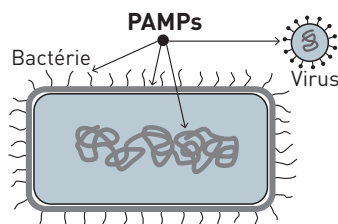
#### Doc 5



### ■ Reconnaissance des bactéries et des virus

Macrophages et granulocytes peuvent reconnaître la présence de bactéries et de virus grâce aux récepteurs **PRR** (*Pattern Recognition Receptor*) membranaires ou cytoplasmiques. Ces récepteurs de l'immunité innée peuvent reconnaître les **PAMPs** (*Pathogen Associated Molecular Patterns*) : molécules communes aux parois bactériennes, ADN/ARN, bactérien et viral (document 6).

#### Doc 6



### ■ Destruction des pathogènes par phagocytose

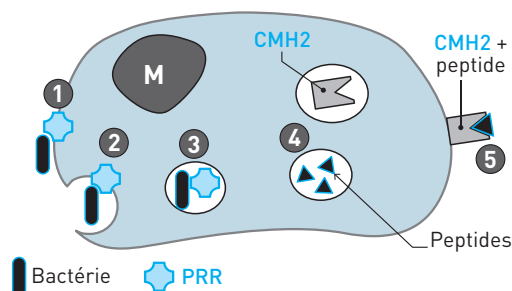
La reconnaissance d'un microorganisme par un PRR (1) entraîne une endocytose de la bactérie (2-3), puis sa digestion (4).

### ■ Présentation de l'antigène

Les peptides formés lors de la digestion (4) sont présentés par le CMH2 aux lymphocytes (5). La défense adaptative est activée (**document 7**).

■ **Des médicaments anti inflammatoires** permettent de réduire l'ampleur de la réaction inflammatoire.

#### Doc 7



#### L'essentiel

La défense innée est immédiate et disponible à la naissance.

- **Acteurs** : macrophages (issus des monocytes sanguins), granulocytes et mastocytes.
- **Cible** : microorganismes, débris de cellules.
- **Reconnaissance des PAMPs** par les récepteurs membranaires **PRR** des phagocytes.
- **Élimination** : phagocytose.

#### Les étapes de la défense innée

1. Reconnaissance de l'agent pathogène par un phagocyte.
2. Déclenchement de la réaction inflammatoire.
3. Élimination par phagocytose.
4. Présentation de l'antigène aux lymphocytes, cellules très spécialisées de la défense acquise.

## III DE LA DÉFENSE INNÉE À LA DÉFENSE ADAPTATIVE

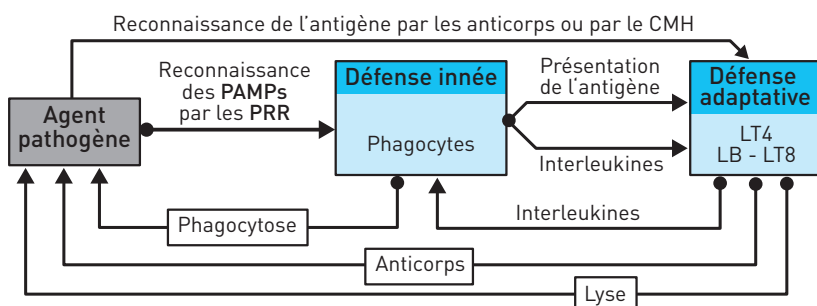
### 1. Introduction

Chez les vertébrés, la défense innée est complétée par une **défense adaptée** à l'antigène. Alors que la reconnaissance par les acteurs de la défense innée est limitée au type de l'agent infectieux par les **PRR** (« bactérie », « virus »), la défense adaptative reconnaît son identité (« bacille du tétanos », « virus H5N1 », « toxine botulinique », « cellule infectée par le **VIH** »...).

La coopération entre les acteurs de ces deux défenses se traduit par des contacts cellulaires (présentation de l'antigène) et des stimulations par les interleukines.



## Doc 8



## 2. Les acteurs de la réponse adaptative : les lymphocytes

■ **Production et spécialisation.** Les lymphocytes B et T sont produits à partir des cellules souches de la moelle osseuse. Les cellules T doivent cependant effectuer une maturation dans le thymus pour devenir lymphocyte T4 ou lymphocyte T8. Ces LB et LT subissent une sélection pour ne pas réagir contre le soi, ce sont des cellules qualifiées de « naïves » car elles n'ont jamais rencontré d'antigène.

■ **Résidence.** Les lymphocytes naïfs circulent rapidement dans le sang et migrent dans les ganglions, organes lymphoïdes qui « filtrent » la lymphe, et dans la rate, organe lymphoïde qui « filtre » le sang. Ces organes lymphoïdes sont les lieux privilégiés d'un contact entre un lymphocyte et un antigène. En l'absence de contact après quelques heures, les lymphocytes naïfs retournent dans la circulation sanguine pour aller coloniser un autre organe lymphoïde. Cette recirculation permanente des lymphocytes naïfs est limitée par une espérance de vie réduite à quelques semaines. Des lymphocytes naïfs sont produits quotidiennement pour remplacer ceux qui disparaissent.

### L'essentiel

Les leucocytes sont des cellules spécialisées dans la défense de l'organisme. Ils sont produits dans la moelle osseuse, et circulent en permanence du sang vers la lymphe, les organes lymphoïdes et les tissus.

## IV LA DÉFENSE ADAPTATIVE, RETARDÉE, MAIS ADAPTÉE À L'ANTIGÈNE

La défense adaptative est retardée : pendant les 5 à 7 jours nécessaires pour qu'elle soit efficace, la défense de l'organisme repose sur la défense innée.

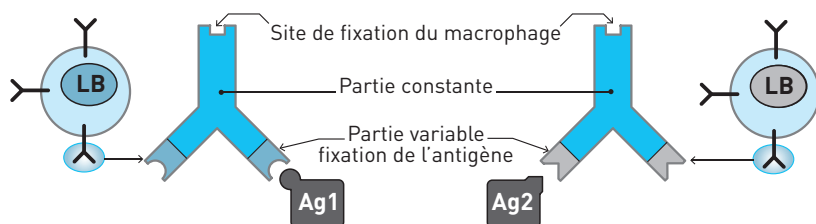
La défense adaptative assure la **reconnaissance** et l'**élimination** des antigènes :

- dans le milieu extracellulaire, grâce aux lymphocytes B ;
- dans le milieu intracellulaire, par les lymphocytes T8.

## 1. Rôle des LB : reconnaître et éliminer le non-soi dans le milieu extracellulaire

### ■ L'anticorps, molécule de reconnaissance de l'antigène

#### Doc 9



La reconnaissance du non-soi présent dans le milieu extracellulaire est assurée par des **anticorps**, aussi appelés **immunoglobulines**. Ces molécules sont exposées à la surface du lymphocyte B. Une immunoglobuline possède une partie constante, commune à tous les anticorps, et une partie variable qui varie selon la molécule reconnue. Celle-ci est appelée **antigène** (*anti* = anticorps, *gène* = qui donne). Un anticorps peut se lier avec un antigène, par complémentarité de forme.

**Un anticorps est spécifique** à un antigène : il existe autant d'anticorps différents que de formes différentes d'antigènes (environ  $10^8$ ).

**Un lymphocyte B ne produit qu'un seul type d'anticorps**, il y a donc autant de LB différents que d'anticorps différents.

#### ■ La spécialisation du lymphocyte B (LB)

La production d'un lymphocyte puis sa différenciation en lymphocyte B se produisent dans la moelle osseuse. Par des mécanismes complexes de réarrangement de gènes, le LB se spécialise dans la production d'un seul type d'anticorps. Des millions de LB différents sont ainsi produits chaque jour. Mais avant de quitter la moelle osseuse se produit une sélection des LB : ceux qui réagissent aux antigènes du soi (molécules produites par l'organisme) sont éliminés. Seuls les LB qui ne réagissent pas contre le soi quittent la moelle osseuse. Ces lymphocytes naïfs circulent par voie sanguine, puis la quittent pour aller dans les organes lymphoïdes (rate, ganglions), lieux de rencontre entre un LB naïf et un antigène.

#### ■ Les différentes étapes de la réponse assurée par les LB

##### – Phase de reconnaissance.

La reconnaissance d'un antigène par un anticorps membranaire active un petit nombre de lymphocytes B naïfs spécifiques. La présentation de l'antigène par une cellule présentatrice d'antigène active des lymphocytes T4 spécifiques.

– **Phase d'amplification et de différenciation.** Les  $LT_4$  activés libèrent des interleukines qui vont stimuler la multiplication clonale des LB activés par l'antigène, puis leur différenciation en lymphocytes mémoire et en plasmocytes.

– **Phase effectrice : la destruction de l'antigène.** Les plasmocytes produisent et libèrent de nombreux anticorps, spécifiques à un type d'antigène, dans le milieu extracellulaire. La fixation d'un anticorps sur l'antigène qu'il a reconnu forme un complexe immun.

La fixation d'un complexe immun sur un récepteur du macrophage permet son élimination par phagocytose. L'anticorps et l'antigène sont alors détruits. Comme un « Kleenex », l'anticorps ne sert qu'une fois.

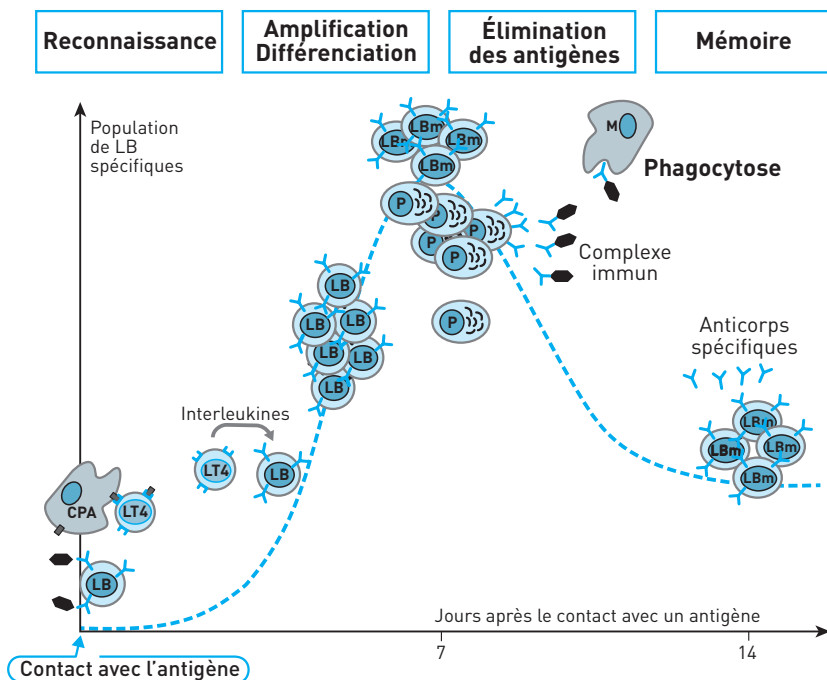
– **La mémoire immunitaire** se traduit par la présence :

– d'anticorps spécifiques à l'antigène qui persistent dans le sang : la personne est séropositive pour cet antigène ;

– de LB mémoire spécifiques à l'antigène qui peuvent vivre plusieurs années. La stimulation d'un LB mémoire par un antigène provoque la libération rapide et massive d'anticorps.

### Doc 10 Élimination de l'antigène

CPA = cellule présentatrice d'antigène. M = macrophage.  $LT_4$  = lymphocyte T4. LB = lymphocyte B. P = plasmocyte. LBm = lymphocyte B mémoire.

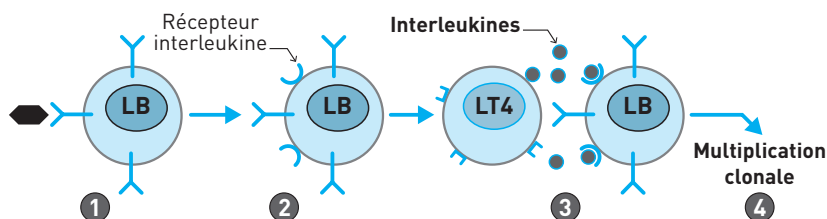


*Remarque* : En détruisant les lymphocytes T4, le virus responsable de l'immuno-déficience humaine (VIH) détruit les amplificateurs de la production d'anticorps : le système immunitaire produit peu d'anticorps, ce qui le rend très vulnérable face aux multiples infections qui peuvent ainsi se développer...

### ■ Approfondissement

– **Interleukines et LB.** La reconnaissance d'un antigène par un anticorps membranaire (1) provoque l'expression de récepteurs à interleukines (2). La fixation sur ces récepteurs des interleukines produites par les LT4 (3) déclenche la multiplication du LB (4).

#### Doc 11



– **Interleukines et macrophages.** Les interleukines libérées par les LT4 stimulent la phagocytose des macrophages.

#### L'essentiel

La défense assurée par les **lymphocytes B** est adaptée à l'antigène, mais retardée.

- **Cible** : molécules et microorganismes présents dans le milieu extracellulaire.
- **Reconnaissance** : par les anticorps spécifiques.
- **Élimination** : formation de complexes immuns éliminés par phagocytose.

#### Les étapes de la réponse adaptative assurée par les LB

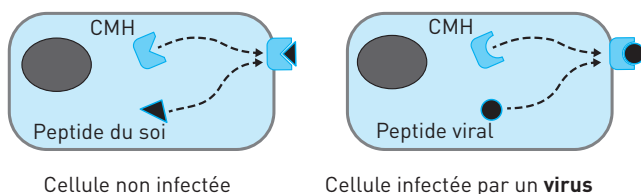
- 1. Reconnaissance** dans un ganglion d'un antigène spécifique par l'anticorps membranaire présenté par un LB.
- 2. Amplification et différenciation.** Les LT4 produisent des interleukines qui stimulent la multiplication clonale des LB activés par un antigène, puis la différenciation des LB du clone en plasmocytes sécrétant d'anticorps ou en LB mémoire.
- 3. Élimination.** Les anticorps circulent dans le milieu extracellulaire, la fixation d'un anticorps sur un antigène forme un complexe immunitaire (anticorps + antigène) qui est éliminé par phagocytose par les macrophages de l'immunité innée.

## 2. Rôle des LT8 : reconnaître et éliminer le non-soi dans le milieu intracellulaire

### ■ Prouver l'appartenance au soi

Ce système de défense repose sur l'inspection des marqueurs du soi. Chaque cellule produit des marqueurs du CMH qui drainent des peptides issus de la dégradation des protéines dans le cytoplasme. Le complexe « CMH + peptide » est exposé sur la membrane. La quasi-totalité des cellules à noyau prouve en permanence son appartenance au soi. Une cellule non infectée n'expose que des peptides du soi. Mais une cellule infectée expose des peptides viraux.

### Doc 12



Cellule non infectée

Cellule infectée par un virus

### ■ La spécialisation du LT8

La maturation du LT dans le thymus se traduit par des mécanismes complexes de réarrangement de gènes qui aboutissent à la production d'un seul type de récepteur CD8 exposé sur la membrane : il devient un LT8 spécifique d'un complexe CMH-peptide. Les LT8 qui exposent un récepteur CD8 capable de se lier à un complexe CMH-peptide du soi sont éliminés. Les autres sont libérés dans la circulation sanguine, avant de la quitter pour gagner les organes lymphoïdes.

### ■ De la reconnaissance à l'élimination de la cellule infectée

– **Phase de reconnaissance.** Dans les ganglions lymphatiques, les LT8 inspectent en permanence les marqueurs CMH des cellules. Une cellule infectée par un virus ne peut donc être reconnue que par un LT8 spécifique au complexe CMH-peptide viral.

– **Phase d'amplification et de différenciation.** La stimulation d'un LT8 activé par les interleukines produites par un LT4 déclenche sa multiplication clonale et sa différenciation en LT cytotoxique.

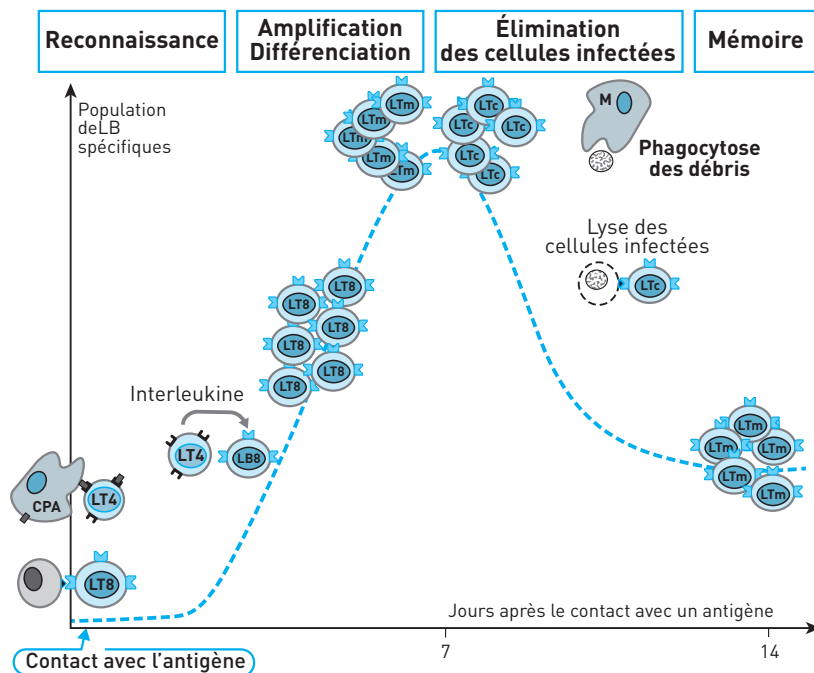
– **Phase effectrice : élimination de la cellule infectée.** Les LT cytotoxiques circulent dans l'organisme et détruisent les cellules reconnues comme infectées. Deux mécanismes interviennent :

- de la perforine est libérée, cette molécule crée un canal sur la membrane de la cellule à détruire qui permet la pénétration d'eau et provoque la rupture de sa membrane ;
- le gène de la mort cellulaire programmée de la cellule infectée est activé : son ADN est découpé, la cellule meurt. Les débris de la cellule détruite sont éliminés par la phagocytose des macrophages de l'immunité innée.

– **Mémoire.** Les LT8 mémoire formés assurent une surveillance spécifique contre une infection par le même virus.

### Doc 13

**CPA** = cellule présentatrice d'antigène. **M** = macrophage. **LT4** = lymphocyte T4. **LT8** = lymphocyte T8. **LTc** = lymphocyte cytotoxique. **LTm** = lymphocyte T mémoire.



#### L'essentiel

La défense assurée par les lymphocytes T8 est adaptée à l'antigène.

- **Cible** : milieu intracellulaire : cellules du soi infectées par un virus, cellules cancéreuses ou étrangères.
- **Reconnaissance** : par les récepteurs spécifiques aux peptides présentés par les CMH des cellules.
- **Élimination** : par lyse de la cellule, puis élimination des débris par phagocytose.

#### Les étapes de la réponse adaptative assurée par les LT8

- 1. Reconnaissance** d'un peptide du non-soi par un récepteur CD8 spécifique et activation du LT8.
- 2. Amplification.** L'activation d'un LT8 par un LT4 provoque sa multiplication clonale, puis sa différenciation en LT cytotoxique. Des LT8 mémoire sont formés, ils assurent l'immunité acquise...
- 3. Élimination.** Le LT cytotoxique lyse la cellule infectée.

## V ÉVOLUTION DU PHÉNOTYPE IMMUNITAIRE AU COURS DE LA VIE

### 1. À la naissance

Au cours de la vie fœtale, des anticorps maternels ont traversé la barrière placentaire.

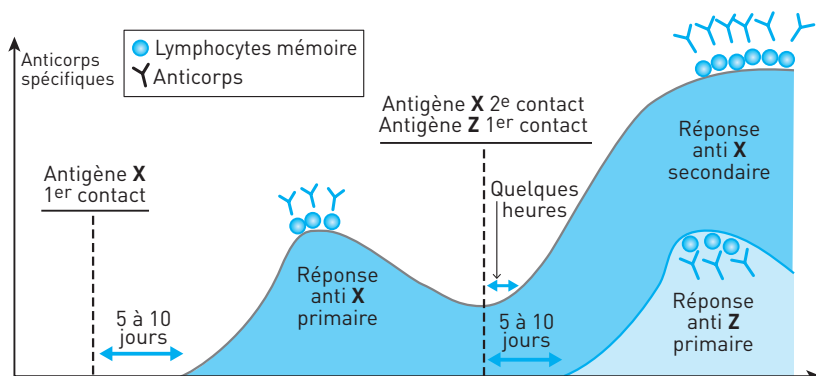
Le nouveau-né possède une panoplie d'anticorps maternels qui vont lui assurer environ trois mois d'immunité, un peu plus en cas d'allaitement par la mère (les anticorps contenus dans le lait maternel passent dans la circulation du bébé). Le système immunitaire inné du nouveau-né est opérationnel, mais son immunité adaptative est réduite aux seuls lymphocytes naïfs qui circulent : aucun lymphocyte mémoire n'a été produit en l'absence d'antigènes pendant la vie in utero.

### 2. De la naissance à deux ans

#### ■ Immunité adaptative naturelle

La rencontre avec un agent pathogène va stimuler les lymphocytes naïfs spécifiques à ses antigènes. Cette première rencontre donne une réponse retardée (5 à 10 jours) et peu importante, mais elle produit les premiers lymphocytes mémoire. La deuxième rencontre entre un antigène et un lymphocyte mémoire donne une réponse immédiate et importante, qui assure la destruction de l'antigène avant l'apparition des symptômes et la formation de nouvelles cellules mémoire dont la population augmente.

#### Doc 14 L'immunisation



#### ■ Immunité adaptative préventive : la vaccination

Une mémoire immunitaire (anticorps, LB et LT mémoire) est réalisée par le vaccin qui crée un premier contact avec un antigène sous une forme atténuée, non pathogène (parois de virus, bactéries tuées, bactéries ou toxines atténuées). Pendant les 18 premiers mois s'effectuent les vaccins contre les principaux agents pathogènes (tuberculose, diphtérie, tétanos, coqueluche, polio...).

L'efficacité de plusieurs vaccins peut nécessiter l'emploi d'adjuvants qui stimulent le système immunitaire sans avoir de pouvoir antigénique. Les adjuvants organiques (qui peuvent être des PAMPs) stimulent l'immunité innée qui prépare et renforce l'immunité adaptative.

### 3. Après...

#### ■ Phénotype immunitaire et environnement

Pendant toute la vie, l'organisme produit des lymphocytes naïfs. La rencontre avec les antigènes présents dans l'environnement confère une immunité et fait évoluer en permanence le phénotype immunitaire, caractérisé par les anticorps circulants et le pool des lymphocytes mémoire. Les maladies se font rares, sauf pour la grippe et le rhume. L'information génétique des virus responsables de ces maladies est codée par l'ARN. Cette molécule, plus instable que l'ADN, est responsable de la grande variabilité des virus et de leurs antigènes, ce qui implique une reconstruction permanente de la défense adaptative.

#### ■ Rappels de vaccins

Le pool de lymphocytes mémoire doit être renforcé par des rappels de vaccins.

## SAVOIR-FAIRE

### Vocabulaire

- **Virus** : Microorganisme parasite obligatoire des cellules. Il doit utiliser une cellule ou une bactérie pour se multiplier.
- **Lymph**e : Liquide qui se forme à partir du plasma. La lymphe interstitielle baigne les cellules avant d'être canalisée et recyclée.
- **Sérum** : Liquide obtenu après coagulation du sang. Il contient des anticorps.
- **Ganglion lymphatique** : Organe chargé de filtrer la lymphe, apportée par un vaisseau lymphatique. Le ganglion héberge de nombreuses cellules immunocompétentes.
- **Défense innée** : Système de défense disponible immédiatement. Repose sur l'action des phagocytes.
- **Défense acquise** : Système de défense plus spécialisé et dont la mise en œuvre est retardée. Il repose sur l'action des LB et des LT8.
- **Soi** : Désigne l'ensemble des cellules et des molécules qui appartiennent à un organisme.
- **Non-soi** : Désigne l'ensemble des cellules et des molécules qui n'appartiennent pas à un organisme (toxine, greffon, virus, bactéries,...).



- **Antigène** : Toute molécule (libre, fixée sur une membrane ou présente dans une cellule) capable de déclencher la production d'un anticorps.
- **Anticorps** : Molécule produite par les lymphocytes B chargés de reconnaître une molécule étrangère à l'organisme ou antigène. Un anticorps est spécifique à un antigène.
- **Séropositif** : Qui possède des anticorps spécifiques à un antigène.
- **Phagocyte** : Leucocyte capable d'éliminer un antigène par phagocytose. Les macrophages et les granulocytes sont des phagocytes.
- **Phagocytose** : Destruction par digestion du non-soi : bactéries, virus, complexes immuns.
- **Lymphocyte** : Cellule produite dans la moelle osseuse et responsable de l'immunité acquise. On distingue les LB, LT8 et LT4.
- **LB** : Lymphocyte qui s'est spécialisé dans la moelle des os. Il produit un anticorps spécifique à un antigène. Il est chargé de la surveillance du milieu extracellulaire.
- **Plasmocyte** : Cellule sécrétrice d'anticorps, issue de la différenciation d'un LB activé.
- **LT4** : Lymphocyte qui se spécialise dans le thymus. Il stimule la multiplication clonale d'un lymphocyte activé par un antigène. C'est une cible du VIH.
- **LT8** : Lymphocyte qui se spécialise dans le thymus. Il est chargé de la surveillance du milieu intracellulaire.
- **LT cytotoxique** : Cellule issue de la différenciation d'un LT8 activé capable de lyser les cellules qu'il reconnaît comme infectées.
- **Interleukine** : Molécule produite par un LT4 pour stimuler la multiplication clonale et la différenciation d'un LB ou d'un LT8 activé par un antigène.
- **Diapédèse** : Désigne le mécanisme de sortie d'un vaisseau sanguin par un leucocyte.
- **CMH** ou **HLA** : Marqueurs présentés par chaque cellule à noyau, ils présentent aux LT8 des peptides présents dans la cellule.
- **Peptide** : Fragment de protéine (10 acides aminés environ).
- **Antibiotique** : Molécule capable de détruire certaines bactéries.
- **Vaccin** : Méthode qui repose sur l'injection d'un antigène atténué destiné à stimuler l'immunité acquise.
- **Adjuvant** : Substance qui est parfois administrée conjointement avec un antigène pour augmenter la réponse du système immunitaire.

### Compétences

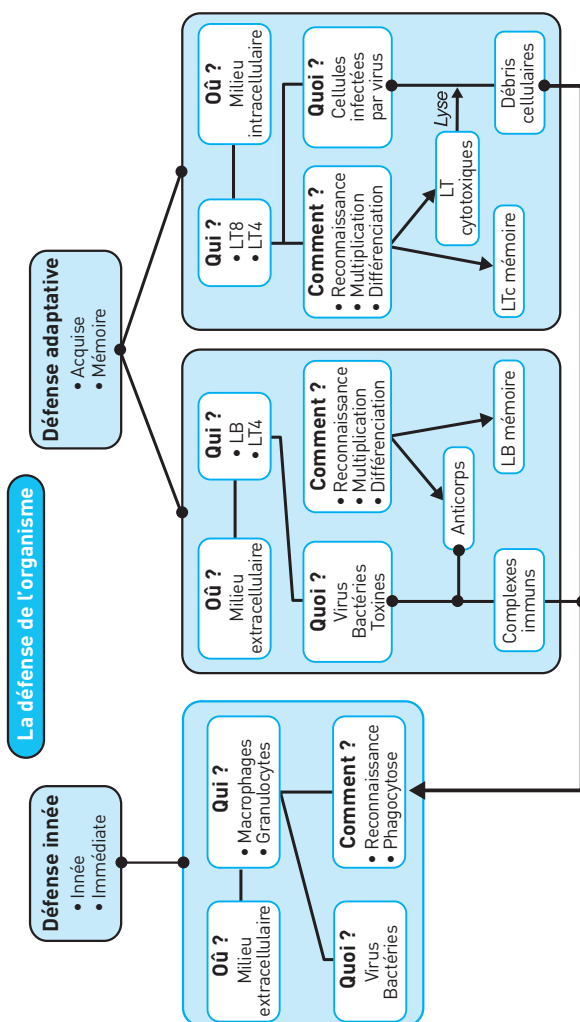
L'investigation en immunologie repose sur une démarche expérimentale. L'étude des documents proposés met en œuvre des méthodes d'analyse exposées dans l'annexe « Méthodologie ». Cependant, les documents présen-

tent parfois plusieurs résultats expérimentaux sous forme d'un tableau ou d'un schéma. Certaines expériences se font en plusieurs étapes, où la chronologie est essentielle. Il est souvent nécessaire de **diviser** un document complexe en études simples, de **comparer** des résultats pour dégager de l'information.

## Repère

- Avoir en tête comment s'organiser la défense de l'organisme (**doc. 15**).

### Doc 15 Carte des idées



## EXERCICES D'APPLICATION

9

## 1 QUI FAIT QUOI ?

★ 10 min ▶ P. 243

Reliez une cellule ou une molécule à une fonction. Plusieurs liens peuvent exister entre deux cases.

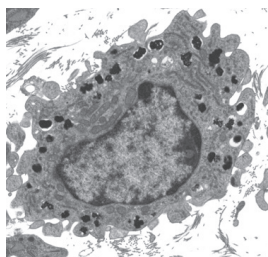
Cellule ou molécule	Fonction
1. Lymphocyte T4	a. Phagocyte, acteur de l'immunité innée
2. Lymphocyte B	b. Produit et libère des anticorps spécifiques
3. Plasmocyte	c. Assure la reconnaissance d'antigènes présents dans le milieu extracellulaire
4. Macrophage	d. Assure la reconnaissance d'antigènes présents dans le milieu intracellulaire
5. Lymphocyte T8	e. Lyse et détruit les cellules infectées
6. Granulocyte	f. Intervient dans la défense adaptative
7. Interleukine	g. Stimule la multiplication des lymphocytes activés par un antigène
8. Lymphocyte cytotoxique	h. Produit des interleukines

## 2 C'EST QUOI ?

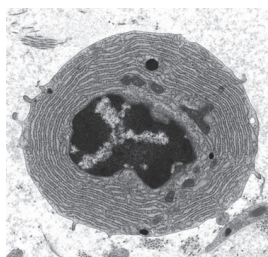
★ 10 min ▶ P. 243

## Doc 16

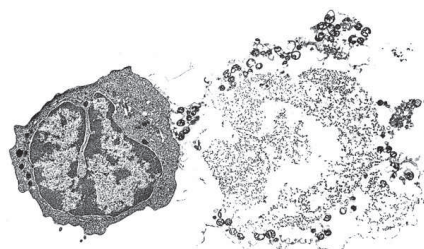
Les échelles respectives des cellules sont respectées.



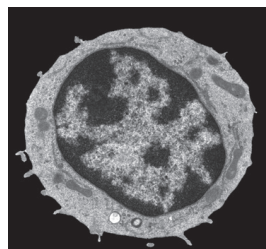
a.



b.



c.



d.

Associez à chaque image du document 16 le nom d'une des cellules immunocompétentes suivantes.

Lymphocyte – Macrophage – Plasmocyte – Lymphocyte cytotoxique.

Justifiez votre réponse.

**3 MAÎTRISER LES MOTS CLÉS DE L'IMMUNOLOGIE** ★ 15 min ► P. 243

Écrivez une phrase contenant les termes de chaque liste suivante.

1. Lymphocyte B, plasmocyte, anticorps, antigène.
2. Lymphocyte B, lymphocyte T4, interleukines, multiplication, antigène.
3. Monocyte, macrophage, phagocytose, bactéries
4. Anticorps, antigène, complexe immun.
5. Antigène, anticorps, spécifique.

## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

**4 TEST DE DÉPISTAGE D'UNE INFECTION PAR STREPTOCOQUE**

★★ 20 min ► P. 243

Les streptocoques libèrent une toxine : la streptolysine, qui perce la membrane des globules rouges. L'hémoglobine contenue dans les globules s'échappe alors à l'extérieur. On se propose d'utiliser cette propriété pour mettre au point un protocole de dépistage d'une infection par un streptocoque (**document 17**).

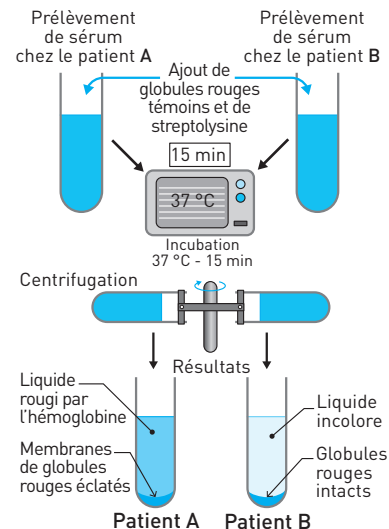
**Protocole testé.** Un prélèvement de sang est effectué chez 2 individus : B est porteur de streptocoques, A ne l'est pas. Du sérum, fraction liquide du sang (donc dépourvue de cellules) est extrait de chaque prélèvement sanguin. Dans le cas où un patient est porteur de streptocoques, son sérum contient des anticorps antistreptolysine. Ceux-ci rendent la streptolysine inactive : elle n'agit plus sur les globules rouges.

Pour le test, on ajoute au sérum :

- des globules rouges humains témoins (non prélevés sur les patients) ;
- de la streptolysine.

**Résultats obtenus.** Sérum A : Les globules rouges sont détruits et l'hémoglobine se répand dans le tube.

**Doc 17**



Sérum B : Les globules rouges sont intacts.

Après une étude rigoureuse du protocole, expliquez si **le résultat du test est conforme aux informations connues pour les patients A et B. Quelles sont les limites d'utilisation de ce test ?**

**Étude guidée.** Le protocole repose sur deux constantes : globules rouges témoin + streptolysine, et sur une variable : le sérum d'un patient.

**Diviser** l'étude du document en deux.

1. Étudier dans un premier temps les conséquences qu'aurait une présence simultanée de globules et de streptolysine sans addition de sérum.
2. Utiliser l'interprétation dégagée en 1 pour étudier les résultats obtenus avec l'addition de chaque sérum.

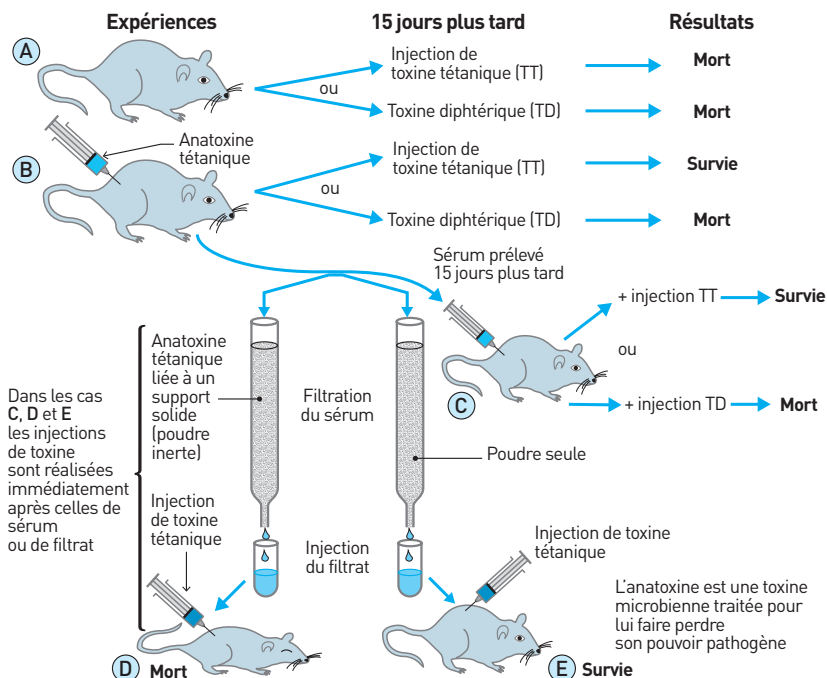
Terminer par un bilan critique de ce protocole.

**Repères de savoir.** Le sujet contient presque toutes les informations. Pour le bilan critique, penser à la mémoire du système immunitaire.

## 5 LA DÉFENSE ADAPTATIVE PAR ANTICORPS ★★ 20 min ▶ P. 244

Plusieurs expériences ont été réalisées pour étudier la défense adaptative par anticorps chez la souris. Le protocole et les résultats obtenus sont présentés dans le **document 18**.

### Doc 18

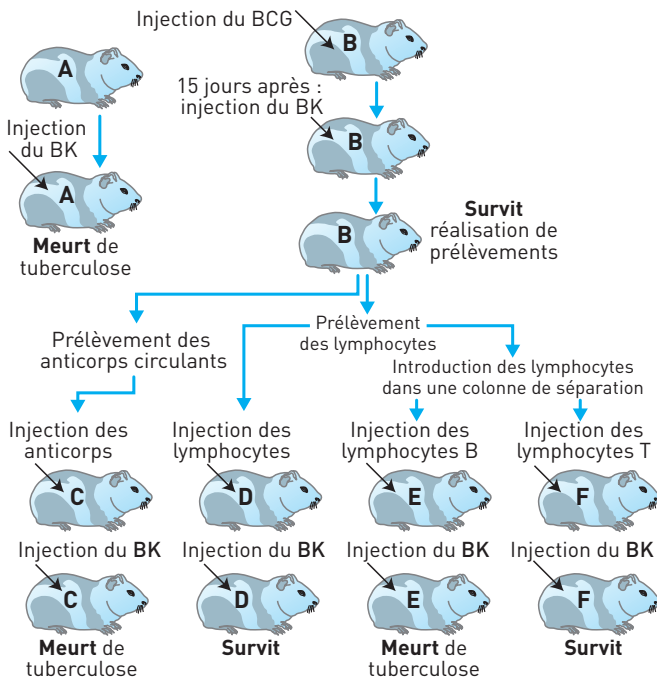


**Vrai ou faux ? Relevez les propositions exactes.**

1. La souris A sert de témoin pour la virulence des toxines.
2. La souris B a été vaccinée contre le tétanos.
3. L'anatoxine tétanique est une toxine diphtérique atténuée.
4. Suite à l'injection d'anatoxine tétanique, la souris B a produit des anticorps spécifiques antidiphtériques.
5. La survie de la souris C à l'injection de la toxine tétanique est due à la vaccination réalisée à partir du sérum prélevé chez la souris B.
6. Quand ils traversent la colonne de poudre inerte avec anatoxine tétanique, les anticorps présents dans le sérum de la souris B sont retenus, fixés sur l'anatoxine tétanique.
7. Contrairement à la souris D, la souris E reçoit des anticorps antitétaniques, ce qui la protège contre la toxine tétanique.
8. Le sérum injecté à la souris D ne contient pas d'anticorps antitétanique.

**6 LA VACCINATION AVEC LE BCG**

★★ | 25 min | ► P. 244

**Doc 19 Expériences réalisées avec des cobayes A, B, C, D, E et F de même souche**

Le bacille de Koch (BK) est la bactérie responsable de la tuberculose. Le bacille de Calmette et Guérin (BCG) est le bacille de Koch atténué, c'est-à-dire rendu non pathogène.

Plusieurs expériences ont été réalisées pour comprendre l'immunité adaptative développée contre le BK et tester l'efficacité d'une vaccination avec le BCG.

**Proposez des arguments pour confirmer ou corriger ces propositions.**

1. Pour cette étude, l'expérience réalisée avec le cobaye A est inutile.
2. L'injection du BCG a vacciné le cobaye B contre le BK.
3. Le bacille de Calmette et Guérin possède les mêmes antigènes que le bacille de Koch.
4. La mémoire immunitaire du cobaye B repose sur les anticorps spécifiques.
5. Les cobayes D et F sont vaccinés.

## 7 VIRUS ET DÉFENSE ADAPTATIVE

★★ 25 min ▶ p. 245

La souris, comme l'homme, est capable de lutter contre certains virus. On a pratiqué sur plusieurs lots de souris les traitements indiqués dans le tableau ci-dessous et on observe pour chaque lot les réactions immunitaires à la suite d'une infection virale.

Souris	Traitement effectué	Conséquences pour l'organisme	Résultats après infection virale
Lot 1	Aucun	Présence de lymphocytes B et T	Disparition des virus
Lot 2	Ablation du thymus	Présence de lymphocytes B Absence de lymphocytes T	Prolifération des virus
Lot 3	Irradiation + injection de lymphocytes T provenant d'une souris infectée par le même virus.	Présence de lymphocytes T Absence de lymphocytes B	Disparition des virus

*Information* : L'irradiation détruit les cellules à multiplication rapide et notamment les cellules souches de la moelle osseuse à l'origine des lymphocytes. Le thymus est l'organe où les lymphocytes T acquièrent leur fonction.

« Les lymphocytes B n'interviennent pas dans la réponse immunitaire développée contre ce virus. »

**Expliquez pourquoi l'expérience menée avec le lot 3 est indispensable pour démontrer cette affirmation.**

**Étude guidée.** Ce document est complexe car il présente les résultats de plusieurs expériences qu'il faut étudier séparément pour répondre à l'utilité du lot 3.

Diviser l'étude du document en trois.

1. Étudier le lot 1.
2. Étudier le lot 2.
3. Terminer par le lot 3 et répondre à la question posée.

**Repère de savoir.** La défense adaptative par anticorps et coopération cellulaire.

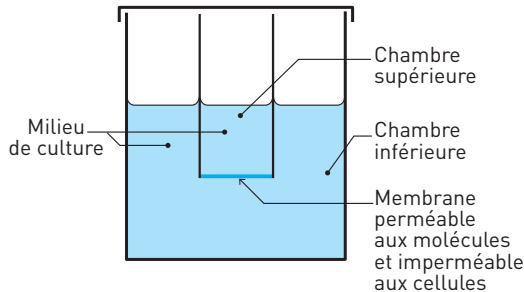
## 8 COOPÉRATION CELLULAIRE ENTRE LYMPHOCYTES

★★ 25 min ► p. 245

Une souris reçoit une injection de globules rouges de mouton (GRM). Trois jours plus tard, on prélève des lymphocytes dans sa rate. Les lymphocytes sont mis en culture dans une chambre de Marbrook (**document 20**) selon le protocole décrit dans le tableau ci-après. On précise que le nombre de lymphocytes mis en culture est toujours le même. Quelques jours plus tard, le milieu de culture est filtré et le liquide recueilli est mis en présence de GRM. On mesure l'importance de l'agglutination de ces derniers.

*Remarque :* Une agglutination est provoquée par les anticorps qui, en se fixant sur les antigènes, lient les globules entre eux.

### Doc 20



	Expérience 1	Expérience 2	Expérience 3	Expérience 4
Nature des lymphocytes placés dans la chambre supérieure	aucun	aucun	T	aucun
Nature des lymphocytes placés dans la chambre inférieure	T et B	B	B	T
Agglutination des GRM	forte	faible	forte	nulle



Montrez que ce sont des molécules qui assurent la communication entre LT et LB.

**Étude guidée.** L'étude de ce document repose sur la chambre de Marbrook. Les cellules B et T peuvent être placées dans la même chambre, ou placées dans des chambres séparées par une membrane dont il faut bien identifier les propriétés. Il faut **comparer** des expériences pour dégager de l'information.

**Diviser** l'étude du document en trois.

1. Étudier le montage et le protocole.
2. Comparer les expériences 2 et 4.
3. Comparer les expériences 1 et 3.

**Repères de savoir.** La défense adaptative : coopération entre LT4 et LB.

## EXERCICES D'APPROFONDISSEMENT

### 9 TÉTANOS : SÉRUM ET VACCIN

★★★ 40 min ▶ p. 246

Le tétanos est une maladie grave qui entraîne la contraction des muscles squelettiques, puis des muscles respiratoires et du muscle cardiaque en moins de deux semaines. Cette tétanisation des muscles est provoquée par la toxine tétanique, toxine produite par le bacille du tétanos. Ce bacille se trouve dans le sol sous forme de spores.

Chez une personne susceptible d'avoir été contaminée (C), le médecin procède à l'injection d'un sérum antitétanique à  $t = 0$ . Chez une personne non contaminée (NC), une injection d'anatoxine tétanique est réalisée également à  $t = 0$ . L'anatoxine tétanique est une toxine tétanique atténuée, qui a perdu son pouvoir pathogène tout en conservant son pouvoir antigénique.

La production d'anticorps antitétaniques est mesurée chez ces deux personnes, les résultats sont présentés sur le même graphique (**document 21**).

À l'aide du document 21, **proposez des arguments pour justifier les affirmations suivantes.**

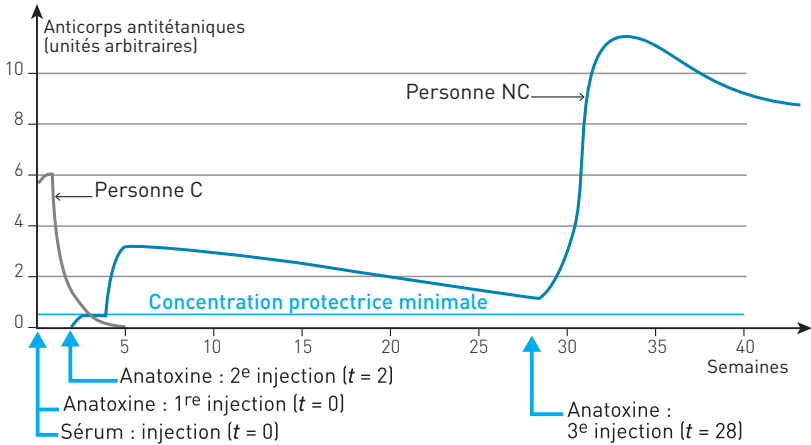
1. L'injection d'anatoxine est un vaccin.
2. L'injection d'anatoxine ne peut pas sauver une personne contaminée par le bacille du tétanos.
3. Au cours du temps, les anticorps sont naturellement dégradés.
4. Il faut trois injections d'anatoxine tétanique pour assurer une mémoire immunitaire satisfaisante.
5. L'évolution des anticorps chez la personne C prouve sa contamination par le bacille du tétanos.

6. L'injection du sérum n'a pas vacciné la personne C.

7. Un sérum confère une immunité passive tandis qu'un vaccin confère une immunité active.

Il faut ici extraire des informations du texte et/ou du graphique et, si cela est nécessaire, utiliser des connaissances pour produire une explication.

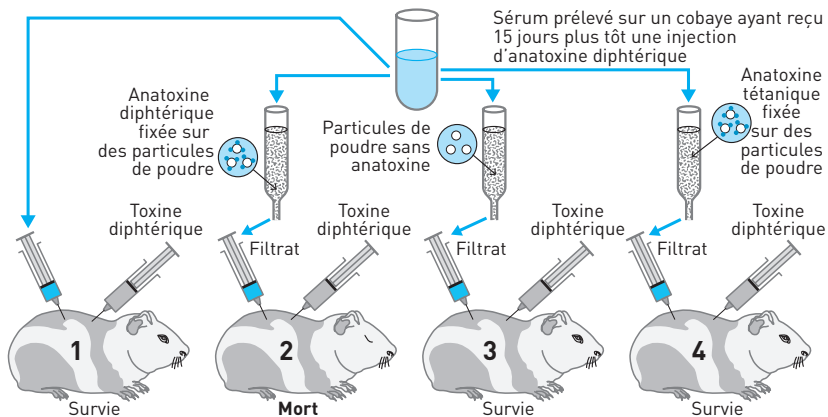
### Doc 21



## 10 VACCINATION CONTRE LA DIPHTÉRIE

★★★ 30 min ▶ P. 247

### Doc 22 Expériences réalisées sur des cobayes



Lors d'une vaccination contre la diphtérie, le sujet reçoit de l'anatoxine diphtérique, toxine diphtérique ayant perdu son pouvoir pathogène mais conservant son pouvoir immunogène. Il développe alors en quelques jours une immunité par la production d'anticorps. Ces anticorps, libérés dans le milieu intérieur, neutralisent la toxine diphtérique. Des expériences sont réalisées sur des cobayes pour déterminer le mode d'action des anticorps au cours de cette neutralisation. Le **document 22** présente ces expériences et leurs résultats.

**À partir du document fourni, montrez que la neutralisation de la toxine diphtérique résulte de la formation d'un complexe immun spécifique.**

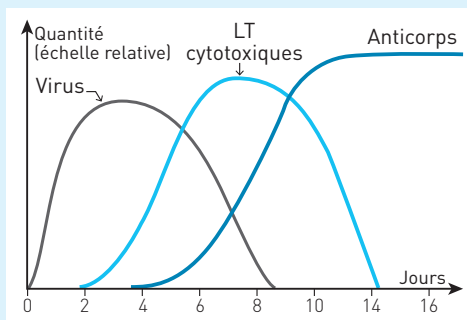
## CONTRÔLES

### 11 RESTITUTION DE CONNAISSANCES

★★★ 60 min ▶ p. 247

La grippe est une maladie infectieuse fréquente et contagieuse causée par des virus à ARN. Elle se traduit par un ensemble de signes non spécifiques associant fièvre, maux de tête, toux, pharyngite... Ces symptômes font évoquer le diagnostic par la soudaineté de leur apparition, leur survenue en période d'épidémie grippale et leur disparition habituelle après quelques jours d'évolution.

**Doc 23 Évolution de l'infection par le virus de la grippe et de la réponse du système immunitaire**



**Identifiez et expliquez les principales phases de l'infection et de la réponse immunitaire montrées par le document.**

## 12 SÉROPOSITIVITÉ DU NOUVEAU-NÉ

★★ 50 min ▶ P. 249

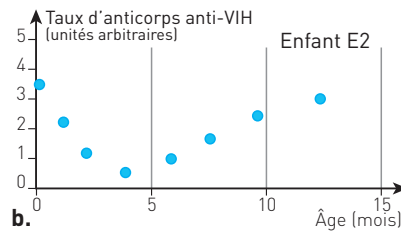
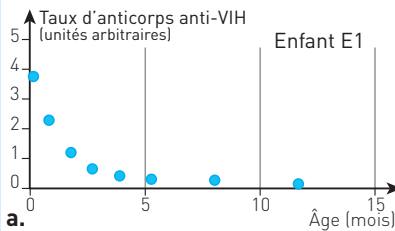
On cherche à comprendre l'évolution de la séropositivité pour le VIH de deux enfants : E1 né de la mère M1 et E2 né de la mère M2. Par la mise en relation des informations apportées par les documents 24 à 26, expliquez l'origine et les évolutions différentes de la séropositivité chez ces 2 enfants.

## Doc 24 Test Elisa

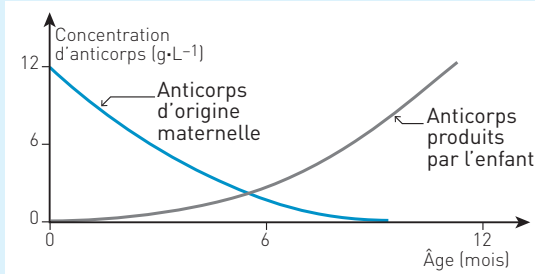
Le test Elisa révèle la présence d'anticorps anti-VIH grâce à une réaction colorée. La charge virale mesure le nombre de copies d'ADN viral par mL de plasma.

Individus testés	Témoïn T1	Témoïn T2	Mère de E1	Enfant E1	Mère de E2	Enfant E2
	Non contaminé par le VIH	Infecté par le VIH	Tests réalisés lors de la grossesse	Tests réalisés à la naissance	Tests réalisés lors de la grossesse	Tests réalisés à la naissance
Test Elisa	Négatif ○ Cupule non colorée	Positif ● Cupule colorée	Positif ● Cupule colorée	Positif ● Cupule colorée	Positif ● Cupule colorée	Positif ● Cupule colorée
Charge virale en nombre de copies ARN par mL	0	Comprise entre $10^1$ et $10^8$	Environ $10^4$	0	Environ $10^4$	Environ $5 \times 10^2$

## Doc 25 Mesure des taux d'anticorps anti-VIH chez E1 (a) et chez E2 (b)



## Doc 26 Évolution de la concentration de tous les anticorps dans le sang d'un enfant en fonction de leur origine



## CORRIGÉS

1. f et h

2. c et f

3. b

4. a

5. d et f

6. a

7. g

9. e et f

2. a. Macrophage, avec vésicules d'endocytose de bactéries. Cellule de grande taille.

b. Plasmocyte avec réticulum endoplasmique développé, siège de la synthèse des protéines sécrétées, ici, synthèse des anticorps.

c. Lymphocyte cytotoxique à gauche et cellule lysée à droite : son noyau est détruit, la membrane lésée permet au cytoplasme de sortir.

d. Lymphocyte naïf, T ou B.

3. 1. Un lymphocyte B activé par un antigène se différencie en plasmocyte, cellule productrice d'anticorps.

2. Le lymphocyte T4 produit des interleukines qui stimulent la multiplication d'un lymphocyte B activé par un antigène.

3. Un monocyte sanguin se différencie en macrophage qui élimine les bactéries par phagocytose.

4. La fixation d'un anticorps sur un antigène forme un complexe immun.

5. Un anticorps est spécifique à un antigène.

4. Il s'agit de tester la validité d'un protocole dans le cadre de la mise au point d'un test de dépistage d'une infection par un streptocoque. Pour cela, deux patients sont étudiés :

– A est le témoin négatif : il n'est pas porteur de streptocoques ;

– B est le témoin positif : il est porteur de streptocoques.

**Analyse du protocole :** Dans les deux tests réalisés, sont ajoutés à la fois des globules rouges témoin et de la streptolysine. Après une incubation, puis centrifugation, on observe l'état des globules rouges témoin injectés.

**Interprétation :** Les streptocoques produisent une toxine, la streptolysine, qui perce les globules rouges. Dans les deux tests, les globules rouges témoin devraient donc être lysés et libérer leur hémoglobine !

**Analyse des résultats :** La différence entre les deux tests provient du sérum du patient ajouté en même temps que les globules rouges témoin et la streptolysine.

Avec le sérum du patient A, non contaminé par le streptocoque, les globules sont lysés. Mais avec le sérum du patient B, porteur du streptocoque, les globules rouges sont intacts.

**Interprétation :** Le sérum du patient B empêche la lyse des globules rouges. L'infection par un streptocoque provoque l'apparition d'anticorps spécifiques anti-streptolysine. Les anticorps présents dans le sérum du patient B ont neutralisé la streptolysine, empêchant ainsi la lyse des globules rouges.

Pour le patient A, la streptolysine ajoutée dans le test n'a pas été neutralisée par son sérum : le patient A ne possède donc pas d'anticorps antistreptolysine.

### Bilan

Les résultats des tests sont cohérents avec les données cliniques des deux patients. Ce protocole permet donc d'identifier une infection par streptocoque.

Cependant, ce test ne permettra pas de distinguer une infection actuelle ou une infection passée et guérie. Après une infection, des anticorps spécifiques persistent pendant plusieurs mois, voire plusieurs années dans la circulation sanguine. Ce test ne permet donc qu'un dépistage de l'existence d'une infection par un streptocoque, sans permettre de préciser s'il s'agit d'une infection en cours ou d'une infection passée et guérie.

- 5** 1. Vrai. La souris A ne reçoit aucune injection avant, seules les toxines injectées vont agir.
2. Vrai. La souris B a reçu une injection d'anatoxine tétanique, forme atténuée de la toxine tétanique.
3. Faux. L'anatoxine tétanique est une forme atténuée de la toxine tétanique.
4. Faux. La souris B a produit des anticorps spécifiques, antitétaniques.
5. Faux. Une vaccination est une injection d'antigène sous une forme atténuée. Ici, on injecte du sérum, il contient des anticorps antitétaniques.
6. Vrai.
7. Vrai.
8. Vrai.

- 6** 1. Faux. Le cobaye A appartient à la même souche que les autres cobayes. Une injection de BK provoque la mort du cobaye A par tuberculose. C'est une expérience témoin, elle montre que les autres cobayes (B, C, D, E et F) seraient aussi tués par le BK.
2. Vrai. Le cobaye B ne meurt pas après une injection de BK s'il a, 15 jours avant, reçu une injection de BCG. Le BCG est une forme atténuée du BK. Elle a immunisé le cobaye B contre le BK et la tuberculose. L'injection du BCG est une vaccination.
3. Vrai. Le BCG est une forme atténuée du BK. Une injection du BCG 15 jours avant une injection de BK protège le cobaye B de la tuberculose. Le cobaye B a été immunisé, vacciné contre le BK. Cette immunité acquise a été réalisée grâce aux antigènes présentés par le BCG, qui sont donc semblables à ceux du BK.
4. Faux. Les anticorps circulants présents chez le cobaye B, qui n'a pas été tué par le BK, sont prélevés et injectés au cobaye C. Ce cobaye reçoit ensuite une injection du

BK et en meurt. Le cobaye C montre bien que l'immunité de B n'est pas due à des anticorps. Le cobaye B ne possède pas d'anticorps antiBK.

5. Faux. Vacciner, c'est injecter un antigène atténué pour que l'organisme fabrique des lymphocytes mémoire. Ici, seuls des lymphocytes T ont été injectés. Les cobayes D et F n'ont pas été vaccinés.

### 7 • Étude des lots 1 et 2

**Analyse :** Les souris du lot 1 possèdent des lymphocytes B et T, leur système immunitaire fait disparaître les virus.

**Interprétation :** Le lot 1 est un lot témoin. Plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliquer la disparition des virus.

1. Les virus sont détruits par les anticorps produits par les lymphocytes B.

2. Les cellules infectées par le virus sont détruites par les lymphocytes T8.

**Analyse :** Les souris du lot 2 subissent une ablation du thymus. Les lymphocytes T ne sont plus produits, les souris du lot 2 ne produisent que des lymphocytes B. Les virus prolifèrent.

**Hypothèses explicatives :** Deux hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ce résultat.

– Les lymphocytes B n'interviennent pas dans la réponse immunitaire contre ce virus.

– L'absence de lymphocytes T, et des T4 en particulier, ne permet pas de stimuler la production d'anticorps par les lymphocytes B. Celle-ci reste insuffisante et ne permet pas la destruction des virus.

**Conclusion :** Les expériences conduites avec les lots 1 et 2 aboutissent à la formulation de deux hypothèses. Une autre expérience est nécessaire pour éprouver chacune d'elles.

### • Étude du lot 3

**Analyse :** Les souris du lot 3 subissent la destruction de toutes les cellules de leur système immunitaire, et des lymphocytes T sont injectés. Les virus sont détruits.

**Interprétation :** Il y a destruction du virus par les lymphocytes T en l'absence de lymphocytes B. Ceux-ci n'interviennent pas dans la réponse immunitaire adaptative dirigée contre ce virus.

**Conclusion :** La disparition du virus s'explique par la destruction des cellules infectées par les lymphocytes T8, stimulés par les lymphocytes T4. L'expérience réalisée avec le lot 3 est donc indispensable pour démontrer que les lymphocytes B n'interviennent pas dans la réponse immunitaire dirigée contre ce virus.

8 Une souris reçoit une injection d'un antigène : des GRM. Il y a reconnaissance et déclenchement d'une réaction immunitaire. Après trois jours, les lymphocytes prélevés dans la rate sont mis en culture et on peut recueillir quelques jours plus tard les molécules qu'ils ont produites pour agglutiner des globules rouges de mouton.

### • Comparaison des expériences 2 et 4

**Analyse :** Il y a une faible agglutination avec le liquide issu de la chambre dans laquelle ont été placés des LB. Mais aucune agglutination n'est obtenue avec le liquide issu de la chambre où ont été mis des LT.

**Interprétation :** Une agglutination est provoquée par la présence d'anticorps anti-GRM. Activé par un antigène, un lymphocyte B naïf s'est différencié en cellule productrice d'anticorps. Un lymphocyte T ne peut pas produire d'anticorps.

• **Comparaison des expériences 1 et 3**

**Analyse :** Il y a une forte agglutination avec le liquide issu de la chambre dans laquelle ont été placés des lymphocytes B et T, qu'ils soient placés dans la même chambre ou dans des chambres séparées par une membrane, perméable seulement aux molécules.

**Interprétation :** Les lymphocytes T stimulent la multiplication des lymphocytes B et leur différenciation en plasmocytes producteurs d'anticorps grâce à des molécules solubles : les interleukines.

**9** 1. Le texte précise que l'anatoxine tétanique est une toxine atténuée qui a perdu sa virulence mais pas son pouvoir antigénique. Injecter une anatoxine tétanique, c'est injecter un antigène qui va stimuler la réponse adaptative assurée par les LB. Le graphique montre que la production d'anticorps antitétaniques augmente après chaque injection. Après la première injection, la production des anticorps est assurée par des lymphocytes B mémoire, ce qui assure une production plus rapide et plus importante. C'est donc une vaccination.

2. Une personne infectée par le bacille tétanique meurt en moins de deux semaines. Or, deux semaines après la première injection d'anatoxine, la concentration des anticorps antitétaniques de 0,5 ua, destinés à neutraliser la toxine tétanique, est très inférieure à la concentration minimale protectrice de 2 ua.

3. Après la deuxième injection, la production d'anticorps atteint un pic à  $t = 5$  semaines, puis la concentration diminue régulièrement pour se rapprocher de la concentration minimale protectrice. La personne NC n'étant pas infectée, il s'agit d'une dégradation naturelle des anticorps.

4. À chaque injection d'anatoxine, la production d'anticorps antitétaniques augmente. Après un pic, cette concentration diminue. 30 semaines après la deuxième injection, la concentration en anticorps se rapproche beaucoup de la concentration minimale protectrice. Une production importante d'anticorps ne se produit qu'après la troisième injection.

5. Si C n'était pas contaminée, la destruction naturelle des anticorps devrait se produire avec une vitesse comparable à celle observée après le pic à  $t = 5$  semaines chez la personne NC. À cette vitesse, la concentration d'anticorps devrait encore être supérieure à la concentration minimale protectrice 40 semaines après l'injection du sérum. Or chez la personne C, cette vitesse est beaucoup plus importante. C est contaminé, les anticorps injectés avec le sérum se lient avec la toxine tétanique, ce qui forme un complexe immun détruit par la phagocytose des macrophages : l'anticorps impliqué dans un complexe immun est donc détruit. 5 semaines après l'injection, il ne reste plus d'anticorps antitétaniques.

6 et 7. Vacciner, c'est injecter un antigène atténué. Chez NC, ce sont des anticorps qui ont été injectés. Un sérum contient des anticorps qui ont été produits par une personne qui a été en contact avec un antigène. Injecter un anticorps antitétanique va conférer



à la personne une protection contre la toxine tétanique, mais cette injection ne stimule pas le système immunitaire : c'est une immunité passive.

Injecter une anatoxine, c'est injecter un antigène qui stimule une réponse par les lymphocytes B, ce qui se traduit par la sécrétion d'anticorps spécifiques qui donnent une immunité, et la formation de LB mémoire : ici l'immunité est active.

### 10 • Cobaye vacciné

**Analyse :** Un cobaye reçoit une injection d'anatoxine diphtérique, forme atténuée de la toxine diphtérique. 15 jours plus tard, un prélèvement de son sérum est effectué pour réaliser plusieurs expériences.

**Hypothèse explicative :** L'anatoxine diphtérique est un antigène, elle a provoqué la formation d'anticorps antidiphtériques, anticorps présents dans le sérum du cobaye.

#### • Cobaye 1

**Analyse :** Le cobaye 1 reçoit une injection de toxine diphtérique et une injection du sérum du cobaye vacciné, il survit.

**Hypothèse explicative :** Les anticorps présents dans le sérum du cobaye vacciné ont neutralisé la toxine diphtérique.

#### • Cobayes 2 et 3

**Analyse :** Les cobayes 2 et 3 reçoivent une injection de toxine diphtérique.

Le cobaye 2 reçoit une injection du sérum du cobaye vacciné qui a été préalablement filtré dans une colonne qui contient des particules sur lesquelles se trouve l'anatoxine diphtérique. Il meurt.

Le cobaye 3 reçoit une injection du cobaye vacciné qui a traversé une colonne dont les particules ne contiennent pas d'anatoxine diphtérique. Il survit.

**Hypothèse explicative :** Quand le sérum du cobaye vacciné rencontre l'anatoxine diphtérique dans la colonne, les anticorps se fixent sur l'anatoxine et sont retenus dans la colonne. À la sortie de la colonne, le sérum est dépourvu d'anticorps antidiphtériques. Le cobaye 2 qui reçoit cette injection n'est pas protégé et meurt.

Mais si le sérum du cobaye vacciné ne rencontre pas l'anatoxine diphtérique dans la colonne, les anticorps antidiphtériques traversent la colonne et neutralisent la toxine injectée au cobaye 3.

#### • Cobaye 4

**Analyse :** Le sérum du cobaye vacciné traverse une colonne qui contient des particules sur lesquelles est fixée l'anatoxine tétanique. Ce sérum filtré est injecté au cobaye 4 qui reçoit une injection de toxine diphtérique. Il survit.

**Hypothèse explicative :** Les anticorps antidiphtériques n'ont pas été retenus par l'anatoxine tétanique. L'anticorps antidiphtérique est spécifique à la toxine diphtérique.

#### Bilan

La neutralisation d'un antigène par un anticorps est dû à la fixation de l'anticorps sur l'antigène, ce qui forme un complexe immun. Cette fixation est spécifique.

11 La grippe est une maladie infectieuse provoquée par un virus. L'évolution de la maladie montre une phase de multiplication du virus, suivie par la réponse du sys-

tème adaptatif, assurée par les lymphocytes T cytotoxiques et les plasmocytes qui produisent des anticorps.

Comment expliquer les évolutions quantitatives et temporelles de cette infection virale ?

### I. La multiplication des virus

La grippe est provoquée par une infection virale. Un virus est incapable de se multiplier seul, il doit utiliser les constituants d'une cellule.

Le virus de la grippe s'accroche aux cellules épithéliales des voies respiratoires, puis pénètre par endocytose dans une cellule. L'ARN viral est répliqué dans le noyau de la cellule hôte, dans le cytoplasme l'ARN viral assure la synthèse des protéines virales. Les virus s'assemblent dans la cellule et sont libérés par bourgeonnement dans le milieu extracellulaire.

**Pendant les deux premiers jours** de l'infection, la population virale connaît une augmentation rapide. Lors de cette infection, le virus est présent dans deux milieux : ils circulent dans le milieu extracellulaire puis ils infectent des cellules du soi et sont donc présents dans le milieu intracellulaire.

### II. La réponse adaptative assurée par les LT8

La réponse adaptative assurée par les lymphocytes T8 est destinée à l'élimination des cellules infectées par un virus.

#### • Pendant les 2 premiers jours

**Reconnaissance** : Chaque cellule doit en permanence prouver son appartenance au soi. Dans son cytoplasme, son CMH se lie avec des peptides, fragments de protéines présentes dans la cellule. Le complexe CMH-peptide est ensuite exposé pendant quelques heures à la surface de la cellule, cela revient à présenter aux cellules immunocompétentes des « échantillons » de ce qui se trouve dans le cytoplasme.

Les complexes CMH1-peptide sont reconnus par un récepteur spécifique, par complémentarité de forme. Chaque lymphocyte T8 ne présente sur sa membrane qu'un seul type de CD8, il existe donc une grande diversité de lymphocytes T8, et parmi eux celui dont le récepteur CD8 reconnaît le complexe CHM-peptide du virus de la grippe. Cette phase de reconnaissance se produit pendant les deux premiers jours de l'infection.

#### • Du 2<sup>e</sup> au 10<sup>e</sup> jour

**Multiplication clonale et différenciation** : La reconnaissance d'un complexe CMH-peptide viral active le LT8 spécifique, ce qui entraîne sa multiplication clonale, puis la différenciation des cellules du clone en cellules T cytotoxiques (LTc).

**Lyse des cellules infectées et mémoire** : Certains LTc évoluent en cellules mémoire. Les autres LTc évoluent en cellules effectrices qui détruisent les cellules reconnues comme infectées par l'exocytose de perforine.

La multiplication des LTc à partir du 2<sup>e</sup> jour explique l'augmentation du nombre de LTc. La lyse de cellules infectées par les LTc explique la stabilisation de la multiplication virale entre le 2<sup>e</sup> et le 4<sup>e</sup> jour, et ensuite leur décroissance.

### III. La réponse adaptative assurée par les LB

La réponse adaptative assurée par les lymphocytes B va permettre l'élimination des virus qui circulent dans le **milieu extracellulaire**, période qui débute avec la sortie des virus d'une cellule par bourgeonnement et leur pénétration dans une nouvelle cellule hôte.

#### • Pendant les 4 premiers jours

**Reconnaissance** : La reconnaissance des antigènes présents sur la membrane du virus se fait par complémentarité de forme entre un antigène viral et un anticorps spécifique. Chaque lymphocyte B produit et expose sur sa membrane un seul type d'anticorps ; la reconnaissance d'un antigène du virus de la grippe n'est donc possible que par un lymphocyte B spécifique à cet antigène.

**Multiplification clonale et différenciation** : La fixation d'un antigène sur un anticorps membranaire active le LB spécifique. La stimulation par les interleukines produites par un LT4, entraîne sa multiplication clonale.

Ces deux étapes durent 4 jours.

#### • Du 4<sup>e</sup> au 10<sup>e</sup> jour

Les interleukines produisent aussi une différenciation des cellules du clone en LB mémoire ou en plasmocytes sécréteurs d'anticorps. Les anticorps libérés vont reconnaître et se fixer sur un antigène viral, ce qui forme un complexe immun. Les macrophages, acteurs de la défense innée, vont détruire ce complexe immun par phagocytose. Les anticorps sont ainsi à l'origine de la diminution du nombre de virus circulants. Quand les LTc ont détruit toutes les cellules infectées, la quantité de virus devient nulle.

#### • Après le 10<sup>e</sup> jour

La quantité d'anticorps se stabilise, ce qui traduit l'arrêt à la fois de la sécrétion d'anticorps par les plasmocytes et la formation de complexes immuns associés à la reconnaissance d'antigènes viraux. L'infection est terminée.

#### Conclusion

Cette infection virale se termine avec une mémoire immunitaire : anticorps circulants spécifiques au virus de la grippe, et présence de cellules mémoire elles aussi spécifiques : LB et LT8. Si le même virus se présente, il sera rapidement éliminé, sans les manifestations d'une maladie. Mais le virus de la grippe est un virus à ARN, molécule sujette à de fréquentes mutations. Si un virus de la grippe se présente, mais avec des antigènes différents de ceux exposés par lors de la précédente infection, toute l'immunité sera à refaire !

**12** Être séropositif pour le VIH signifie que l'on possède des anticorps spécifiques dirigés contre le VIH. Les documents proposés sont destinés à comprendre l'évolution de la séropositivité de deux enfants nés de deux mères différentes.

#### • Analyse du document 24

Ce document présente les résultats d'analyses sanguines permettant le dépistage de l'infection par le VIH.

**Analyse** : Les tests Elisa pratiqués lors de la grossesse pour M1 et M2, et à la naissance pour E1 et E2, sont positifs pour le VIH.

**Conclusion :** Le test Elisa détecte la présence d'anticorps spécifiques au virus VIH. Mères et enfants possèdent dans leur plasma des anticorps spécifiques au VIH.

Quelle est l'origine de ces anticorps ?

**Analyse :** L'enfant E1 a une charge virale nulle comme celle d'un témoin non contaminé par le VIH.

L'enfant E2 et les mères M1 et M2 ont une charge virale qui caractérise un individu infecté par le VIH.

**Interprétation :** M1, M2 et E2 sont infectés par le VIH. Cette infection a déclenché la production d'anticorps antiVIH détectés par le test Elisa.

Comment expliquer la séropositivité de E1 qui n'est pas infecté par le VIH ?

• **Analyse et mise en relation des documents 25 et 26**

**Anticorps anti-VIH chez E1**

**Analyse :** Chez E1, le taux d'anticorps est élevé à la naissance, puis ce taux diminue pour devenir nul vers 10 mois. L'évolution de ce taux d'anticorps chez E1 ressemble à l'évolution des anticorps maternels présentés par le document 26.

**Interprétation :** E1 possède à la naissance les anticorps produits par sa mère M1 qui ont traversé le placenta. Ces anticorps disparaissent ensuite. E1 n'est pas infecté par le VIH.

**Anticorps anti-VIH chez E2**

**Analyse :**

– Au cours des 10 premiers mois, le taux d'anticorps, élevé à la naissance, diminue pour devenir faible vers 10 mois. L'évolution de ce taux d'anticorps chez E1 ressemble à l'évolution des anticorps maternels présentés par le **document 26**.

– Après 10 mois, le taux des anticorps augmente régulièrement. Cette évolution des anticorps ressemble à celle des anticorps produits par l'enfant présenté par le **document 26**.

**Interprétation :** E2 possède lui aussi à la naissance les anticorps anti-VIH de sa mère infectée. Ces anticorps disparaissent pendant les 10 premiers mois. Puis, E2 produit lui même des anticorps pour lutter contre le VIH. E2 est infecté par le VIH.

• **Bilan**

Les mères M1 et M2 sont infectées par le VIH lors de leur grossesse. Elles produisent des anticorps anti-VIH dirigés contre le VIH pour le neutraliser et l'éliminer.

Ces anticorps traversent le placenta et sont ainsi présents dans le sang des enfants E1 et E2, ce qui explique leur séropositivité à la naissance.

Pour E2, le VIH a traversé le placenta pour le contaminer, ce qui ne s'est pas produit pour E1. E1 est donc séropositif sans être infecté par le VIH.

10

## La communication nerveuse : le réflexe myotatique

C'est un examen plutôt étrange : frapper légèrement le tendon situé sous la rotule avec un marteau provoque une extension de la jambe. Étonnement du patient, surpris de réagir sans l'avoir décidé ! Satisfaction du médecin, qui reproduit ce test au niveau du tendon d'Achille... « C'est bon pour L3, examinons maintenant S1 » pense-t-il. Par ces tests, le médecin étudie le système nerveux, L3 et S1 sont les noms des vertèbres au niveau desquelles sortent les nerfs issus de la moelle épinière.

### I ORGANISATION GÉNÉRALE DU SYSTÈME NERVEUX

Le système nerveux est organisé pour apporter une réponse adaptée et rapide à une perturbation, que son origine soit interne (organisme) ou externe (environnement).

#### 1. Commande volontaire et commande réflexe

- Une commande **volontaire** est une action consciente, adaptée à l'intention (se déplacer, prendre, écrire, manger, parler, modeler)...
- Une commande **réflexe**, est une réponse très rapide, involontaire, et stéréotypée (toujours identique), à un stimulus précis (réflexe pupillaire, réflexe myotatique)...

#### 2. Du stimulus à la réponse

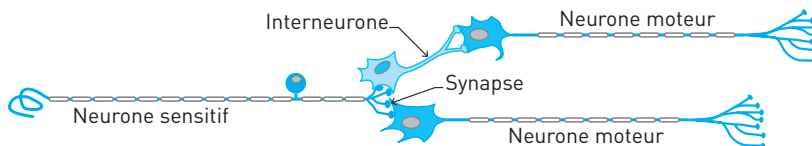
Volontaire ou réflexe, la communication nerveuse comprend toujours trois étapes.

- **Voie sensorielle.** Des millions d'informations stimulent en permanence des récepteurs sensoriels spécifiques, comme les cônes et les bâtonnets (étudiés en Première S). Ces récepteurs transforment les stimuli en messages nerveux sensitifs, acheminés par les fibres sensorielles aux centres nerveux.
- **Centre nerveux.** Les messages afférents sont traités par les centres nerveux (encéphale et/ou moelle épinière), où sont produits les messages nerveux moteurs.
- **Voie motrice.** Les messages nerveux moteurs sont ensuite acheminés vers les organes effecteurs pour produire une réponse adaptée aux stimuli : contraction de muscles, sécrétion d'enzymes ou d'hormones par des glandes...

### 3. Neurones, fibres et synapses

Le système nerveux est un réseau discontinu de **neurones** qui communiquent au niveau des **synapses**. Si les corps cellulaires des neurones sont situés uniquement dans les centres nerveux, leurs fibres sont de longs et fins prolongements cellulaires qui « câblent » tous les organes.

#### Doc 1



#### L'essentiel



## II LE RÉFLEXE MYOTATIQUE : VUE D'ENSEMBLE

### 1. Approche médicale du réflexe myotatique

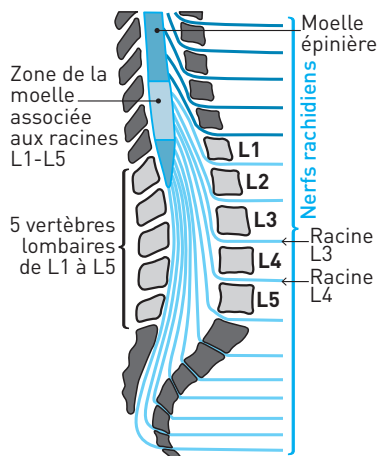
■ C'est un **outil diagnostique**. Plusieurs pathologies peuvent être observées, de l'absence de réflexe à des mouvements exagérés ou désordonnés. Chaque symptôme permet d'établir un diagnostic sur l'intégrité du système neuromusculaire en termes de localisation (nerf, racine médullaire, moelle épinière) ou de cause (traumatisme, infection, hernie...).

■ **L'examen**. Le réflexe rotulien est déclenché par un choc sur le tendon rotulien à l'aide d'un marteau réflexe. L'extension de la jambe se produit moins de 40 ms après le choc.

■ **Le diagnostic**. Les fibres afférentes et efférentes des neurones impliqués dans ce réflexe sont regroupées dans le nerf fémoral, qui rejoint la moelle épinière au niveau des racines associées aux vertèbres lombaires L3 et L4. Une anomalie au niveau du réflexe permet d'orienter le diagnostic vers des causes localisées au niveau :

- du nerf fémoral ;
- des racines L3 et L4 ;
- de la zone de la moelle épinière qui reçoit et traite les messages.

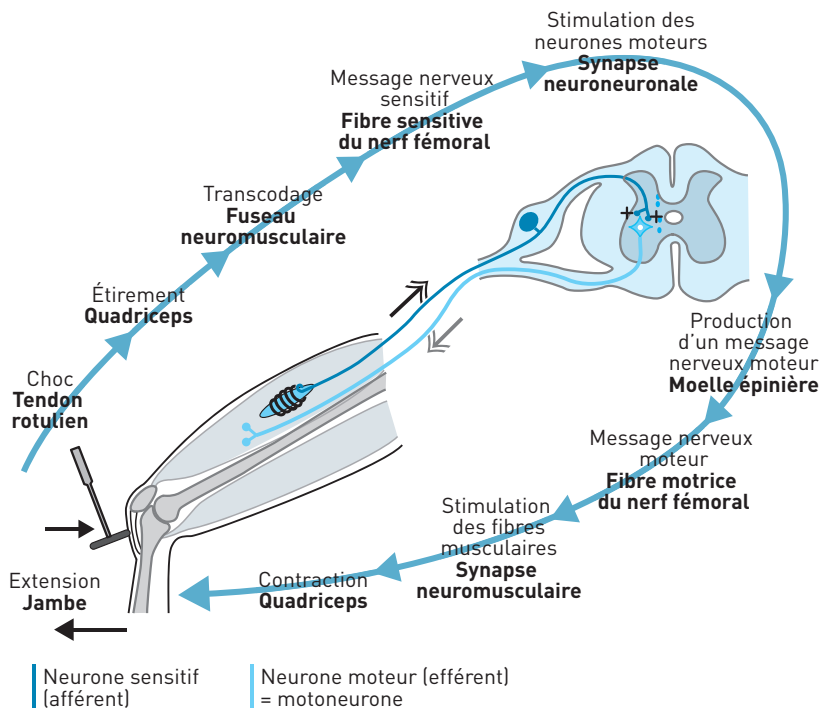
#### Doc 2



## 2. Approche physiologique du réflexe myotatique

Sous l'effet de la gravité, les muscles extenseurs du tronc et des membres sont étirés : ils réagissent par une contraction tonique permanente qui maintient la posture. L'étirement d'un muscle provoque de façon réflexe sa propre contraction : c'est le **réflexe myotatique (doc. 3)**.

### Doc 3



- **Stimulus** : étirement du muscle.
- **Voie sensorielle**. Le récepteur sensoriel est le fuseau neuromusculaire. L'étirement du muscle constitue le stimulus que le fuseau neuromusculaire transforme en message nerveux. Ce message nerveux sensible se propage sur les fibres afférentes des neurones sensitifs vers la moelle épinière.
- **Centre nerveux** : moelle épinière. Elle est impliquée dans le traitement des messages afférents. Dans la moelle épinière, chaque neurone sensible établit des synapses excitatrices avec le motoneurone qui commande la contraction du muscle étiré.
- **Voie motrice**. L'effecteur est le muscle étiré. Un message nerveux efférent se propage sur les fibres efférentes des motoneurones du muscle étiré, puis stimulent le muscle au niveau des synapses neuromusculaires.
- **Réponse** : contraction du muscle étiré.

### L'essentiel

L'étirement d'un muscle stimule le fuseau neuromusculaire qui code l'étirement en message nerveux sensitif acheminé vers la moelle épinière. Ce centre nerveux intègre les différents messages nerveux reçus et produit un message nerveux moteur, transmis au muscle étiré qui se contracte.

## III L'ACTIVITÉ RÉFLEXE

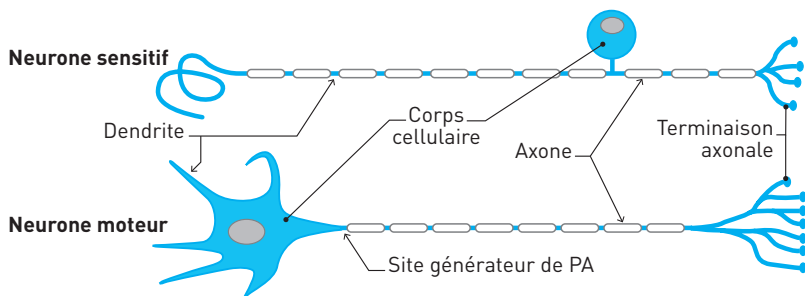
### 1. Le neurone, une cellule spécialisée

■ L'organisation du **neurone** est dissymétrique :

- le **corps cellulaire** d'un neurone se trouve uniquement dans la substance grise des centres nerveux (encéphale, moelle épinière ou ganglion rachidien) ;
- les **fibres nerveuses** sont des prolongements cellulaires dont la longueur peut varier de quelques millimètres à plus d'un mètre (pour les neurones sensoriels et moteurs dont les fibres atteignent le pied). C'est au niveau de la membrane de ces fibres que se fait la communication rapide des messages nerveux. Une fibre est appelée **dendrite** quand le message nerveux se rapproche du corps cellulaire, **axone** quand il s'en éloigne.

En dehors des centres nerveux, les fibres sont regroupées et forment les nerfs.

#### Doc 4



#### ■ Les neurones du réflexe myotatique

- Les neurones **sensitifs** (afférents) possèdent une longue dendrite, qui s'étend de la ramification terminale du fuseau neuromusculaire au corps cellulaire, localisé dans le ganglion rachidien de la racine dorsale de la moelle épinière. L'axone, plus court, pénètre dans la moelle épinière et se ramifie dans la substance grise.
- Les ramifications de l'axone des neurones sensitifs établissent des contacts fonctionnels ou **synapses** avec les dendrites des neurones moteurs.
- Les neurones **moteurs** (efférents), ou motoneurons, ont de courtes dendrites et un corps cellulaire situés dans la substance grise de la moelle épinière. Leur axone quitte la moelle en direction du muscle. L'extrémité de l'axone se ramifie en plusieurs branches, chacune se connecte à une fibre musculaire.



## L'essentiel

Le système nerveux est un réseau discontinu de neurones qui communiquent au niveau des synapses. Le corps cellulaire d'un neurone est toujours situé dans un centre nerveux, ses prolongements qui forment les fibres (axone et dendrites) assurent la transmission de messages.

## 2. Le message nerveux est codé en fréquence de PA

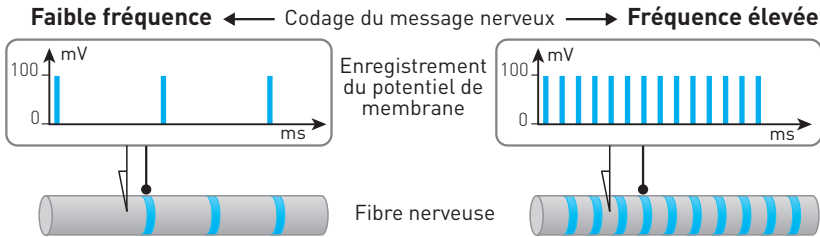
Le message nerveux est un phénomène de nature électrique qui se propage au niveau de la membrane du neurone à une vitesse qui varie entre 20 et 100 m/s.

### ■ Codage du message nerveux

Un message nerveux est constitué par une série de petites variations du potentiel de membrane d'égale amplitude ( $\sim 100$  mV) appelés **potentiels d'action (PA)**. Un message nerveux est codé en fréquences de PA. Le message nerveux est produit :

- par le récepteur sensoriel pour un neurone sensitif ;
- par le site générateur de PA pour le motoneurone.

#### Doc 5



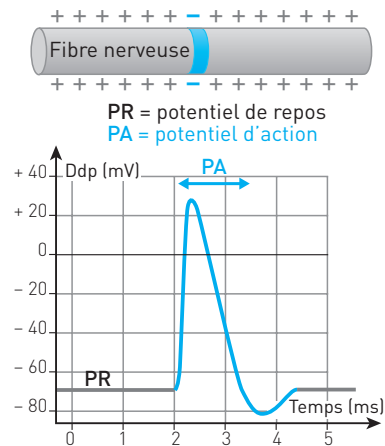
### ■ Potentiel de repos et potentiel d'action

La membrane d'un neurone est polarisée : la face interne est électronégative, la face externe est électropositive.

– Au repos, cette différence de charges électriques crée une différence de potentiel ou **potentiel de repos** de  $-70$  mV.

– Le **potentiel d'action (PA)** se traduit toujours par une brève inversion de la polarisation de la membrane : la face externe devient électropositive, le potentiel de membrane est de  $+30$  mV, soit une variation de  $100$  mV par rapport au potentiel de repos. Le PA se propage de proche en proche.

#### Doc 6



**L'essentiel**

Au repos, la membrane d'un neurone est polarisée à  $-70$  mV. Un potentiel d'action est une brève inversion du potentiel de la membrane qui atteint  $+30$  mV et qui se propage rapidement sur la membrane. Un message nerveux est codé par la fréquence des potentiels d'action.

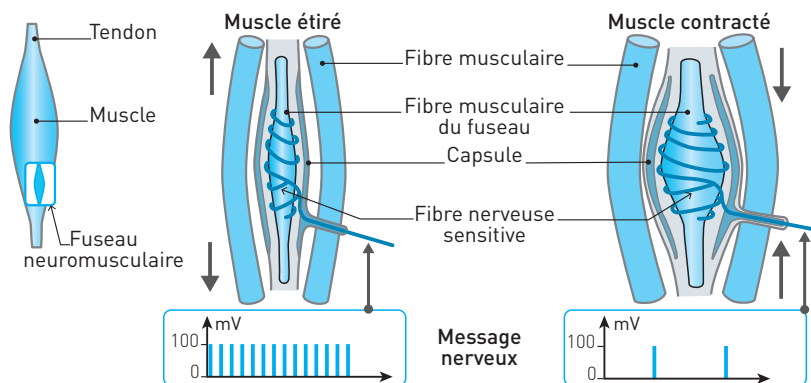
**3. Le transcodage par le fuseau neuromusculaire**

Un fuseau neuromusculaire est un récepteur mécanique sensoriel sensible à l'étirement, il est séparé des cellules musculaires du muscle par une capsule de tissu conjonctif.

**■ Organisation fonctionnelle du fuseau neuromusculaire**

Ce récepteur réalise le transcodage d'un étirement en message nerveux :

- le degré d'étirement du muscle est donné par quelques fibres musculaires présentes dans le fuseau : ces fibres sont des témoins de l'état musculaire ;
- les terminaisons des fibres nerveuses sensibles enroulées autour de la partie centrale des cellules musculaires du fuseau sont stimulées par le degré d'étirement du fuseau (une fibre par cellule musculaire du fuseau).

**Doc 7****■ Rôle du fuseau neuromusculaire lors du réflexe myotatique**

L'étirement d'un muscle stimule le fuseau neuromusculaire et provoque une augmentation de la fréquence des potentiels d'action du message nerveux. La contraction du muscle réduit l'étirement, ce qui se traduit par une baisse de la fréquence des PA du message nerveux.

**L'essentiel**

Le fuseau neuromusculaire est un récepteur sensoriel spécialisé dans le codage de l'étirement d'un muscle en message nerveux sensitif. Plus l'étirement est important, plus la fréquence des potentiels d'action du message augmente.

#### 4. Synapse neuro-neuronale et synapse neuromusculaire

La communication entre ces deux cellules est chimique, elle est unidirectionnelle. Une **synapse** désigne la zone de contact fonctionnelle entre deux neurones (synapse neuro-neuronale) ou entre un neurone et une cellule effectrice (synapse neuromusculaire par exemple).

##### ■ Synapse neuro-neuronale

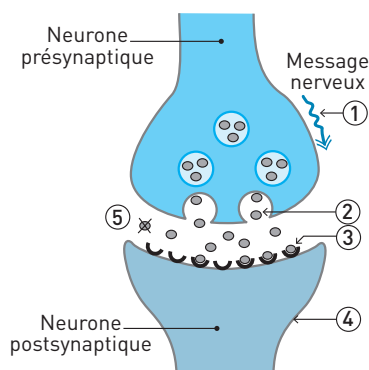
Ce type de synapse est localisé dans la substance grise des centres nerveux. La synapse neuro-neuronale est constituée par la membrane du bouton du neurone présynaptique, la fente synaptique et la membrane d'une dendrite ou du corps cellulaire du neurone postsynaptique (**doc. 8**).

L'arrivée d'un message nerveux (1) au niveau du bouton déclenche l'exocytose de neurotransmetteurs (2), messagers chimiques stockés dans les vésicules présentes dans le bouton synaptique. Plus la fréquence du message nerveux est élevée, plus la quantité de neurotransmetteurs libérés est importante.

Les neurotransmetteurs libérés dans la fente synaptique se fixent sur des **récepteurs postsynaptiques** (3), ceux qui ne sont pas fixés sont détruits (5) ou recapturés par le neurone présynaptique. Certains neurotransmetteurs sont **excitateurs** : ils dépolarisent la membrane du neurone postsynaptique (4).

D'autres sont **inhibiteurs**, la membrane postsynaptique est hyperpolarisée. C'est au niveau du site générateur de PA qu'un message nerveux est produit en réponse aux effets excitateurs et inhibiteurs des milliers de synapses établies sur le neurone postsynaptique.

##### Doc 8



##### L'essentiel

La communication chimique entre les neurones se produit au niveau des synapses neuro-neuronales. L'arrivée d'un message nerveux provoque la libération de neurotransmetteurs par le neurone présynaptique. Ces messagers chimiques vont se fixer sur les récepteurs du neurone postsynaptique qu'ils vont exciter ou inhiber. Le message nerveux est codé en concentration de neurotransmetteur.

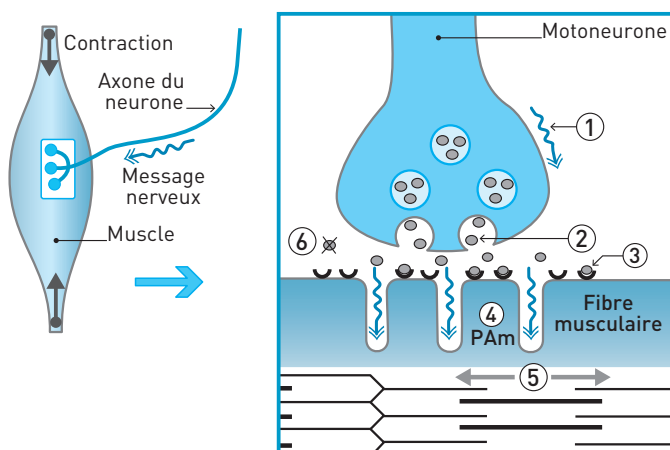
## ■ Synapse neuromusculaire

Un message nerveux provoque la contraction d'un muscle.

La synapse neuromusculaire est constituée par la membrane du bouton synaptique du motoneurone, la fente synaptique et la membrane d'une cellule musculaire (**document 9**).

L'arrivée d'un message nerveux (1) au niveau du bouton déclenche l'exocytose d'acétylcholine (2), neurotransmetteur stocké dans les vésicules présentes dans le bouton synaptique. L'acétylcholine libérée dans la fente synaptique se fixe sur des récepteurs postsynaptiques de la membrane musculaire (3), ce qui crée des potentiels d'action musculaires qui se propagent (4) et déclenchent la contraction (5). L'acétylcholine présente dans la fente synaptique est rapidement détruite (6).

### Doc 9 Zoom sur la synapse neuromusculaire



#### L'essentiel

Le message nerveux transmis par l'axone du motoneurone déclenche l'exocytose d'acétylcholine dans la fente synaptique. Chaque messager chimique se fixe sur son récepteur postsynaptique, ce qui forme des potentiels d'action musculaires qui se propagent et déclenchent la contraction de la fibre musculaire.

## SAVOIR-FAIRE

### Vocabulaire

■ **Centre nerveux** : Encéphale et moelle épinière. Un centre nerveux reçoit de multiples messages nerveux sensoriels et produit des messages nerveux moteurs adaptés en réponse aux informations reçues.

- **Dépolarisation** : Diminution temporaire de la polarisation de la membrane (en dessus de  $-70$  mV).
- **Hyperpolarisation** : Augmentation temporaire de la polarisation de la membrane (en dessous de  $-70$  mV).
- **Interneurone** : Neurone intermédiaire entre deux neurones.
- **Message nerveux** : Message qui circule au niveau la membrane des prolongements des neurones. Ce message est codé en fréquence de potentiels d'action.
- **Motoneurone** : Neurone moteur, il transmet un message nerveux moteur vers un organe effecteur (muscle ou glande).
- **Neurone postsynaptique** : Neurone situé en aval de la synapse, il reçoit de multiples informations de neurones présynaptiques et produit (ou pas) un message nerveux par sommation spatiale et temporelle.
- **Neurone présynaptique** : Neurone situé en amont de la synapse, il transmet une information au neurone postsynaptique par exocytose d'un neuro-médiateur dans l'espace synaptique.
- **Neurone** : Cellule nerveuse.
- **Polarisation** : La membrane d'un neurone est polarisée : électro négative à l'intérieur, électro positive à l'extérieur. La polarisation de la membrane d'un neurone est de  $-70$  mV.
- **Potentiel d'action** : Partie élémentaire du message nerveux. Se traduit par une inversion brève du potentiel de membrane du neurone. Son amplitude est constante :  $100$  mV.
- **Potentiel de repos** : Valeur du potentiel de membrane d'un neurone au repos :  $-70$  mV.
- **Site générateur de PA** : Partie de l'axone située près du corps cellulaire qui génère un message nerveux codé en fréquence de potentiels d'action.
- **Stimulus** : Toute cause qui provoque la réaction d'un effecteur (muscle, glande...).
- **Synapse** : Jonction où se produit la communication orientée entre deux neurones.

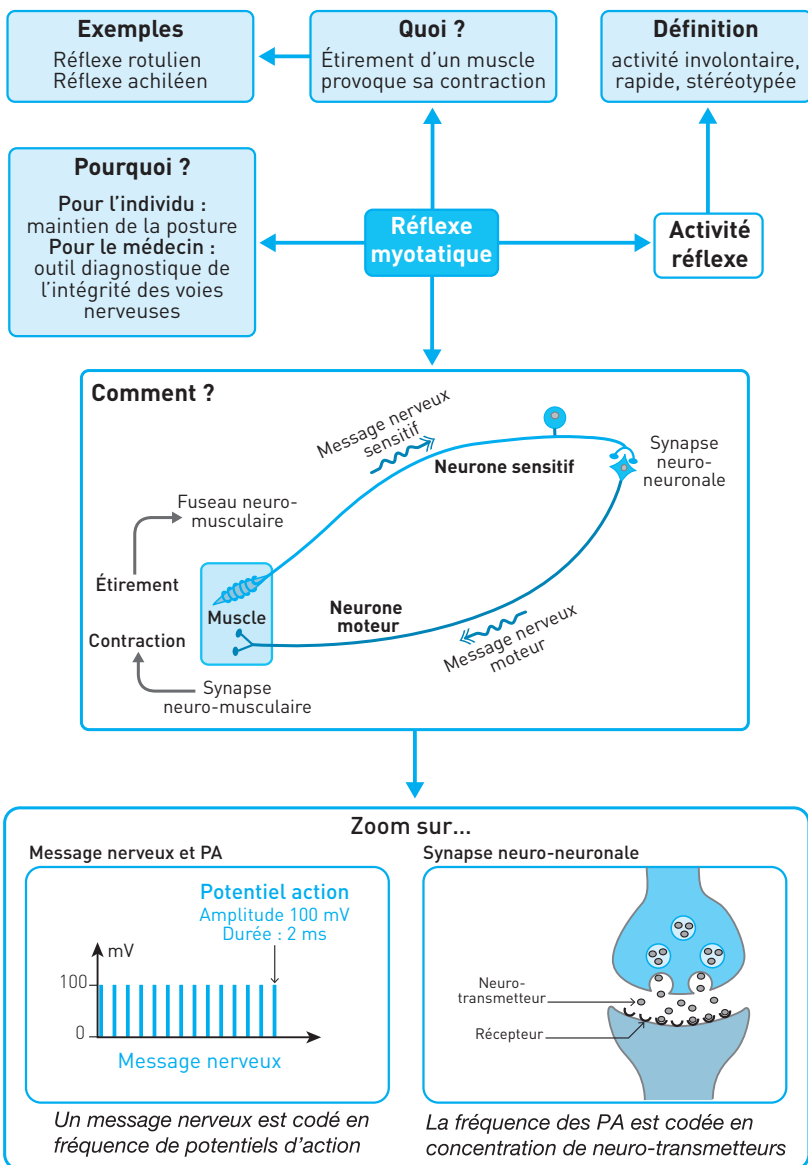
### Compétences

En physiologie nerveuse, l'investigation repose sur l'observation et la démarche expérimentale. L'étude des documents proposés met en œuvre des méthodes d'analyse exposées dans l'annexe Méthodologie (« Diviser », « Découper », « Regrouper », etc., aux pages 379-384).

## Repère

- Connaître et savoir relier les différentes étapes de la communication nerveuse (**doc. 10**).

### Doc 10 Schéma bilan



## EXERCICES D'APPLICATION

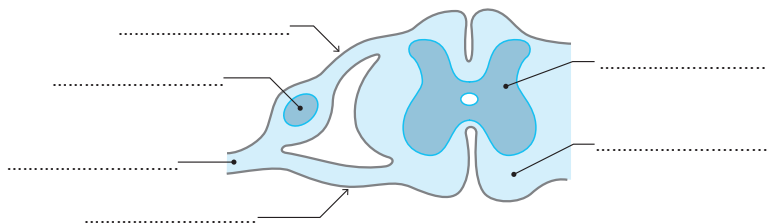
10

## 1 ORGANISATION DE LA MOELLE ÉPINIÈRE

★ 10 min ▶ P. 271

Annotez le schéma suivant (document 11) à l'aide des mots suivants :  
Substance blanche – Substance grise – Racine dorsale – Racine ventrale – Ganglion rachidien – Nerf rachidien.

## Doc 11

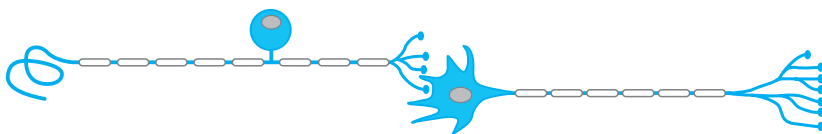


## 2 ORGANISATION D'UN NEURONE

★ 10 min ▶ P. 271

Annotez le schéma suivant (document 12) à l'aide des mots suivants :  
Corps cellulaire – Dendrite – Axone – Bouton synaptique – Neurone sensible – Motoneurone – Synapse.

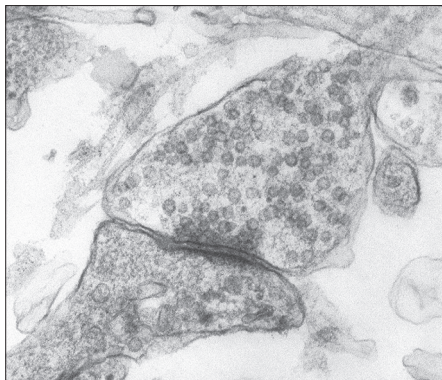
## Doc 12



## 3 ORGANISATION D'UNE SYNAPSE

★ 10 min ▶ P. 271

## Doc 13



Réalisez un schéma d'interprétation de la photographie. Annotez ce schéma à l'aide des mots suivants :

Neurone présynaptique – Neurone postsynaptique – Vésicule de neurotransmetteurs – Fente synaptique.

**4 QCM : LES NEURONES**

★ | 15 min | ► P. 272

Chaque affirmation comporte une ou plusieurs propositions exactes. **Relevez les propositions exactes et corrigez celles qui sont erronées.**

**1. Les neurones :**

- a. sont des cellules qui véhiculent des messages nerveux.
- b. communiquent entre eux au niveau de synapses.
- c. sont localisés uniquement dans les centres nerveux.
- d. peuvent avoir des axones de plusieurs dizaines de cm de long.

**2. Les fibres nerveuses :**

- a. sont les axones des neurones.
- b. sont communément appelées « nerfs ».
- c. véhiculent des messages nerveux afférents ou efférents.
- d. constituent en partie la substance blanche de la moelle épinière.

**3. On peut trouver des corps cellulaires de neurones dans :**

- a. les centres nerveux.
- b. la substance grise de la moelle épinière.
- c. la substance blanche de la moelle épinière.
- d. les ganglions des racines ventrales des nerfs rachidiens.
- e. les nerfs.

**5 QCM : LA COMMUNICATION NERVEUSE**

★ | 15 min | ► P. 272

Chaque affirmation comporte une ou plusieurs propositions exactes. **Relevez les propositions exactes et corrigez celles qui sont erronées.**

**1. Le potentiel d'action :**

- a. est un phénomène observable dans toutes les cellules.
- b. est semblable sur les neurones afférents et efférents.
- c. a une amplitude d'autant plus grande que le stimulus était intense.
- d. correspond à une brève inversion de polarisation d'une fibre nerveuse.

**2. Un message nerveux :**

- a. se propage rapidement sur les fibres des neurones.
- b. est uniquement créé par un récepteur sensoriel.
- c. est codé en fréquence de potentiels d'action.
- d. est transmis au neurone présynaptique au niveau d'une synapse.

**3. Les neurotransmetteurs :**

- a. sont uniquement excitateurs.
- b. sont des molécules chimiques déversées dans le sang.
- c. agissent sur des récepteurs membranaires.
- d. sont rapidement détruits dans la fente synaptique.



## 6 L'ACTIVITÉ RÉFLEXE

★ 10 min ▶ P. 272

Chaque affirmation comporte une ou plusieurs propositions exactes. **Relevez les propositions exactes et corrigez celles qui sont erronées.**

## 1. Un réflexe :

- a. est une activité volontaire.
- b. est une activité innée.
- c. est une activité très rapide car elle ne fait pas intervenir les centres nerveux.
- d. est stéréotypé : un stimulus est toujours suivi par la même réponse.

## 2. Le réflexe myotatique :

- a. se traduit par l'étirement d'un muscle en réponse à sa contraction.
- b. est une contraction musculaire indépendante des centres nerveux.
- c. est le résultat de l'étirement de fuseaux neuromusculaires.
- d. fait intervenir des neurones sensitifs et des motoneurons.

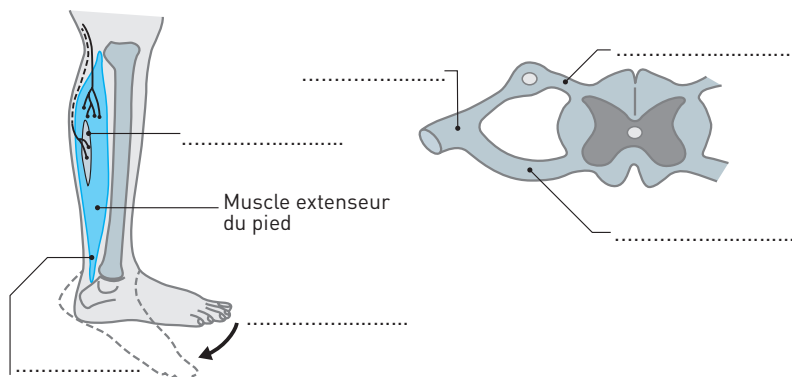
## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

## 7 LE RÉFLEXE ACHILLÉEN

★★ 15 min ▶ P. 272

Complétez et annotez le schéma suivant après l'avoir reproduit, afin de représenter les circuits neuroniques mis en jeu au cours d'un étirement bref du muscle extenseur du pied.

## Doc 14

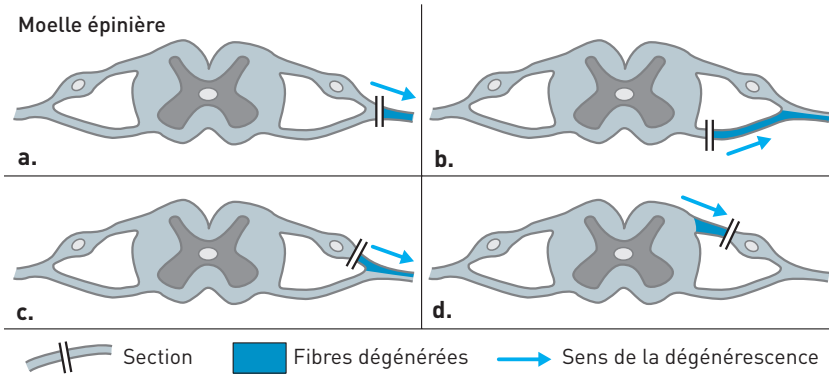


## 8 LOCALISATION DES CORPS CELLULAIRES

★★ 20 min ▶ P. 273

Lorsqu'on sectionne une fibre nerveuse (axone ou dendrite), on observe **à long terme** (plusieurs jours) que le fragment de la fibre non relié au corps cellulaire dégénère alors que l'autre fragment se maintient. On réalise quatre expériences de section (document 15) au niveau des racines des nerfs rachidiens.

## Doc 15 Expériences de section



## Résultats

- a. La région du corps innervée par le nerf rachidien sectionné est définitivement paralysée et totalement insensible.
- b. La région du corps innervée par le nerf correspondant à la racine sectionnée est définitivement paralysée mais conserve sa sensibilité.
- c et d. La région du corps innervée par le nerf correspondant à la racine sectionnée est totalement insensible mais conserve sa motricité.

**Montrez que ces quatre expériences permettent de localiser les corps cellulaires des neurones sensitifs et des motoneurones.**

Relever dans l'énoncé l'information clé qui permet d'interpréter correctement ces résultats expérimentaux.

Étudier séparément les expériences a et b, regrouper c et d.

**Repère de savoir.** Les nerfs rachidiens sont des nerfs mixtes, à la fois efférents et afférents.

9 PRODUCTION D'UN MESSAGE NERVEUX  
PAR UN MOTONEURONE

★★ 40 min ▶ P. 273

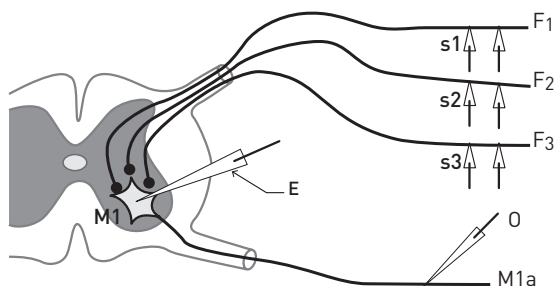
On étudie quelques aspects de la production des messages nerveux lors du réflexe myotatique.

1. Après une analyse du **document 16**, montrez que le motoneurone produit un message nerveux original, différent du message nerveux afférent.

2. Expliquez les conditions de la production d'un message nerveux par le motoneurone M1.

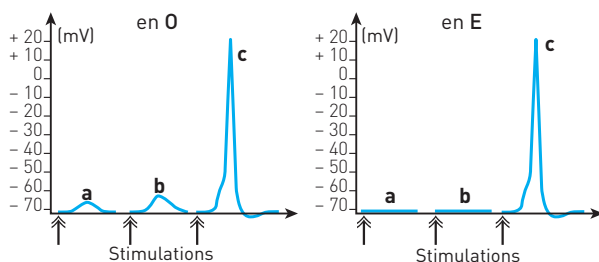
### Doc 16a Montage

Le motoneurone M de la moelle épinière est connecté, entre autres, à trois fibres nerveuses F1, F2 et F3 issues des fuseaux neuromusculaires d'un muscle. Un dispositif est mis en place sur ces fibres, la stimulation de S1, S2 ou S3 permet de produire un potentiel d'action qui se propage vers M.



### Doc 16b Enregistrements

Deux dispositifs d'enregistrements permettent d'observer la réponse de M : E est une microélectrode placée au niveau du corps cellulaire de M, O est une électrode placée sur M1a, l'axone de M.



### Doc 16c Résultats

- Expérience 1 : stimulation isolée de F1, F2 ou F3. Quelle que soit la fibre stimulée, on obtient en E et O la réponse **a**.
- Expérience 2 : stimulation simultanée de F1 et F2. On obtient en E et O la réponse **b**.
- Expérience 3 : stimulation simultanée de F1, F2 et F3. On obtient en E et O la réponse **c**.

Il y a deux questions à traiter séparément. Pour chaque question, comparer les expériences.

**Repère de savoir.** Utiliser les caractéristiques du potentiel d'action pour le repérer sur les enregistrements.

## EXERCICES D'APPROFONDISSEMENT

10 APPROCHE EXPÉRIMENTALE  
DU RÉFLEXE MYOTATIQUE

★★★ 45 min ▶ P. 274

- Par une étude rigoureuse des expériences 1 et 2, montrez que le réflexe achilléen possède les caractéristiques générales d'un réflexe : involontaire, rapide, stéréotypé.
- Étudiez l'expérience 3 pour montrer que le réflexe achilléen fait intervenir un centre nerveux. Localisez ce centre nerveux.

**Comparer** des situations expérimentales judicieusement choisies (c'est là que réside la difficulté de l'exercice).

Toutes les expériences sont réalisées avec la même personne.

■ **Expérience 1**

Le genou du sujet est posé sur une chaise. L'expérimentateur frappe le tendon d'Achille avec un marteau : à chaque fois, on observe une brève contraction du muscle de la jambe et une extension du pied. Des électrodes, reliées à un dispositif d'enregistrement, sont placées sur le muscle de la jambe qui se contracte lors de ce réflexe : le triceps sural.

L'enregistrement est déclenché quand le marteau réflexe frappe le tendon. Trois essais sont réalisés. L'activité électrique enregistrée est associée à la contraction du muscle (**doc. 17**).

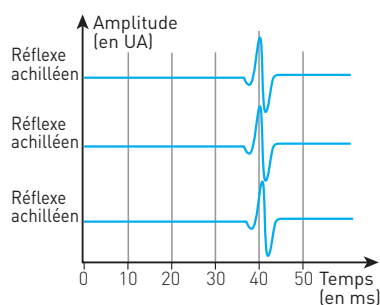
■ **Expérience 2**

Même dispositif que pour 1.

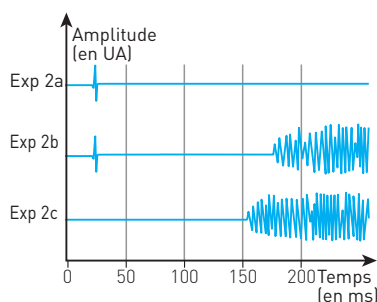
- *Expérience 2a* : L'expérimentateur frappe le tendon d'Achille avec le marteau.
- *Expérience 2b* : L'expérimentateur frappe le tendon d'Achille avec le marteau. Il est demandé au sujet de contracter volontairement son triceps sural quand il sent le choc du marteau sur son tendon.

- *Expérience 2c* : L'expérimentateur ne frappe pas le tendon d'Achille, mais la table. Il est demandé au sujet de contracter volontairement son triceps sural quand il entend le son du choc.

## Doc 17 Expérience 1



## Doc 18 Expérience 2



### ■ Expérience 3

Parmi les explications formulées pour expliquer la rapidité la réponse lors du réflexe achilléen s'opposent deux hypothèses que l'on se propose d'éprouver.

• **Hypothèse 1 :** « *Le message nerveux produit lors du choc sur le tendon va directement au muscle qui se contracte.*

*La réponse est rapide car la distance parcourue par le message est très courte.* » L'expérience destinée à éprouver

cette hypothèse repose sur la **comparaison de 2 réflexes myotatiques** : le réflexe achilléen (voir expériences précédentes) et le réflexe rotulien. Pour ce réflexe, le sujet est assis sur une table, l'expérimentateur frappe avec son marteau le tendon rotulien (au niveau du genou), ce qui déclenche la contraction du muscle quadriceps de la cuisse et l'extension de la jambe. Même dispositif d'enregistrement que pour le réflexe achilléen : électrodes posées sur le quadriceps à la même distance du point de choc sur le tendon que pour le réflexe achilléen (**doc. 19**).

• **Hypothèse 2 :** « *Le message nerveux est transmis à un centre nerveux proche du membre inférieur, la moelle épinière, mais ne monte pas au cerveau.* » Pour éprouver cette hypothèse, les résultats de l'expérience précédente sont utilisés et complétés par des calculs et des mesures.

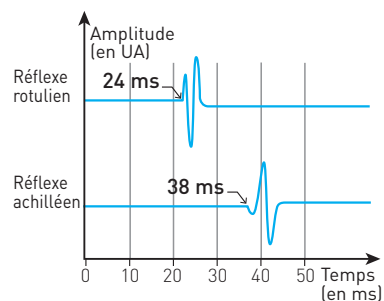
**Vitesse des messages nerveux.** Ici on suppose que ces deux réflexes sont traités par le même centre nerveux. Dans ce cas, la différence de temps entre les deux réponses n'est due qu'à la distance supplémentaire parcourue par les messages nerveux sensitifs et moteurs du réflexe achilléen. La mesure effectuée sur le sujet entre les électrodes du quadriceps et celle du triceps sural est de 35 cm.

Il a donc fallu  $38 - 24 = 14$  ms pour effectuer cette distance aller-retour, soit  $35 + 35 = 70$  cm. Le calcul donne une vitesse voisine de 50 m/s.

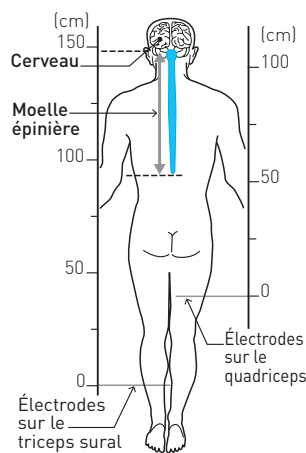
#### **Distance parcourue par les messages nerveux sensitif et moteur**

- Réflexe achilléen : Délai : 38 ms ; à 50 m/s, distance aller-retour : 190 cm.
- Réflexe rotulien : Délai : 24 ms ; à 50 m/s, distance aller-retour : 120 cm.
- *Mesures effectuées sur le sujet.* Une règle est placée sur le sujet, le zéro au niveau des électrodes. Les mesures réalisées sont reportées sur une silhouette qui montre la localisation des centres nerveux (**doc. 20**).

### Doc 19 Expérience 3



### Doc 20



## CONTRÔLE

### 11 LE RÉFLEXE ACHILLÉEN, OUTIL DIAGNOSTIQUE

★★ 60 min ▶ P. 275

Lors d'un examen, un médecin étudie les réflexes d'un patient et en particulier un réflexe myotatique : le réflexe achilléen. Pour cela, il frappe avec un marteau réflexe sur le tendon d'Achille et observe une extension du pied provoquée par la contraction du triceps sural, l'un des muscles de la jambe.

- Expliquez l'organisation nerveuse de ce réflexe à l'échelle cellulaire. Les explications seront complétées par un schéma annoté.
- Quel diagnostic médical souhaite-t-on établir avec ce réflexe ?

Faire un plan en fonction des deux questions de l'énoncé.

### 12 LA COMMUNICATION ENTRE NEURONES

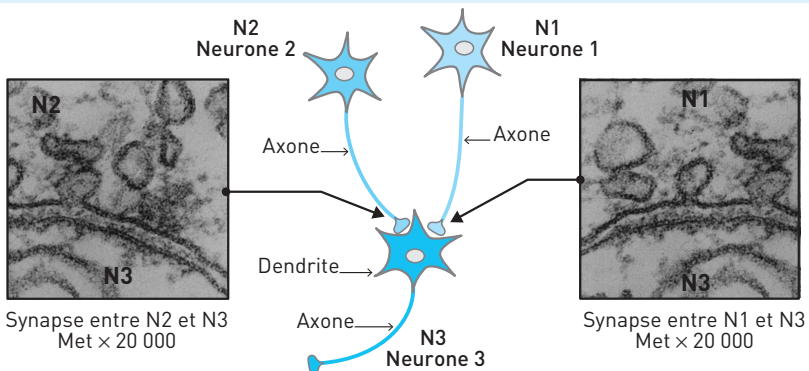
★★★ 50 min ▶ P. 277

Le système nerveux est un réseau discontinu de neurones qui communiquent au niveau des synapses. On étudie la communication entre les trois neurones.

- À l'aide des seules données d'observation du **document 21**, exposez les arguments qui permettent d'identifier les neurones pré- et postsynaptiques.
- Montrez en quoi le **document 22** permet de conforter ou de remettre en cause certains arguments.
- Exploitez les résultats expérimentaux du **document 23** mis en relation avec les autres documents pour identifier les fonctions de chaque neurone.


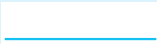




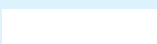
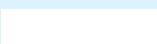

#### Doc 21 Dispositif

Grâce à des électrodes posées sur l'axone et reliées à un stimulateur, un message nerveux se propage sur l'axone. On enregistre les messages nerveux qui circulent sur les axones des trois neurones. Trois séries de mesures sont réalisées : stimulations de l'axone de N1, de l'axone de N2, de l'axone de N3.

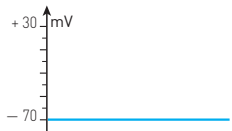
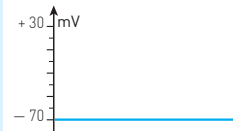
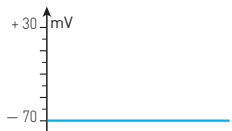
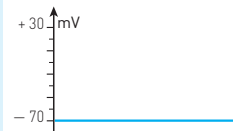
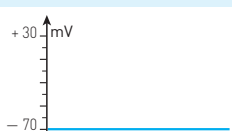
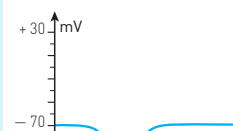
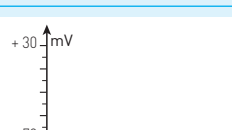
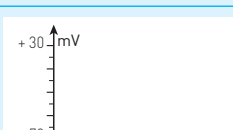


**Doc 22 Résultats**

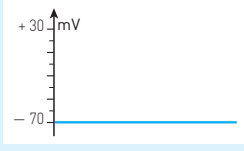
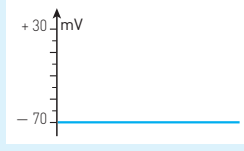
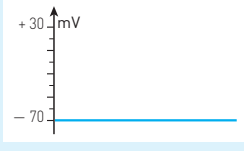
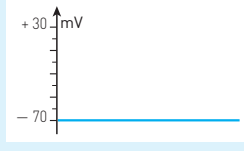
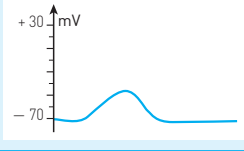
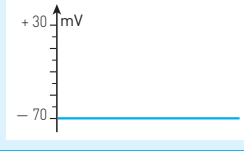
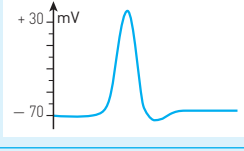
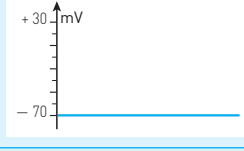
Grâce à une micropipette, des neurotransmetteurs sont injectés dans la fente synaptique entre N1 et N3, puis entre N2 et N3. Deux neurotransmetteurs sont testés : l'acétylcholine et le GABA. Grâce à des microélectrodes, le potentiel de membrane des neurones est enregistré sur une période limitée à 10 ms.

Stimulation	Enregistrements		
	Échelle des mesures		
Axone de	Axone de N1	Axone de N2	Axone de N3
N1			
N2			
N3			

**Doc 23 Étude de la synapse N2-N3**

Enregistrements Durée : 10 ms	Injections	
	Acétylcholine	GABA
Membrane synaptique N2		
Axone N2		
Membrane synaptique N3		
Axone N3		

## Doc 24 Étude de la synapse N1-N3

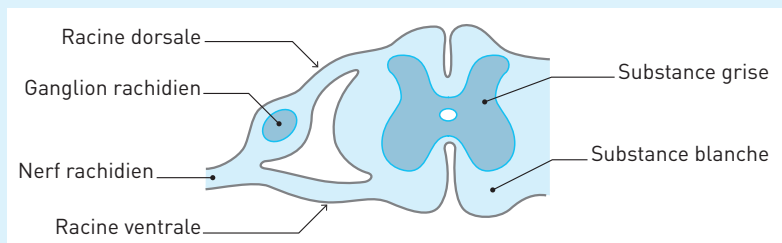
Enregistrements Durée : 10 ms	Injections	
	Acétylcholine	GABA
Membrane synaptique N1		
Axone N1		
Membrane synaptique N3		
Axone N3		



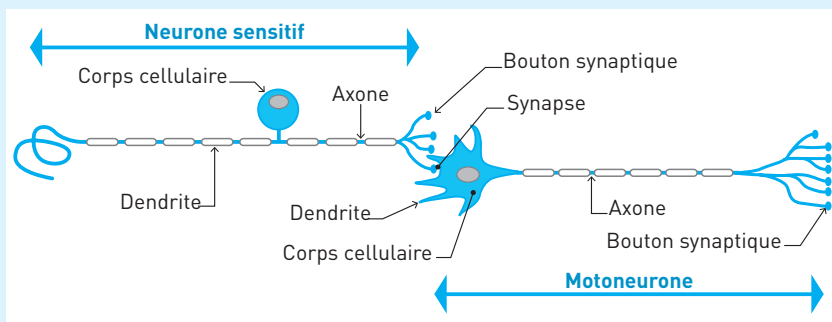
## CORRIGÉS

10

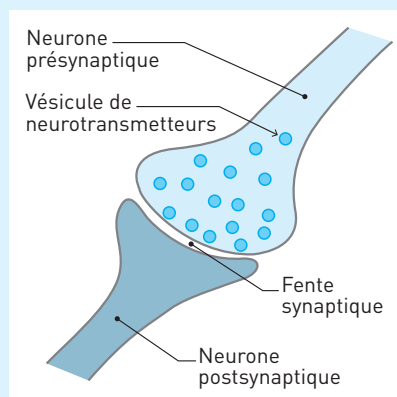
## 1 Doc 24



## 2 Doc 25



## 3 Doc 26



- 4 1. a et b. Vrai. c. Faux. Si les corps cellulaires des neurones sont localisés au niveau de la substance grise des centres nerveux, leurs fibres établissent des jonctions

avec de multiples organes du corps. **d.** Vrai.

**2. a.** Faux. Les fibres sont aussi formées par les dendrites. **b.** Vrai. Un nerf est constitué par un ensemble de fibres nerveuses. **c** et **d.** Vrai.

**3. a** et **b.** Vrai. **c.** Faux. **d.** Faux. Les corps cellulaires des neurones sensitifs sont situés dans les ganglions rachidiens, situés dans la racine dorsale de la moelle. **e.** Faux. Un nerf ne contient que des fibres, axones ou dendrites.

**5** **1. a.** Faux. Seules les cellules nerveuses peuvent produire et propager un potentiel d'action. Les membranes des cellules musculaires peuvent propager un potentiel d'action musculaire. **b.** Vrai. **c.** Faux. Un potentiel d'action a une amplitude constante, de 100 mV. **d.** Vrai.

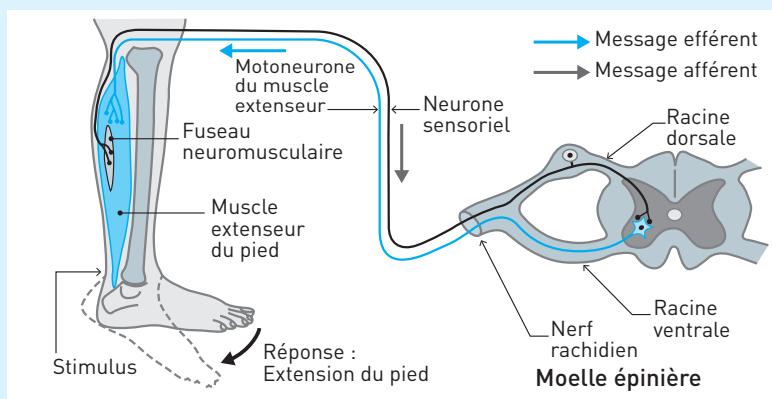
**2. a.** Vrai. **b.** Faux. Un message nerveux est aussi produit par les neurones situés dans les centres nerveux. **c.** Vrai. **d.** Faux. Neurone postsynaptique.

**3. a.** Faux. Un neurotransmetteur peut aussi être inhibiteur. **b.** Faux. Un neurotransmetteur est libéré dans la fente synaptique. **c.** Vrai. **d.** Vrai.

**6** **1. a.** Faux. C'est une activité involontaire. **b.** Vrai. **c.** Faux. Un centre nerveux intervient toujours, quelle que soit l'activité nerveuse. **d.** Vrai.

**2. a.** Faux. Se traduit par la contraction d'un muscle étiré. **b.** Faux. Ce réflexe fait intervenir la moelle épinière. **c** et **d.** Vrai.

### **7** Doc 27 Circuits neuroniques mis en jeu au cours d'un étirement bref du muscle extenseur



**8** **Analyse :** La section **a** entraîne une paralysie et une insensibilité de la région du corps innervée par le nerf sectionné. Les fibres dégèrent du côté périphérique, non relié à la moelle épinière.

**Interprétation :** La section **a** atteint à la fois les fibres afférentes, sensibles, issues des corps cellulaires des neurones sensitifs et les fibres efférentes issues des corps cellulaires des motoneurones. Les corps cellulaires de ces neurones sont donc situés en amont (du côté moelle épinière) de la section.

**Analyse :** La section **b** entraîne une perte de la motricité mais pas de la sensibilité. Les fibres dégèrent du côté périphérique.

**Interprétation :** Avec la section **b** ce sont les axones des motoneurones qui ont été sectionnés. Les corps cellulaires des motoneurones sont donc situés dans la moelle épinière.

**Analyse :** Les sections **c** et **d** entraînent une perte de la sensibilité mais pas de la motricité. Les fibres dégèrent de part et d'autre du ganglion rachidien.

**Interprétation :** Ces deux sections touchent les fibres issues des corps cellulaires des neurones sensitifs. Les corps cellulaires des neurones sensitifs sont localisés dans les ganglions rachidiens.

### Bilan

Les corps cellulaires des motoneurones sont donc situés dans la moelle épinière. Les corps cellulaires des neurones sensitifs se localisent dans les ganglions rachidiens.

#### 9 1. Le motoneurone produit un message nerveux original

**Analyse :** Seule la stimulation simultanée des trois fibres issues des fuseaux neuromusculaires permet la production d'une modification du potentiel de membrane de 100 mV d'amplitude qui se propage sur l'axone du motoneurone.

La stimulation d'une ou deux fibres n'entraîne pas une telle modification du potentiel de membrane.

**Interprétation :** C'est un potentiel d'action qui se propage sur l'axone de M1. Le texte précise que la stimulation d'une fibre issue d'un fuseau neuromusculaire permet la formation d'un potentiel d'action qui se propage vers le motoneurone M. Un potentiel d'action présent dans un neurone sensitif ne déclenche pas obligatoirement un potentiel d'action dans le motoneurone. Un potentiel d'action issu d'une fibre sensitive ne suffit pas pour déclencher la production d'un potentiel d'action par le motoneurone.

**Conclusion :** Un message nerveux est codé en fréquence de potentiels d'action. L'expérience, ici limitée à l'observation d'un seul potentiel d'action, montre que le motoneurone ne transmet pas le message afférent, mais produit une réponse qui dépend des messages nerveux afférents, cette réponse est donc originale.

#### 2. Les conditions de la production d'un message nerveux

**Analyse :** La stimulation des fibres de fuseaux neuromusculaires provoque :

- une dépolarisation de la membrane du motoneurone : 5 mV pour une fibre stimulée, 10 mV pour deux fibres stimulées ;
- un potentiel d'action quand trois fibres sont stimulées.

**Interprétation :** La dépolarisation provoquée par les potentiels d'action de deux fibres ne suffit pas pour déclencher la formation d'un potentiel d'action. Le seuil pour la formation d'un potentiel d'action par le motoneurone est atteint avec la stimulation apportée par les potentiels d'action des trois fibres en même temps.

## Conclusion

Il existe un seuil de stimulation pour qu'un motoneurone produise un message nerveux moteur.

### 10 1. Montrons que le réflexe achilléen possède les caractéristiques générales d'un réflexe

#### • Expérience 1

**Analyse :** Lors des trois essais réalisés, le choc du marteau sur le tendon, on obtient :

- une brève contraction du muscle de la jambe ;
- une activité électrique du muscle qui décrit l'activité du muscle quasi identique : même durée, même forme du signal, même délai entre le choc et la réponse.

**Conclusion :** Le réflexe achilléen produit une réponse stéréotypée, toujours identique.

#### • Expérience 2

**Analyse :** Lors des expériences 2a et 2b, le choc sur le tendon déclenche une activité réflexe. Il y a présence d'un bref signal électrique du muscle avant 50 ms. Lors de l'expérience 2c, il n'y a pas de choc sur le tendon et absence de ce signal électrique.

**Conclusion :** Le signal électrique qui se produit avant 50 ms est lié à l'activité réflexe.

**Analyse :** Une activité volontaire n'est pas demandée pour l'expérience 2a mais elle est demandée pour les expériences 2b et 2c. Or, seules les expériences 2b et 2c montrent une activité électrique durable et retardée, au-delà de 150 ms.

**Conclusion :** Ce signal au-delà de 150 ms est celui de l'activité volontaire.

#### Bilan

Le réflexe est donc une activité très rapide, le délai entre le stimulus et la réponse est trois à quatre fois moins important. Le réflexe est une activité involontaire.

### 2. Montrons que le réflexe fait intervenir un centre nerveux qu'il faut localiser

#### • Hypothèse de la transmission directe

**Analyse de l'expérience 3 :** Pour ces deux réflexes, la distance entre le lieu du choc et les électrodes est identique. Si l'hypothèse d'une transmission directe d'un message nerveux est juste, nous devrions obtenir un délai de réponse très voisin, puisque la distance à parcourir est la même. Or, le réflexe rotulien apparaît beaucoup plus tôt que le réflexe achilléen, 24 ms contre 38 ms.

**Conclusion :** Cette hypothèse n'est pas validée par l'expérience.

#### • Hypothèse de l'intervention d'un centre nerveux (documents 19 et 20)

##### – Analyse du document 19

Le réflexe rotulien apparaît 24 ms après le stimulus, mais le réflexe achilléen apparaît 38 ms après le stimulus, soit 12 ms plus tard.

**Conclusion :** Si ces deux réflexes font intervenir le même centre nerveux, le délai entre le stimulus et la réponse correspond à la circulation d'un message nerveux afférent, qui se dirige vers un centre nerveux et un message efférent qui va du centre

vers le muscle. La circulation des messages nerveux impliqués dans le réflexe achilléen a une distance plus grande à parcourir, le délai de 12 ms correspond à cette distance. L'hypothèse de l'intervention d'un centre nerveux est plausible.

#### – Analyse du document 20

Le calcul de la distance totale, aller-retour du message nerveux pour le réflexe rotulien est de 120 cm, soit une distance aller de 60 cm. Le point situé 60 cm au-dessus des électrodes correspond à la base de la moelle épinière. Pour le réflexe achilléen, la distance aller est de 90 cm, ce qui porte le point de retour à peu près au même niveau que pour le réflexe rotulien, à la base de la moelle épinière.

**Conclusion :** Ces données confirment l'hypothèse de l'intervention d'un centre nerveux. Ce centre est localisé dans la partie basse de la moelle épinière. L'intervention du cerveau, situé beaucoup plus haut, est incompatible avec les données.

**11** Un réflexe est une activité rapide, involontaire et stéréotypée. Le réflexe achilléen est un réflexe myotatique : l'étirement d'un muscle, dans ce cas le triceps sural, provoque sa contraction réflexe. La mise en évidence de ce réflexe est facile : un choc sur le tendon d'Achille avec un marteau adapté à cet usage provoque un étirement musculaire.

### 1 Les caractéristiques du réflexe achilléen

#### a. Organisation des voies nerveuses du réflexe

Ce réflexe fait intervenir :

- deux types de neurones : des neurones sensitifs dont les fibres forment la voie sensorielle et des motoneurones dont les axones forment la voie motrice ;
- un centre nerveux, la moelle épinière dans sa partie terminale située au niveau des vertèbres lombaires.

Entre le muscle et les centres nerveux, les fibres des neurones sont regroupées et forment un nerf.

#### b. Étude fonctionnelle du réflexe : du stimulus à la réponse

- **Stimulus et fuseau neuromusculaire.** L'étirement du muscle stimule le fuseau neuromusculaire, récepteur sensoriel situé dans le triceps sural. Le fuseau neuromusculaire code l'étirement du muscle en message nerveux : plus l'étirement du muscle est important, plus la fréquence des potentiels d'action est élevée.
- **Voie sensitive ou voie afférente.** La fibre nerveuse qui sort du fuseau neuromusculaire est la dendrite d'un neurone sensitif dont le corps cellulaire est situé dans le ganglion rachidien de la racine dorsale de la moelle épinière. Le message nerveux sensitif (= afférent) se propage sur la dendrite, puis sur l'axone jusqu'aux boutons synaptiques situés à son extrémité.
- **La synapse neuro-neuronale.** Le neurone sensitif est en contact avec le motoneurone dont l'axone se prolonge jusqu'au triceps sural. Le message nerveux afférent provoque l'exocytose des neurotransmetteurs stockés dans les vésicules des boutons synaptiques du neurone sensitif. Le neurotransmetteur, l'acétylcholine, est libéré dans la fente synaptique. Plus la fréquence des potentiels d'action du message nerveux sensitif est élevée, plus la concentration en acétylcholine dans la fente synaptique est importante.

L'acétylcholine se fixe sur les récepteurs de la membrane du motoneurone. Le neurotransmetteur non fixé est rapidement détruit et recapturé par le neurone sensitif.

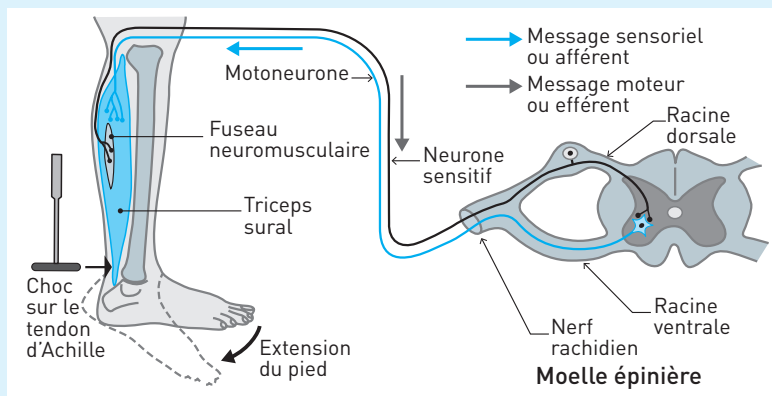
- **Voie motrice ou voie efférente.** La fixation de l'acétylcholine sur le récepteur membranaire entraîne la dépolarisation de la membrane postsynaptique (celle du motoneurone). Si la dépolarisation est importante, un message nerveux efférent (moteur) est produit, il se propage sur l'axone du motoneurone jusqu'à la synapse neuromusculaire.

- **Synapse neuromusculaire.** Le message nerveux efférent provoque l'exocytose de l'acétylcholine stockée dans les vésicules des boutons synaptiques du motoneurone. Là aussi, la fréquence du message nerveux est codée en concentration de neurotransmetteur libéré.

Dans la fente synaptique, l'acétylcholine se fixe sur les récepteurs de la membrane musculaire, et provoque une dépolarisation. Les neurotransmetteurs non fixés sont rapidement détruits et recapturés comme pour la synapse neuro-neuronale.

- **La réponse : la contraction du muscle.** La dépolarisation de la membrane des fibres musculaires entraîne la naissance d'un message nerveux musculaire codé en fréquence de potentiels d'action, qui se propage et provoque la contraction des fibres musculaires.

## Doc 28



## 2 Un premier diagnostic médical

La réalisation de ce réflexe nécessite un état fonctionnel pour toutes les structures nerveuses impliquées :

- le nerf dans lequel se trouvent les fibres nerveuses sensitives et motrices ;
- le centre nerveux, ici l'extrémité de la moelle épinière.

Chaque réflexe étudié lors d'un examen médical permet de contrôler le fonctionnement d'une partie de la moelle épinière. Ces examens sont simples, rapides et sans danger. Pour un médecin, une anomalie dans la réponse obtenue pour un réflexe permet d'établir un diagnostic en termes de causes possibles et d'investigations cliniques à entreprendre pour préciser ce premier diagnostic.

**12** 1. Comment identifier les neurones pré- et postsynaptiques

Chaque neurone possède deux types de fibres : la fibre longue est un axone, les fibres courtes sont des dendrites.

- L'axone de N1 entre en contact avec une dendrite de N3. Or le message nerveux qui circule sur l'axone s'éloigne du corps cellulaire. N1 envoie un message à N3.

La synapse N1-N3 montre des vésicules dans le bouton synaptique de N1 et une absence de vésicules dans la dendrite de N3. Or, les neurotransmetteurs assurent la communication entre deux neurones au niveau d'une synapse. C'est N1 qui libère le médiateur chimique.

N1 est un neurone présynaptique, N3 un neurone postsynaptique.

- La même observation peut être réalisée avec N2 et N3.

L'axone de N2 est en contact avec le corps cellulaire de N3. Des vésicules sont présentes dans le bouton synaptique de N2 mais sont absentes chez N3.

Avec le même raisonnement, on peut penser que N2 est un neurone présynaptique, et N3 un neurone postsynaptique.

**2. Vérification ou invalidation des arguments**

Les enregistrements montrent des variations du potentiel de membrane d'égale amplitude : 100 mV.

**Conclusion :** Chaque variation de potentiel de 100 mV est un potentiel d'action. Un message nerveux est codé par la fréquence des potentiels d'action.

- La stimulation électrique de l'axone de N1 provoque :

- l'apparition d'un message nerveux qui se propage sur l'axone de N1 ;

- l'apparition d'un message nerveux dont la fréquence des PA est plus faible sur l'axone de N3 ;

- l'absence de message nerveux sur N2.

**Conclusion :** N1 stimule N3. Cette expérience confirme les arguments dégagés par l'observation des neurones : N1 est un neurone présynaptique, N3 est un neurone postsynaptique.

- Une stimulation électrique identique à celle réalisée dans l'expérience précédente est appliquée sur l'axone de N2. On observe :

- l'apparition d'un message nerveux qui se propage sur l'axone de N2 ;

- l'absence de message nerveux sur N2 et N3.

**Conclusion :** N2 ne stimule pas N3. Cette expérience ne confirme pas les arguments dégagés de l'observation : N2 présynaptique, N3 postsynaptique.

- Une stimulation électrique identique à celle réalisée dans l'expérience précédente est appliquée sur l'axone de N3. On observe :

- l'apparition d'un message nerveux qui se propage sur l'axone de N3 ;

- l'absence de message nerveux sur N2 et N1.

**Conclusion :** N3 ne stimule ni N1 ni N2. Une synapse ne transmet l'information que dans un seul sens : du présynaptique au postsynaptique. Cette expérience conforte l'observation : N3 est un neurone postsynaptique.

Le problème posé par ce document est : Quel est le rôle de N2 ?

### 3. Identification des fonctions de N1, N2 et N3

#### ■ Étude de la synapse N1-N3

Un neurotransmetteur est injecté dans la fente synaptique qui sépare N1 et N3.

**Analyse.** L'injection d'acétylcholine :

- ne provoque aucune modification du potentiel de membrane de N1 ;
- dépolarise la membrane postsynaptique de N3 et est suivie par l'apparition d'un potentiel d'action sur l'axone de N3.

L'injection de GABA ne modifie aucun potentiel de membrane.

**Conclusion :** Seule l'injection d'acétylcholine donne une réponse pour N3 comparable à celle produite par un message nerveux. Les vésicules présentes dans les boutons synaptiques de N1 contiennent de l'acétylcholine. Ce neurotransmetteur stimule N3 en dépolarisant sa membrane postsynaptique, ce qui entraîne la formation de potentiels d'action qui se propagent sur son axone.

#### ■ Étude de la synapse N2-N3

Un neurotransmetteur est injecté dans la fente synaptique qui sépare N2 et N3.

**Analyse.** L'injection de GABA :

- ne provoque aucune modification du potentiel de membrane de N2 ;
- hyperpolarise la membrane postsynaptique de N3. Aucun potentiel d'action n'apparaît sur l'axone de N3.

L'injection d'acétylcholine ne modifie aucun potentiel de membrane.

**Conclusion :** Seule l'injection de GABA provoque une réponse pour N3. Les vésicules présentes dans les boutons synaptiques de N2 contiennent du GABA. Ce neurotransmetteur inhibe N3 en hyperpolarisant la membrane postsynaptique. N2 est donc un neurone présynaptique, mais il a une fonction inhibitrice.

#### ■ Bilan

N1 et N2 sont deux neurones présynaptiques, N3 est un neurone postsynaptique.

N1 stimule N3 par la libération d'acétylcholine.

N2 inhibe N3 par la libération de GABA.



## 11

## Le cortex moteur et sa plasticité

**G**areth T est une star du rugby mondial. Il se souvient de cette soirée où tout faillit s'arrêter. Gareth regarde la télévision quand il sent des picotements envahir son bras gauche, puis sa jambe gauche. L'angoisse grandit quand son épouse remarque que la partie gauche de son visage s'affaisse.

Un AVC (accident vasculaire cérébral) est un arrêt ou une perturbation de la circulation sanguine cérébrale. Si les neurones sont privés de sang plus de quelques minutes, ils meurent. Cela se traduit souvent par la paralysie d'une partie du corps, temporaire ou définitive.

Comment le cerveau contrôle-t-il les mouvements ? Quelles sont les connexions qui existent entre les motoneurones de la moelle épinière et les neurones cérébraux ?

### I DE LA VOLONTÉ AU MOUVEMENT

#### 1. Le motoneurone, l'unité finale du contrôle des muscles

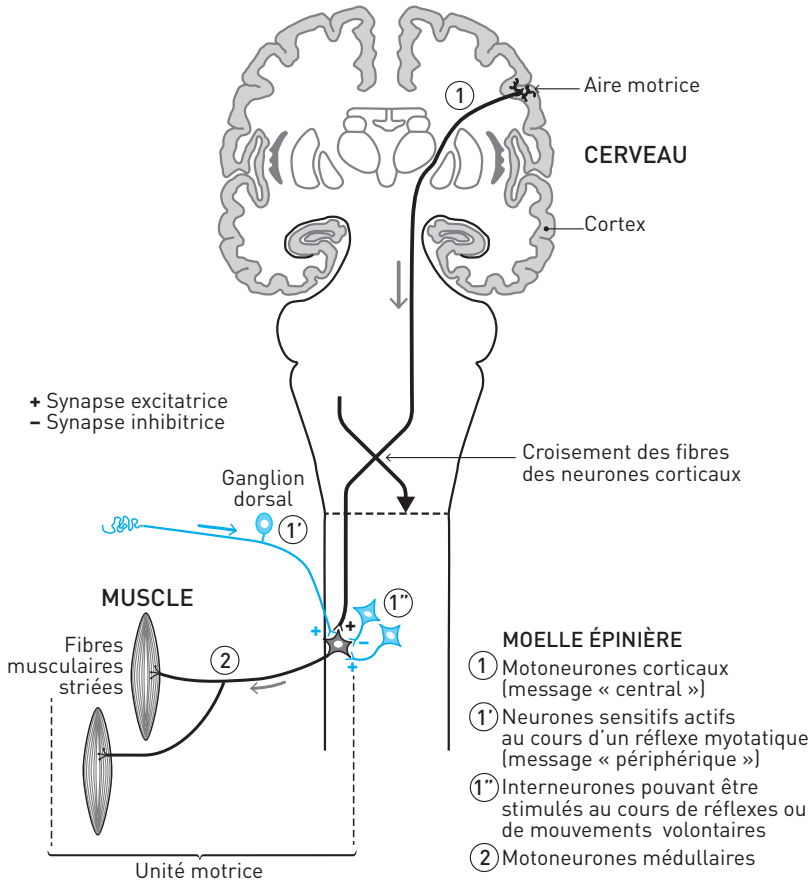
- Que le mouvement soit involontaire (réflexe) ou volontaire, la commande des fibres musculaires est assurée par des **motoneurones (doc. 1)**.
- Le corps cellulaire d'un motoneurone reçoit des informations diverses qu'il intègre sous la forme d'un **message moteur unique**. Chaque fibre musculaire d'une **unité motrice** reçoit le message d'un **seul** motoneurone.

L'ensemble formé par un motoneurone et l'ensemble des fibres musculaires qu'il innerve constitue une unité motrice.

- Les messages nerveux moteurs qui partent des neurones du cortex cheminent par des faisceaux d'axones (constitutifs de la matière blanche du cerveau et de la moelle épinière) qui se terminent sur les motoneurones médullaires.

Le cortex correspond à la substance grise présente à la surface des hémisphères cérébraux, il mesure quelques millimètres d'épaisseur.

## Doc 1 Le motoneurone, la voie finale des messages moteurs



Une lésion de la moelle entraîne la paralysie des muscles des territoires situés sous la lésion : elle rompt la connexion entre neurones corticaux et neurones médullaires (paraplégie ou tétraplégie si la lésion est haute).

### L'essentiel

Les motoneurones médullaires reçoivent en permanence de **multiples messages**, périphériques ou centraux, les uns excitateurs, les autres inhibiteurs, qu'ils intègrent en un message unique.

## 2. Le cortex moteur

Il y a un cortex moteur droit et un cortex moteur gauche (aires motrices). Leur stimulation directe (indolore) déclenche des mouvements dans la région opposée du corps : à gauche si on stimule le cortex droit et inversement. L'élaboration préalable de la commande motrice fait intervenir d'autres aires corticales, notamment les aires motrices supplémentaires (AMS) et prémotrices (APM). Une lésion des aires AMS et APM entraîne une difficulté à réaliser des gestes complexes alors que la réalisation des gestes simples ne pose pas de problème. En revanche, une lésion du cortex moteur se traduit par une paralysie.

### ■ La représentation du corps au niveau du cortex moteur : l'homonculus moteur

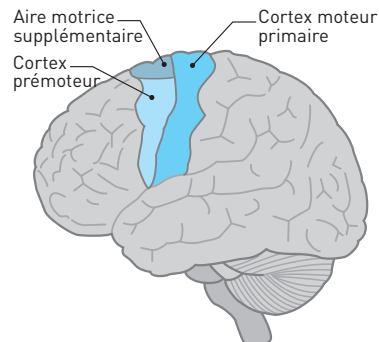
Au cours d'opérations neurochirurgicales, Penfield a stimulé le cortex moteur de patients conscients et a noté la localisation des mouvements en résultant. Chaque zone du cortex moteur contrôle les muscles d'une partie du corps. **La surface des régions corticales est proportionnelle à la finesse du contrôle moteur** : ainsi la représentation de la face et des mains est plus importante (contrôle précis) que celle des muscles du tronc. Parallèlement, les motoneurones médullaires innervant les muscles responsables de mouvements fins sont aussi plus nombreux que ceux des muscles responsables de mouvements moins précis.

### ■ Coordination des unités motrices

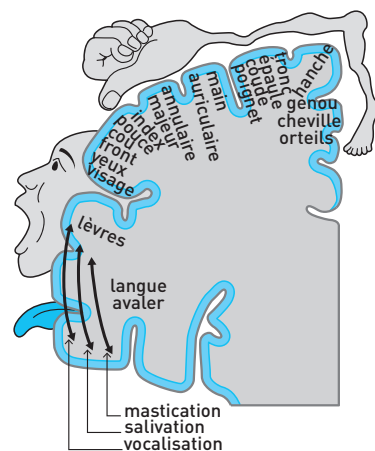
L'excitation d'un neurone cortical unique donne naissance à un mouvement caractéristique d'une partie du corps plutôt qu'à la contraction d'un muscle particulier.

En effet, des ramifications de cet axone forment d'une part des contacts synaptiques excitateurs avec les unités motrices de muscles **agonistes** (= qui concourent à la réalisation d'un même mouvement) et d'autre part avec des interneurons inhibiteurs des motoneurones des muscles **antagonistes**. Ainsi les neurones du

### Doc 2 Le cortex moteur

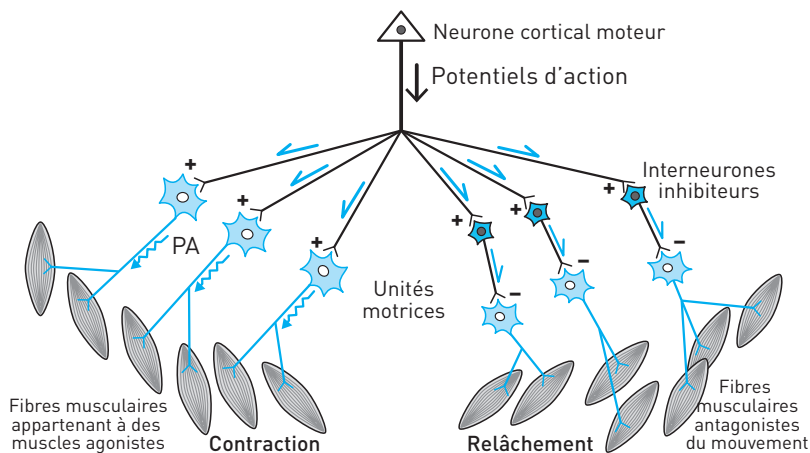


### Doc 3 Homonculus moteur



cortex moteur commandant, via les circuits médullaires, **une mise en jeu coordonnée des muscles.**

#### Doc 4 Commande corticale d'unités motrices agonistes et antagonistes



#### L'essentiel

Les messages assurant la commande volontaire des muscles sont émis par les neurones du **cortex moteur** qui établissent des synapses excitatrices directes avec les motoneurones de muscles agonistes et indirectes avec les motoneurones des muscles antagonistes via les interneurons inhibiteurs.

## II MOTRICITÉ ET PLASTICITÉ NEURONALE

### 1. Apprentissage et plasticité

- La plasticité a été étudiée en première au niveau du cortex visuel.
- Des techniques modernes d'investigation cérébrale (IRMf) permettent d'affiner la représentation corticale motrice du corps établie par Penfield (*homunculus*). Elles révèlent non seulement des différences entre individus mais surtout des **changements chez un même individu au cours de sa vie**. On a ainsi pu établir qu'à la suite de l'apprentissage d'un mouvement précis, répété durant plusieurs semaines, il y avait une extension de la région du cortex moteur commandant ce mouvement. C'est grâce au recrutement de neurones corticaux supplémentaires commandant le mouvement qu'il y a amélioration de la performance.

Voir l'exercice 5.

Cela signifie que des neurones qui n'étaient pas concernés initialement dans la réalisation du mouvement, le sont devenus à la suite de l'entraînement. Il y a eu

**création** de nouvelles synapses et/ou **augmentation de l'efficacité** des synapses déjà existantes.

Cette aptitude du cortex à se modifier en réponse à son activation est appelée **plasticité cérébrale**, ou **plasticité neuronale**.

Le cortex prémoteur (APM) contient une catégorie de **neurones** dits « **miroirs** » : ces neurones s'activent lorsqu'un individu en regarde un autre exécuter une action. Ainsi se construisent des circuits neuronaux qui « imitent » les circuits de la personne observée, d'où le nom de neurones « miroirs ». Les circuits miroirs sont actifs lorsque, ensuite, l'individu exécute lui-même l'action qu'il a observée.

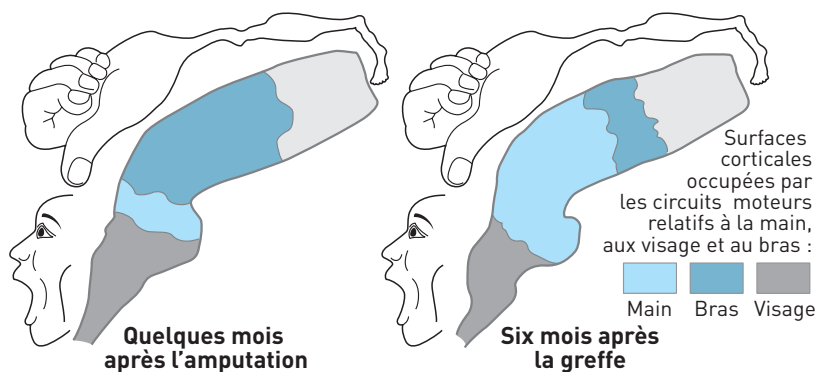
## 2. Plasticité et récupération fonctionnelle

### ■ Amputation et greffe

**EXEMPLE :** Suite à une amputation accidentelle des deux mains chez un patient (Denis Chatelier en 1996), l'imagerie cérébrale a révélé au bout de quelques mois que les territoires moteurs de la face et de l'avant-bras avaient gagné sur celui de la main.

Quatre ans après l'amputation, le patient était greffé de deux mains. À la suite d'un programme de rééducation particulièrement intense, il s'approprie, mois après mois, ses deux mains et retrouve une mobilité lui permettant de réaliser des gestes tels que l'utilisation du téléphone ou de stylos. L'imagerie cérébrale a révélé, six mois après la greffe, que la région de la main du cortex moteur avait retrouvé son étendue et son emplacement d'origine, ainsi que les régions de la face et de l'avant-bras. Le cortex a reconnu les mains greffées et en a pris le contrôle. Ce double changement de l'organisation du cortex moteur, après l'amputation d'une part, et après la greffe d'autre part, est une manifestation de la **plasticité cérébrale**.

#### Doc 5 Amputation des mains, greffe et réorganisation du cortex moteur



## ■ Accident vasculaire cérébral (AVC)

On constate dans les jours, semaines ou mois qui suivent un accident vasculaire, une **récupération de la motricité**, plus ou moins complète suivant les patients, favorisée par des exercices de **rééducation**. Cette récupération implique un rétablissement du fonctionnement du cortex moteur **malgré la mort des neurones au cours de l'AVC** : des neurones intacts qui avant l'AVC ne participaient pas directement à l'exécution de certains mouvements ont été intégrés dans de nouveaux circuits moteurs corticaux.

### L'essentiel

La plasticité cérébrale est la **capacité du cerveau à modifier les connexions synaptiques entre ses neurones**. Elle permet mémoire et apprentissage mais intervient également dans les processus de récupération après une lésion cérébrale ou une modification cérébrale due à des lésions corporelles. La plasticité cérébrale **dépend de l'environnement et permet de s'y adapter**.

## SAVOIR-FAIRE

### 1. Vocabulaire

- **Cortex** : matière grise à la surface des hémisphères cérébraux, constituée par les corps cellulaires de milliards de neurones, répartis en couches.
- **Réseau** : ensemble d'unités (ici, des neurones) interconnectées entre elles, ce qui permet l'échange et le traitement des informations.
- **Homonculus** : Personnage dessiné par la représentation des différentes parties du corps sur le cortex moteur. Ainsi la main de l'homonculus correspond à la surface occupée par les neurones qui commandent les muscles moteurs de la main. Il existe aussi un homonculus au niveau du cortex sensoriel qui reçoit les informations en provenance des capteurs du corps.
- **Unité motrice** : Ensemble formé par le motoneurone et les fibres musculaires qu'il contrôle.
- **Muscles agonistes/antagonistes** : Les muscles agonistes permettent la réalisation d'un même mouvement, alors que leurs antagonistes permettent la réalisation de mouvements opposés.
- **Plasticité cérébrale** : Ensemble des mécanismes par lesquels les réseaux neuronaux se remodelent au cours de leur activation ou de leur inactivation, dépendantes de l'environnement. Ces mécanismes impliquent un renforcement, un affaiblissement, ou la disparition de synapses.

## 2. Compétences

Les deux chapitres sur le système nerveux impliquent la maîtrise d'un **vocabulaire précis**. Vous devez aussi être **capable d'associer les circuits neuronaux étudiés aux structures anatomiques qui leur correspondent**. Par exemple, les corps cellulaires des neurones moteurs corticaux sont situés au niveau du cortex de chaque hémisphère cérébral, leurs axones constituent la matière blanche du cerveau et de la moelle épinière (entre autres axones), leurs terminaisons synaptiques s'établissent dans la matière grise des segments de la moelle épinière. Les neurones « en T » dont les dendrites participent à la structuration des fuseaux neuromusculaires, ont eux, leurs corps cellulaires situés dans les ganglions dorsaux rachidiens.

## 3. Repères

Vous devez être capable de redessiner les circuits neuronaux du **document 1** et avoir des représentations claires de la **structure** et du **fonctionnement d'un neurone** ainsi que d'une **synapse**. En effet, lorsqu'on parle de **plasticité cérébrale**, cela implique des **modifications dans le nombre et la structure des synapses** (augmentation de la densité des récepteurs membranaires postsynaptiques en cas d'activation fréquente d'un neurone par exemple).

 Voir le chapitre 10.

## EXERCICES D'APPLICATION

1 QCM

★★ 10 min ▶ P. 298

Relevez les affirmations exactes.

**1. Les axones des neurones du cortex moteur droit :**

- a. ne dépassent pas 10 cm de longueur chez l'adulte.
- b. innervent directement les fibres musculaires dont ils commandent la contraction.
- c. commandent les muscles de la partie gauche du corps.
- d. activent des motoneurones médullaires.
- e. activent des interneurones inhibiteurs de motoneurones.

**2. Les motoneurones de la moelle épinière située au niveau du bassin :**

- a. reçoivent des messages issus de l'ensemble du cortex moteur.
- b. reçoivent des messages issus des muscles des membres inférieurs.
- c. reçoivent des messages issus des fuseaux neuromusculaires des muscles qu'ils innervent.
- d. répondent soit aux messages d'origine périphérique, soit aux messages corticaux.
- e. répondent par un message unique à l'ensemble des messages qu'ils reçoivent.

**3. Chez les vertébrés, la section de la moitié droite de la moelle épinière juste au-dessus de la zone des nerfs rachidiens innervant les membres inférieurs :**

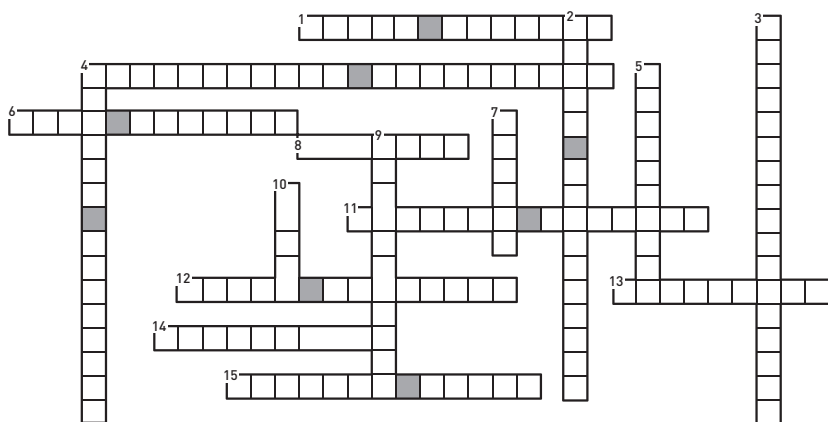
- a. sectionne les axones issus du cortex moteur gauche.
- b. détruit des motoneurones.
- c. provoque une paralysie des deux membres supérieurs (paraplégie).
- d. a les mêmes conséquences qu'une atteinte de l'ensemble du cortex moteur gauche.
- e. entraîne la perte des mouvements volontaires du membre inférieur gauche.
- f. se traduit par la perte des réflexes myotatiques des membres inférieurs.

**4. Entre un individu droitier qui a appris à jouer du piano et un non musicien droitier également, on peut imaginer que :**

- a. la zone corticale gauche qui contrôle les muscles permettant de bouger la main est plus étendue chez le pianiste que chez le non musicien.
- b. les zones corticales motrices de la main gauche prennent à peu près la même surface chez les deux individus.
- c. les cortex moteurs des deux mains sont semblables chez les deux individus.
- d. les cortex moteurs des deux mains sont plus étendus chez le pianiste.
- e. le cortex moteur de la main droite est plus étendu que celui de la main gauche chez le pianiste seulement.
- f. le cortex moteur de la main droite est plus étendu que celui de la main gauche chez les deux individus.



## Doc 6 Grille à compléter

**Horizontalement**

1. Ensemble constitué par un motoneurone et les fibres musculaires qu'il contrôle.
4. Neurone qui transmet des messages nerveux aux fibres musculaires.
6. Région du cortex qui contrôle les mouvements du corps.
8. À cet endroit, les trains de PA provoquent la libération de molécules de neuro-médiateur dans un espace très étroit.
11. Tissu nerveux qui contient les prolongements (axones et dendrites) des neurones.
12. Zone où sont localisés les corps cellulaires des motoneurones médullaires.
13. Type de molécule intégrée aux membranes postsynaptiques. Plus leur densité membranaire est élevée, plus la sensibilité de l'élément postsynaptique l'est aussi.
14. C'est l'avatar dessiné par la représentation du corps sur le cortex moteur : il a de très grandes mains.
15. Tissu nerveux qui contient les corps cellulaires des neurones.

**Verticalement**

2. Endroit où est localisé le noyau dans un neurone, on y inclut souvent les multiples dendrites qui l'entourent.
3. Molécule fabriquée par un neurone qui agit en se fixant sur les récepteurs d'un autre neurone.
4. Centre nerveux impliqué dans le réflexe myotatique.
5. Propriété des neurones, qui dépend de la fréquence à laquelle ils sont activés et assure un remodelage des circuits neuronaux.

7. À la surface des hémisphères cérébraux, il contient les corps cellulaires de milliards de neurones.

9. Qualifie un muscle dont la contraction provoque un mouvement opposé à celui créé par la contraction du muscle pris comme référence.

10. Lorsqu'il participe à la constitution de la matière blanche ou d'un nerf, on l'appelle « fibre nerveuse », il transmet des messages à d'autres cellules.

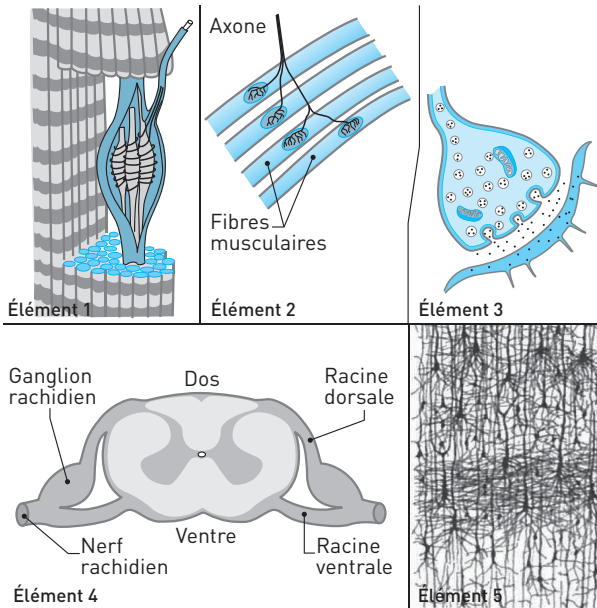
### 3 ASSOCIATIONS

★ 15 min ► P. 299

Faites correspondre à chacun des éléments du système nerveux représentés :

- une ou plusieurs structures (listes des lettres) ;
- une ou plusieurs fonctions ou propriétés (listes des chiffres).

#### Doc 7 Éléments anatomiques impliqués dans les mouvements moteurs



#### Structures

**a.** Coupe de moelle épinière. **b.** Fuseau neuromusculaire. **c.** Dans les cornes ventrales de la substance grise, on y trouve les corps cellulaires des motoneurones. **d.** Synapse neuronique. **e.** Couches de corps cellulaires. **f.** Cortex. **g.** Plaques motrices. **h.** Centre nerveux.

#### Fonctions et propriétés

1. Unité motrice (commande la contraction d'un groupe de fibres musculaires)
2. Se remodèle en fonction des stimuli reçus

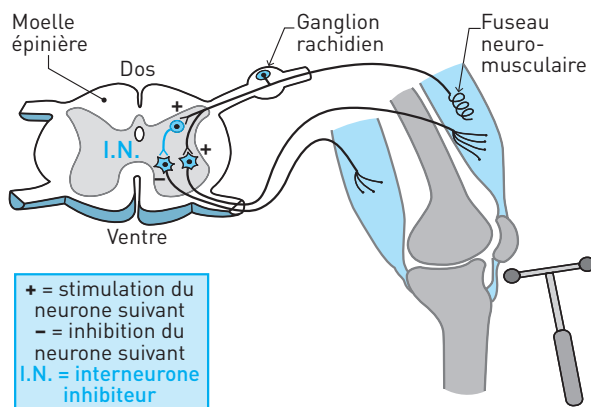
3. Lorsqu'elle est active, entre une terminaison axonique d'un neurone cortical et un motoneurone médullaire, elle déclenche l'activité d'une unité motrice
4. Elle(s) est/sont soit excitatrice(s) soit inhibitrice(s)
5. Elles sont excitatrices
6. Les connexions n'y sont pas fixées définitivement
7. Émet(tent) des PA d'autant plus fréquents que l'étirement du muscle innervé est important

## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

### 4 MOTONEURONES ET INTÉGRATION DES MESSAGES

★★ 20 min ▶ P. 299

#### Doc 8 Circuits neuronaux mis en jeu au cours d'un réflexe myotatique



À partir du schéma (**document 8**) et de vos connaissances, relevez les réponses exactes.

1. Vous avez déjà étudié ce réflexe [chapitre 10], vous devez être capable de vous représenter le mouvement résultant du choc du marteau.
2. Vous devez bien avoir à l'esprit que chaque neurone dessiné représente en réalité une population de neurones.

**1. Le réflexe myotatique schématisé :**

- a. commence par l'étirement du muscle extenseur de la jambe.
- b. commence par l'étirement du muscle fléchisseur de la jambe.
- c. commence par la contraction du muscle extenseur de la jambe.
- d. a pour effecteurs les muscles extenseur et fléchisseur de la jambe.
- e. a pour effecteur le muscle extenseur de la jambe.
- f. peut être empêché par la volonté.

**2. Les circuits neuronaux activés au cours de ce réflexe sont :**

- a. les neurones afférents, les motoneurons médullaires et les interneurons inhibiteurs.
- b. un circuit impliquant une excitation des motoneurons du muscle étiré par le marteau et un circuit impliquant leur inhibition.
- c. un circuit constitué par des neurones sensoriels qui détectent l'étirement au niveau de leurs fuseaux neuromusculaires et les motoneurons de ce même muscle.
- d. un circuit constitué par les neurones sensoriels du muscle extenseur de la jambe, des interneurons et des motoneurons du muscle antagoniste.
- e. deux circuits qui ont le même point de départ et divergent sur deux muscles antagonistes l'un de l'autre.
- f. un circuit qui permet la contraction du muscle fléchisseur de la jambe et un circuit qui permet le relâchement du muscle extenseur de la jambe.

**3. Les motoneurons du muscle extenseur de la jambe :**

- a. sont stimulés directement par les neurones en T au cours du réflexe.
- b. sont inhibés par les interneurons représentés.
- c. peuvent être inhibés par d'autres interneurons.
- d. peuvent intégrer des messages excitateurs et inhibiteurs au cours d'un réflexe myotatique et ne pas activer l'unité motrice qu'ils contrôlent.
- e. activeront obligatoirement leurs unités motrices quelles que soient les conditions de réalisation du réflexe.
- f. peuvent être stimulés directement par des neurones du cortex moteur de la jambe.

**4. Les interneurons représentés :**

- a. sont inhibés par les neurones en T issus du muscle extenseur.
- b. inhibent les motoneurons du muscle fléchisseur.

**5. Les motoneurons du muscle fléchisseur de la jambe :**

- a. sont inhibés au cours de ce réflexe.
- b. sont activés au cours de ce réflexe.
- c. peuvent être activés directement par des neurones en T.
- d. peuvent être activés directement par des neurones du cortex moteur de la jambe.

## 5 APPRENTISSAGE D'UN MOUVEMENT FIN

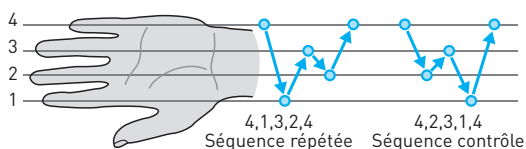
★★ 20 min ▶ p. 300

On cherche à connaître les mécanismes nerveux cérébraux à l'origine des apprentissages. Pour cela on étudie l'activation de zones corticales au cours d'un apprentissage manuel.

L'apprentissage consiste en des oppositions successives au pouce des extrémités des doigts 1 à 4 suivant une séquence précise « 4, 1, 3, 2, 4 », ceci en utilisant la main non dominante et sans la regarder. La séquence sera répétée pendant dix à vingt minutes tous les jours durant les trois semaines du test. La séquence contrôle est une séquence opérée dans les mêmes conditions (main non dominante sans regarder) mais qui ne sera pas répétée pendant les trois semaines.

Le document 9 montre l'activation du cortex moteur au cours d'un apprentissage manuel.

### Doc 9A Séquences de mouvements des doigts réalisées au cours de l'expérience



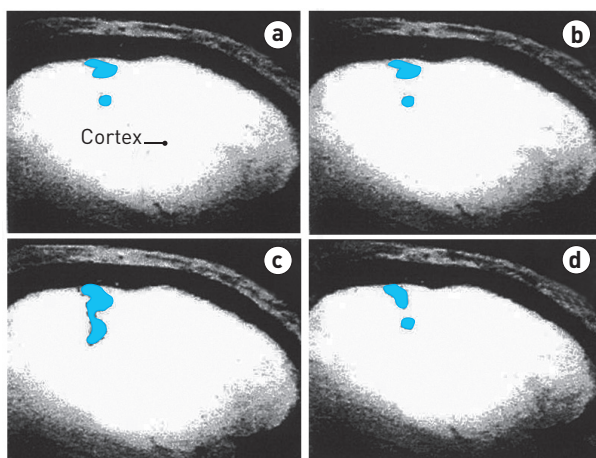
### Doc 9B Activation du cortex moteur

– Images réalisées le premier jour de l'entraînement :

**a** = « 4, 1, 3, 2, 4 » ; **b** = séquence contrôle.

– Images réalisées à la fin des trois semaines d'apprentissage :

**c** = « 4, 1, 3, 2, 4 » ; **d** = séquence contrôle.



Quelles informations et conclusions peut-on tirer de cette expérience ?

**1. Diviser :** dans un premier temps, étudier le protocole pour en déduire l'hypothèse que cette expérience vise à valider, puis étudier les résultats en **comparant les situations deux à deux** (a par rapport à b, c par rapport à a, d par rapport à b et enfin c et d).

**2. Lier :** faire une synthèse des observations de manière à répondre à la problématique de départ [mécanismes neuronaux de l'apprentissage].

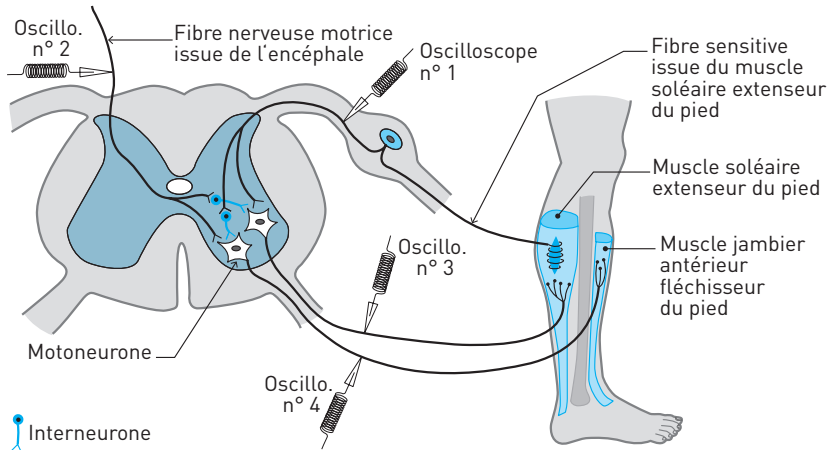
## 6 VOLONTÉ ET CONTRÔLE DES RÉFLEXES

★★★ 45 min ► P. 301

Un individu peut contrôler, voire inhiber un réflexe myotatique par une activité musculaire volontaire.

À l'aide des informations extraites de l'ensemble des documents, expliquez l'interaction entre les activités volontaire et réflexe au cours du réflexe achilléen.

### Doc 10 Structures mises en jeu lors de l'inhibition volontaire du réflexe



### Doc 11 Activité du réseau de neurones impliqués dans le réflexe achilléen

Activité des neurones / Conditions	Électrode 1 Neurone en T de l'extenseur	Électrode 2 Neurone cérébral	Électrode 3 Motoneurone de l'extenseur	Électrode 4 Motoneurone du fléchisseur
A	+++	0	+++	0
B	+	+++	+	+++
C	+++	+++	++	+

Cas A : réflexe achilléen avec muscle fléchisseur relâché

Cas B : contraction volontaire légère du muscle fléchisseur

Cas C : réflexe achilléen avec contraction légère du fléchisseur

0 = pas de message

+ = intensités relatives des messages qui parcourent les neurones

1. Voir la partie méthodologie pour ce type d'exercice.
2. Les deux documents portent sur les circuits neuronaux activés au cours des activités réflexe et volontaire. Il faut bien identifier ces circuits (**doc. 10**) afin d'expliquer comment ils peuvent interagir.
3. **Séparer** (diviser) l'étude des circuits réflexe et volontaire (cas A et B) de celle de leurs interactions (cas C).
4. **Lier** les conclusions réalisées à partir du **document 11** à la structure des circuits mise en évidence à partir du **document 10**.

## EXERCICES D'APPROFONDISSEMENT

7

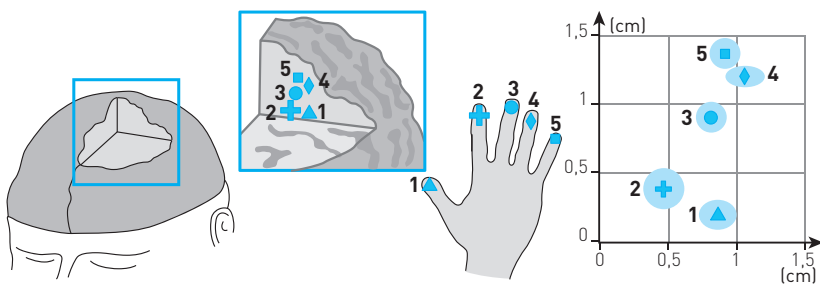
### REPRÉSENTATION CORPORELLE DES DOIGTS ET SYNDACTYLIE

★★ 30 min ▶ P. 302

À l'aide des informations extraites des documents suivants et de vos connaissances, montrez que ces expériences prouvent l'**existence d'une propriété fondamentale du cortex que vous nommerez**.

*Remarque* : La carte du **document 12** est obtenue par une technique d'imagerie cérébrale auprès de neuf hommes. Les cercles en bleu clair représentent les variations individuelles.

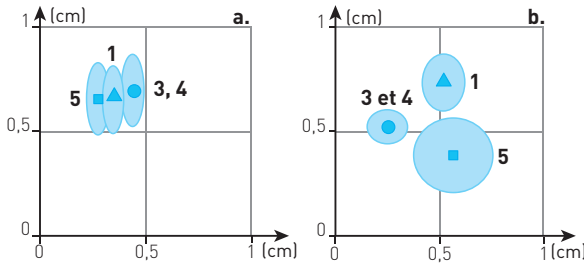
**Doc 12** Représentation spatiale des doigts au niveau du cortex sensoriel



### Doc 13 Représentation spatiale des doigts au niveau du cortex sensoriel chez un patient atteint de syndactylie et opéré

a. Avant l'opération. b. 6 jours après l'opération.

Les doigts 3, 4 et 5 étaient soudés (doigt 2 absent congénitalement). L'intervention a permis de séparer le doigt 5 (petit doigt) des doigts 3 et 4.



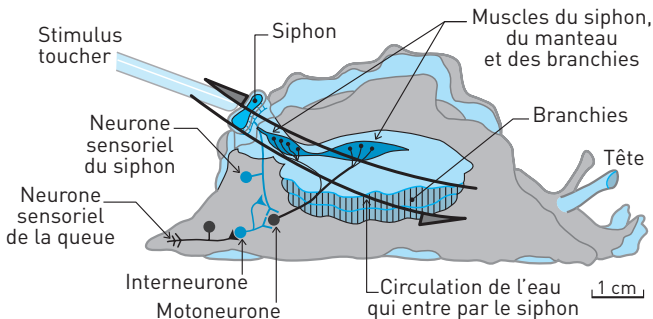
On étudie le cortex sensoriel de la main avant et après une opération. Cela doit vous mettre immédiatement sur la voie quant à la nature de la « propriété commune » [voir II-2 si vous rencontrez des difficultés].

## 8 APPRENTISSAGE CHEZ L'APLYSIE ET RÉSEAUX NEURONAUX

★★★ 30 min ▶ P. 303

L'aplysie, souvent appelée lièvre de mer ou limace de mer, possède un siphon qui fait circuler l'eau dans ses branchies. C'est sa manière de respirer (prélèvement du dioxygène dissous) et son point sensible. Lorsqu'on stimule une partie de son corps, elle rétracte ses branchies par voie réflexe, ce qui les protège. Lorsqu'on réalise différentes expériences de stimulation, on peut enregistrer les messages nerveux au niveau des circuits de neurones schématisés dans le **document 14**. (Un type de neurone dessiné représente une population de neurones, par exemple, la population des motoneurones.)

### Doc 14 Circuits neuronaux mis en jeu lors du retrait des branchies de l'aplysie





**Expérience.** On fait suivre par intervalle de 0,5 seconde une stimulation faible du siphon par une stimulation électrique appliquée sur la queue. On renouvelle cette manipulation une dizaine de fois, puis on stimule le siphon seul, sans choc électrique associé. On observe que les branchies se contractent aussi fortement que si la stimulation avait été suivie d'un choc électrique ; cet effet est conservé pendant plusieurs jours. Les chercheurs ont mis en évidence que le conditionnement est lié aux interneurons : le stimulus électrique excite ces interneurons qui libèrent leur neurotransmetteur (sérotonine) sur les terminaisons présynaptiques des neurones sensoriels innervant le siphon. Après conditionnement, ces neurones sensoriels libèrent davantage de neurotransmetteur à leur synapse avec les motoneurons des branchies.

**Proposez une interprétation en termes de plasticité neuronale au conditionnement de l'aplysie.**

## CONTRÔLE

9

THÉRAPIE PAR LE MIROIR

OU COMMENT TROMPER SON CERVEAU

★★

30 min

▶ P. 304

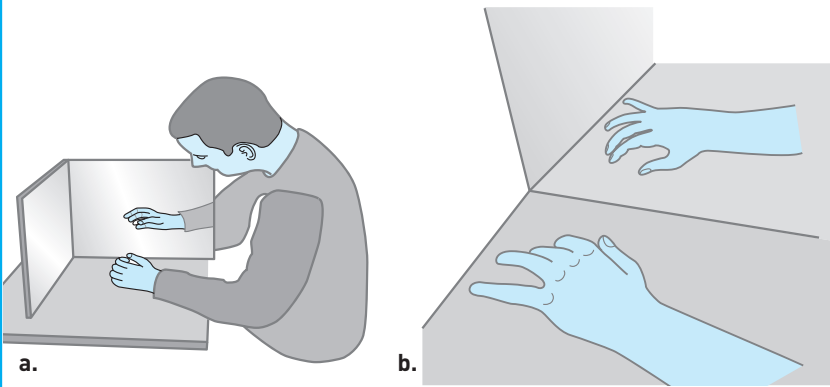
Chez un patient jeune, un accident de moto a occasionné une perte de la sensibilité et une paralysie complètes, localisées uniquement au niveau du membre supérieur droit. Il ressent des douleurs intenses permanentes et des douleurs paroxystiques (de type décharges électriques). Ces douleurs invalidantes résistent aux différents traitements (médicamenteux (morphine), hypnose...). Les chercheurs ont testé l'effet de la « thérapie par le miroir » sur ces douleurs. Un miroir est placé verticalement sur une table, en face du patient : son membre douloureux d'un côté, le membre sain de l'autre de façon à ce que le reflet de celui-ci se superpose à l'autre. Il commande des mouvements symétriques des deux mains (saine et paralysée) tout en regardant le miroir durant des séances de 15 minutes, 3 à 5 fois par jour. Il a ainsi la sensation que sa main paralysée bouge, bien qu'il soit conscient que ce n'est pas le cas (**doc. 15**).

Les séances ont permis une baisse de la douleur, avec une évaluation de la douleur passant de 7/10 avant la séance à 2/10 durant la séance, et avec un effet persistant pendant une heure. L'effet s'est maintenu durablement au bout de huit semaines d'entraînement.

On sait que le cortex moteur a une action inhibitrice sur les circuits centraux de la douleur. Cette étude a été étayée par une exploration en imagerie par résonance magnétique (IRM) du cortex moteur avant et après entraînement.

**Doc 15 La thérapie par le miroir**

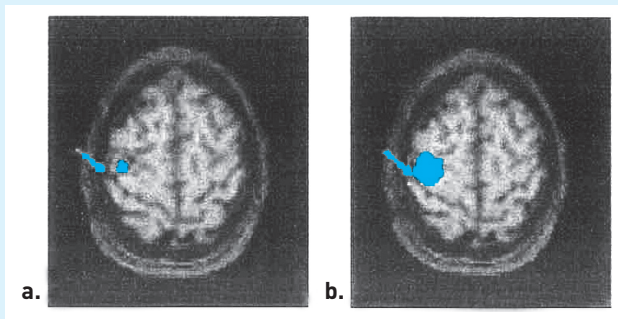
- a. Séance de miroir thérapie.
- b. L'illusion visuelle modifie l'activation du cortex moteur.



On effectue une IRM du cortex du patient (**document 16**) lorsque celui-ci imagine faire des mouvements volontaires de l'avant-bras et de la main paralysés.

**Doc 16 IRM du cortex du patient au cours de commandes motrices de la main**

- a. Au départ de la thérapie.
- b. après 8 semaines d'entraînement.



Relevez les propositions exactes et commentez.

**1. La paralysie du membre droit et la perte totale de sa sensibilité indiquent qu'à la suite de l'accident :**

- a. il y a eu section complète de la moelle épinière à hauteur du cou.
- b. Il y a une section de la partie gauche de la moelle épinière au niveau du cou.
- c. Il y a eu une section des nerfs qui innervent le membre supérieur droit dès la sortie de la moelle épinière.

**2. On peut penser que les douleurs ressenties au niveau du bras proviennent :**

- a. de messages douloureux en provenance du membre paralysé.
- b. d'une activation anormale du cortex sensoriel régissant la sensation de douleur.

**3. Au cours d'une phase d'entraînement par la technique de la thérapie par le miroir, le patient :**

- a. active son cortex moteur gauche uniquement.
- b. active ses cortex moteurs droit et gauche.
- c. bouge sa main droite.
- d. a l'impression que sa main droite bouge.
- e. récupère le fonctionnement de ses nerfs.

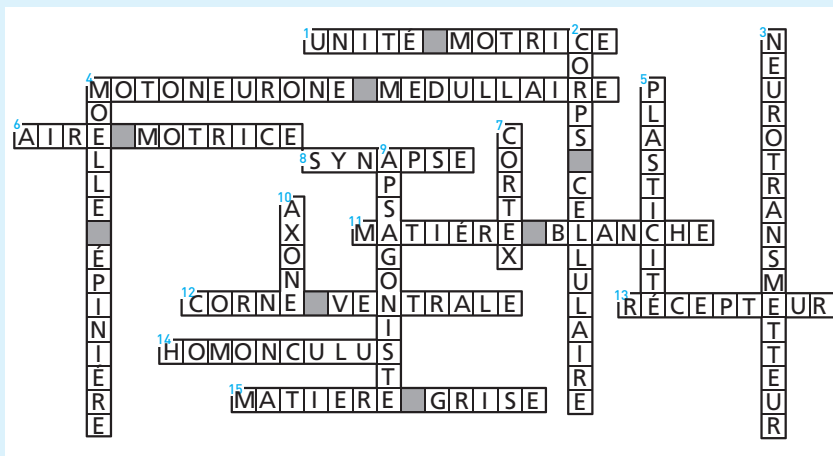
**4. L'imagerie cérébrale montre qu'à la suite de huit semaines d'entraînement :**

- a. il y a une plus forte activation du cortex moteur de la main gauche.
- b. la représentation corticale de la main au niveau du cortex moteur n'a pas changé.
- c. illustre la notion de plasticité cérébrale.

## CORRIGÉS

- 1** **1. a.** Faux. Les axones des neurones du cortex moteur droit peuvent faire plusieurs dizaines de cm s'ils descendent jusqu'en bas de la moelle épinière. **b.** Faux. Ils n'innervent pas directement les fibres musculaires puisqu'ils se connectent sur les motoneurones médullaires.
- c.** Vrai. **d.** Vrai. **e.** Vrai.
- 2. a.** Faux. Les motoneurones de la moelle épinière situés au niveau du bassin ne reçoivent que les messages issus du cortex moteur qui contrôle les membres inférieurs.
- b.** Vrai. **c.** Vrai. **d.** Faux. Ils répondent à la fois aux messages d'origine périphérique (par exemple lors du réflexe myotatique) et aux messages corticaux (par exemple les messages moteurs volontaires).
- e.** Vrai.
- 3. a.** Vrai. **b.** Faux. La section de la moitié droite de la moelle épinière juste au-dessus de la zone des nerfs rachidiens innervant les membres inférieurs ne détruit pas les motoneurones puisqu'elle est située entre deux vertèbres, elle sectionne uniquement de la matière blanche.
- c.** Faux. Elle provoque uniquement une paralysie du côté gauche qui était innervé par les axones lésés (hémiparésie gauche).
- d.** Faux. Elle a les mêmes conséquences que l'atteinte des zones du cortex moteur gauche correspondant aux membres inférieurs.
- e.** Vrai. **f.** Faux. Elle n'empêche pas les réflexes myotatiques du membre inférieur gauche puisque les motoneurones qui reçoivent les messages des fuseaux neuromusculaires sont encore intacts.
- 4. a.** Vrai. **b.** Faux. La zone corticale motrice de la main gauche présente une surface plus importante chez le pianiste qui l'utilise beaucoup plus fréquemment pour des mouvements fins que le non pianiste.
- c.** Faux. Les cortex moteurs des deux mains sont plus développés chez le pianiste qui entraîne plus ses deux mains.
- d.** Vrai. **e.** Faux. Le cortex moteur de la main droite est plus étendu que celui de la main gauche chez les deux car ils sont droitiers tous les deux (c'est une supposition car à force de l'entraîner, la main gauche du pianiste est peut-être aussi représentée que sa main droite au niveau de son cortex moteur).
- f.** Vrai.

## 2 Doc 17 Grille complétée



## 3 Élément 1 : b, 7

Élément 2 : g, elle font partie d'une unité motrice : 1-5

Élément 3 : d, 3, 4, 2

Élément 4 : a et c, h, 2, 6

Élément 5 : e, f, h, 2, 6

Les centres nerveux sont les zones de matière grise où sont localisés les circuits neuroniques, susceptibles de se remodeler grâce à la plasticité des neurones.

4 1. a. Vrai. b. Faux. c. Faux. d. Vrai. Le muscle extenseur se contracte, le muscle fléchisseur se relâche. e. Vrai. f. Vrai.

2. Un circuit de neurones implique la transmission d'un message entre au moins deux catégories différentes de neurones.

a. Faux. Une catégorie de neurones ne correspond pas à un circuit neuronal mais à une population de neurones ayant les mêmes caractéristiques et impliquée dans les mêmes circuits. b. Faux. L'inhibition de ces motoneurones n'est pas schématisée (c'est l'inhibition des muscles antagonistes qui l'est). c. vrai. d. Vrai. e. Vrai. f. Faux. C'est l'inverse.

3. a. Vrai. b. Faux. c. Vrai. Ils peuvent être inhibés par d'autres interneurones non représentés. d. Faux. Mais vrai si la volonté intervient (mise en jeu d'interneurones inhibiteurs activés par des neurones corticaux). e. Faux. Si les motoneurones sont inhibés par les interneurones, ils n'activeront pas leurs fibres musculaires. f. Vrai.

4. a. Faux. Ils sont stimulés par les neurones en T du muscle extenseur. b. Vrai.

5. a. Vrai. b. Faux. c. Vrai. Ils peuvent être activés directement par des neurones en T issus du muscle fléchisseur, non représentés. d. Vrai également (neurones non représentés).

5

Identifier une problématique. Poser une hypothèse.

On cherche à connaître les mécanismes neuronaux à l'origine d'un apprentissage. Si le cerveau se modifie pour « enregistrer » une séquence motrice manuelle alors, on doit observer des différences cérébrales entre le début de l'apprentissage et la fin.

Diviser l'étude du document.

### *Analyse du protocole*

Le mouvement consiste en des oppositions successives chaque jour pendant 10 à 20 minutes au pouce des extrémités des doigts 1 à 4 suivant une séquence précise « 4, 1, 3, 2, 4 », ceci en utilisant la main non dominante et sans la regarder.

La situation témoin correspond à la réalisation d'une autre séquence, non répétée : « 4, 2, 3, 1, 4 ».

### *Analyse des résultats*

- Situations initiales : a et b

On observe que les surfaces corticales activées pour chacune des séquences (la séquence d'apprentissage et la séquence contrôle) sont identiques : les réseaux neuronaux activés lors de la mise en œuvre de ces mouvements impliquent le même nombre de neurones.

- Situations en fin d'apprentissages : c et d

Si on compare la surface corticale activée lors de la réalisation de la séquence répétée après apprentissage c par rapport à la situation initiale a, on observe qu'elle a augmenté. En revanche, la surface corticale activée lors de la réalisation de la séquence témoin en fin d'apprentissage d a la même superficie corticale qu'au début de l'apprentissage b.

**Interprétation :** Cela signifie que des connexions neuronales ont été établies au fur et à mesure de l'apprentissage. Le réseau neuronal à l'origine du mouvement s'est agrandi : de nouveaux neurones y ont été intégrés, ce qui permet un meilleur traitement de la tâche à effectuer, donc l'apprentissage de la séquence manuelle.

Lier les observations entre elles.

Rien de tel ne s'est produit pour la séquence contrôle, c'est donc la répétition du mouvement de la séquence au cours de l'apprentissage, c'est-à-dire l'activation des neurones moteurs, qui a entraîné le recrutement de nouveaux neurones et donc permis l'agrandissement de la surface corticale à l'origine de ce mouvement.

Réponse à la problématique.

### **Conclusion**

L'apprentissage du mouvement a été permis par une réorganisation du réseau cortical moteur à l'origine de ce mouvement : plus il a été activé, plus il s'est agrandi en recrutant de nouveaux neurones (établissement de nouvelles synapses). C'est un bel exemple de la plasticité cérébrale.

**6** La réalisation du mouvement antagoniste au réflexe achilléen (flexion du pied) diminue ou empêche celui-ci de se réaliser. Comment les réseaux neuronaux à l'origine du réflexe achilléen et de la flexion volontaire interagissent-ils ?

### I. Analyse du document 10

#### Observations

1. Le circuit réflexe part des fuseaux neuromusculaires du muscle soléaire, étiré au départ du réflexe, puis se connectent d'une part aux motoneurones de ce muscle et d'autre part à des interneurones eux-mêmes connectés aux motoneurones du muscle antagoniste, fléchisseur du pied.

2. Le circuit volontaire permettant la contraction du muscle fléchisseur antagoniste du réflexe achilléen débute par des neurones corticaux qui se connectent directement aux motoneurones du muscle fléchisseur et indirectement aux motoneurones du muscle soléaire (extenseur) via des interneurones.

#### Conclusion

Les voies finales communes aux deux circuits sont les motoneurones de chacun des muscles mis en jeu, qui sont des muscles antagonistes.

#### Interprétation

L'action volontaire s'opposant au réflexe achilléen, on peut supposer que les interneurones mis en jeu dans chaque circuit exercent une inhibition sur les unités motrices auxquelles ils sont connectés.

On peut donc supposer que l'activité volontaire conduit à une inhibition des unités motrices normalement activées par la voie réflexe (unités motrices du muscle soléaire) et à une activation des unités motrices normalement inhibées par la voie réflexe (unités motrices du muscle extenseur).

### II. Analyse du document 11

#### • Lorsque le réflexe achilléen est réalisé seul (conditions A)

##### Observation 1

Le neurone sensoriel issu du muscle extenseur étiré et le motoneurone correspondant étudiés sont très actifs.

##### Interprétation

Ces neurones sont directement connectés entre eux au niveau de la moelle épinière (**doc. 10**). On en déduit qu'au cours du réflexe, les neurones sensoriels issus du muscle extenseur ont stimulé les motoneurones du muscle extenseur.

##### Observation 2

En revanche, le motoneurone antagoniste étudié est totalement inactif. Cela correspond à un relâchement du muscle fléchisseur.

##### Interprétation

On peut supposer que le motoneurone antagoniste a été inhibé par l'interneurone auquel est connecté le neurone sensoriel en T, activé lui aussi au cours du réflexe achilléen.

- **Lors de la contraction volontaire légère du muscle fléchisseur (conditions B)**

*Observation 1*

Activité importante du neurone cérébral et du motoneurone du muscle fléchisseur.

*Interprétation*

Ces deux types de neurones sont directement connectés au niveau de la moelle épinière (**doc. 10**) : les neurones cérébraux ont stimulé les motoneurones du fléchisseur.

*Observation 2*

Le circuit correspondant au neurone sensoriel issu du fuseau neuromusculaire de l'extenseur et au motoneurone de l'extenseur présente une activité faible au cours de l'activité volontaire de flexion du pied.

*Interprétation*

Cette observation n'est pas importante par rapport au problème posé. On peut en déduire que l'activité observée correspond à l'activité de base du circuit.

- **Lorsque le réflexe achilléen est réalisé en même temps que la contraction légère du muscle fléchisseur du pied (conditions C)**

1. On observe à la fois une forte activité du neurone sensoriel en T et du neurone cérébral moteur du fléchisseur. Par ailleurs, la réponse du motoneurone de l'extenseur est plus faible qu'en absence de contraction volontaire (cas A). Cela produit une réponse atténuée du muscle extenseur.

*Interprétation*

L'activité du motoneurone extenseur a été inhibée par la contraction volontaire faible du muscle fléchisseur. Seuls **les interneurons activés par les neurones cérébraux ont pu inhiber les motoneurons de l'extenseur.**

2. On observe que le motoneurone du fléchisseur est moins actif que dans le cas B.

*Interprétation*

Au cours du réflexe, les neurones sensoriels en T stimulent les interneurons qui se connectent au muscle fléchisseur antagoniste. Cela explique que la réponse du motoneurone du fléchisseur soit moins importante qu'en absence de réflexe.

**Bilan**

Un même motoneurone reçoit des messages excitateurs (en provenance des neurones afférents ou des neurones cérébraux) et inhibiteurs (en provenance des interneurons). Dans le cas de la réalisation synchrone d'un réflexe et du mouvement volontaire antagoniste, les motoneurons du muscle étiré par voie réflexe (ici le soléaire, extenseur du pied) reçoivent à la fois des **messages excitateurs provenant des fuseaux neuromusculaires** et des **messages inhibiteurs provenant des interneurons stimulés par les neurones corticaux** de l'activité antagoniste. La synthèse entre les deux produit **une réponse plus ou moins atténuée des unités motrices.**

**7** **Analyse des informations chez les individus qui ne sont pas syndactyles (doc. 12)**

Les doigts ne sont pas soudés, chaque doigt a une représentation individuelle sur le cortex sensoriel.



**Analyse des informations chez un individu syndactyle (document 13)**

Avant l'opération, les informations sensorielles issues des doigts soudés 3, 4 et 5, et du doigt 1 aboutissent sur des zones du cortex sensoriel très proches les unes des autres. Les doigts sont mal discriminés au niveau du cortex sensoriel.

Lors de l'opération, le doigt 5 a été séparé des doigts 3 et 4. Ceux-ci correspondent toujours à une seule et même zone corticale, en revanche leur zone est devenue bien distincte des zones du doigt 5 et du doigt 1.

**Interprétation**

La perception de stimuli de façon séparée par les trois doigts ou association de doigts après opération a engendré une réorganisation de la carte corticale de la main. Les synapses au niveau du cortex sensoriel de la main se sont donc remodelées en l'espace de six jours, ce qui témoigne dans cette aire d'une grande plasticité cérébrale chez l'adulte.

**Bilan**

Les neurones du cortex sensoriel réorganisent en permanence leurs connexions en fonction de leur activation. Ils sont donc capables d'une grande plasticité, même à l'âge adulte.

8

Il ne s'agit pas de répéter le texte, votre réponse doit expliquer comment les **stimulations répétées du siphon immédiatement suivies par celles de la queue ont provoqué un apprentissage (non conscient) chez l'aplysie.**

Dans un premier temps il faut donc expliquer ce qu'a appris l'aplysie.

Puis proposer une interprétation au niveau neuronal (circuit mis en jeu lorsque le siphon est faiblement stimulé avant et après conditionnement).

**Analyse du conditionnement**

L'aplysie a appris à associer une stimulation faible du siphon à la survenue d'un choc électrique : ses muscles ont appris – processus inconscient – à se rétracter fortement, ce qui assure une meilleure protection des branchies.

**Mise en relation avec le document 14**

Lorsque le siphon est stimulé faiblement, les neurones sensoriels du siphon émettent un message transmis aux motoneurones qui commandent la contraction des muscles du siphon. Ce message est plus intense après conditionnement : les chercheurs ont montré que les synapses entre les neurones sensoriels du siphon et les motoneurones ont été renforcées : elles produisent plus de neurotransmetteur (sérotonine) qu'avant le conditionnement.

Ici on répond à la question « Pourquoi le muscle du siphon se rétracte-t-il plus fortement lorsqu'on stimule le siphon après conditionnement ? » mais pas à la question « Comment les synapses entre les neurones sensoriels du siphon et les motoneurones sont-elles devenues plus sensibles au cours du conditionnement ? ». Il reste à répondre à cette question, votre réponse n'est donc pas complète si vous vous êtes arrêté ici.

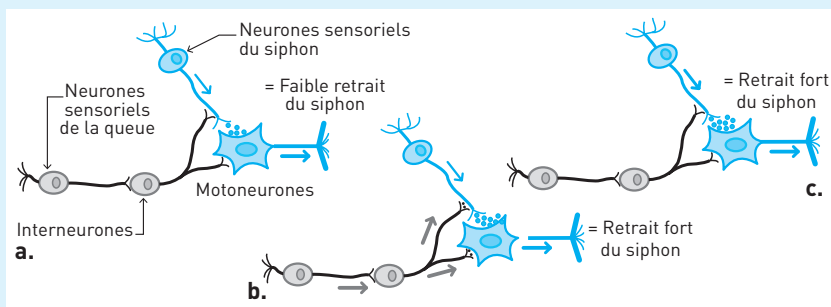
## Mécanisme

Le fonctionnement quasi simultané des deux circuits neuronaux (stimulation faible du siphon + stimulation électrique forte de la queue) a modifié le fonctionnement des neurones sensoriels du siphon qui sont devenus plus sensibles : ils ont été **sensibilisés par les interneurons du circuit de la queue** qui établissent des synapses avec leurs terminaisons (**document 18 b**).

Lorsque les deux types de neurones sont stimulés simultanément au cours du conditionnement, les interneurons stimulent les neurones sensoriels du siphon qui produisent davantage de neurotransmetteur. Cette expérience répétée une dizaine de fois dans un laps de temps court, suffit pour modifier les synapses des neurones sensoriels du siphon avec les motoneurons : elles sont devenues plus efficaces, même sans l'intervention des interneurons (**document 18 c**).

### Doc 18 Remodelage synaptique au cours du conditionnement

- Situation avant le conditionnement.
- Situation pendant le conditionnement.
- Situation après le conditionnement.



**9 1. c.** S'il y avait eu section totale (proposition **a**) ou partielle (proposition **b**) de la moelle épinière, les membres inférieurs seraient aussi atteints.

**2. b.** Les douleurs ne peuvent pas parvenir du membre paralysé (proposition **a**) puisque celui-ci ne ressent plus rien : ses connexions avec la moelle épinière sont rompues.

**3. b et d.** Dans sa tête, le patient fait bouger ses deux mains, donc les deux cortex moteurs doivent être activés. Cela agit seulement au niveau du cerveau qui est trompé puisqu'il croit que la main droite bouge, il a un retour sensitif et moteur virtuel.

Les nerfs ne peuvent être réparés que par une intervention directe, par exemple chirurgicale (proposition **e**).

**4. c.** Ces images sont obtenues avant et après entraînement lorsque le patient ordonne à sa main paralysée de bouger. La représentation de la main sur le cortex moteur gauche s'est étendue après entraînement (on peut supposer qu'elle avait régressé suite à la paralysie), ce qui traduit la plasticité du cortex.

## 12

# Énergie et cellule vivante

C'est une connaissance établie depuis longtemps : la respiration et la photosynthèse sont assurées par des organites cellulaires, respectivement mitochondries et chloroplastes. Dans un article publiée en 1966, Lynn Margilus explique l'origine de ces organites dans les cellules eucaryotes actuelles par une endosymbiose, il y a 2 à 3 milliards d'années, de bactéries photosynthétiques et de bactéries au métabolisme respiratoire par une cellule eucaryote dépourvue de ces fonctions. Rejetée lors de sa publication, cette théorie s'impose aujourd'hui à la communauté scientifique...

« Rien n'a de sens en biologie, si ce n'est à la lumière de l'évolution. »  
Theodosius Dobzhansky (1973)

## I ÉCHANGES D'ÉNERGIE ET DE MATIÈRE

Le fonctionnement des êtres vivants obéit aux lois de la physique et de la chimie : tout travail de synthèse nécessite un apport d'énergie.

- Le végétal **chlorophyllien** utilise les matières minérales présentes dans le sol et dans l'air pour produire de la matière organique. Il utilise pour cette synthèse l'énergie lumineuse : c'est la **photosynthèse**. Lors de cette réaction, l'énergie lumineuse est convertie en énergie chimique.
- Un **animal** utilise les matières minérales et organiques pour produire sa matière organique. Pour ce travail de synthèse, il utilise l'énergie chimique potentielle contenue dans les molécules organiques, et en particulier celle du glucose.
- Il existe au sein du vivant un flux d'énergie, qui trouve toujours son origine dans l'énergie solaire captée par un végétal chlorophyllien. Par décomposition lente dans des conditions géologiques particulières, c'est l'énergie chimique potentielle de la matière organique d'êtres ayant vécu il y a plusieurs millions d'années qui est utilisée aujourd'hui lors de la combustion du charbon, du gaz et du pétrole. Ces combustibles fossiles représentent une forme d'énergie solaire fossilisée...

### L'essentiel

En physique, l'énergie est définie comme le « caractère d'un système capable de produire un travail ».

Une cellule réalise un travail lors d'une synthèse, d'un déplacement (d'organites, de molécules), ou pour produire de l'énergie thermique... Tous ces mécanismes demandent de l'énergie pour leur réalisation.

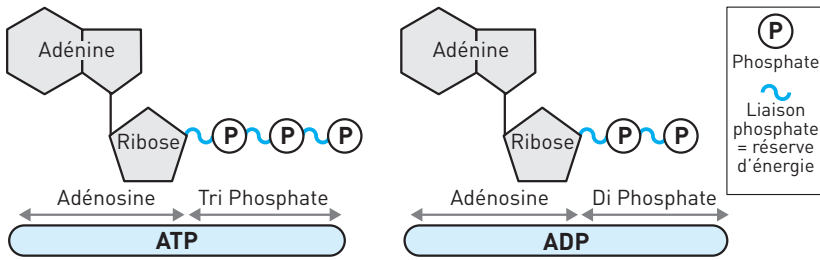
## II L'ATP, MONNAIE ÉNERGÉTIQUE DE LA CELLULE

### 1. L'ATP est un nucléotide phosphorylé

■ De la bactérie aux cellules eucaryotes, une étude des réactions du métabolisme à l'échelle moléculaire montre qu'une seule et même molécule est impliquée dans les échanges d'énergie : l'ATP...

■ L'ATP ou **adénosine triphosphate** est un ribonucléotide à trois phosphates, l'un des quatre nucléotides qui constituent l'ARN. Son hydrolyse libère un groupe phosphate et forme de l'ADP, une adénosine à deux phosphates. C'est la rupture de la liaison phosphate qui libère de l'énergie (**document 1**).

#### Doc 1 ATP et ADP



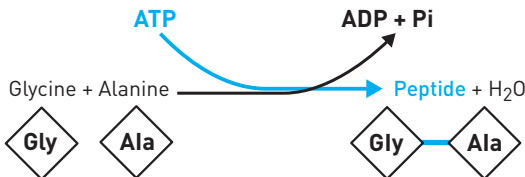
### 2. L'ATP et les échanges d'énergie

■ Dans une cellule, les échanges d'énergie se produisent au niveau entre deux réactions couplées :

- celle qui libère de l'énergie, l'hydrolyse de l'ATP ;
- celle qui demande de l'énergie, une réaction de synthèse, par exemple.

**EXEMPLE 1 :** Lors de la synthèse d'un peptide (**document 2**), une liaison est établie entre deux acides aminés. L'énergie nécessaire pour réaliser cette liaison covalente est assurée par la réaction couplée d'hydrolyse de l'ATP.

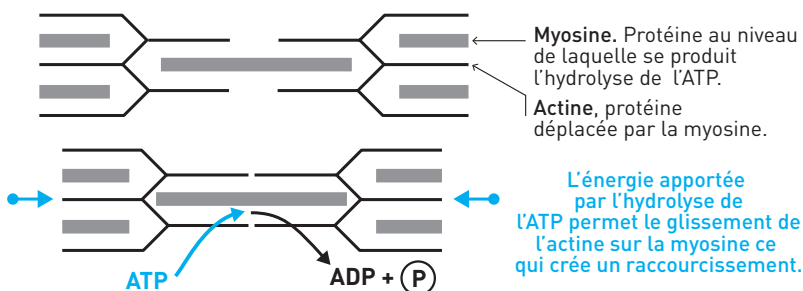
#### Doc 2 Réactions couplées lors d'une synthèse



Pi : groupe phosphate libre.

**EXEMPLE 2 :** La contraction d'une fibre musculaire (**document 3**) provient du glissement de protéines les unes sur les autres. L'énergie nécessaire à ce glissement est apportée par l'hydrolyse de l'ATP. Les muscles sont de gros « consommateurs » d'ATP.

## Doc 3 ATP et contraction musculaire



■ Dans une cellule, les quantités d'ATP sont très faibles, elles ne peuvent assurer que quelques secondes de fonctionnement. **L'ATP doit être en permanence régénéré** par fixation d'un phosphate sur l'ADP, réaction qui demande de l'énergie... Deux modes de régénération sont présentés dans le paragraphe III : la fermentation et la respiration.

## L'essentiel

Dans une cellule, les échanges d'énergie font intervenir des liaisons phosphate. La rupture d'une liaison libère de l'énergie, la réalisation d'une liaison phosphate « stocke » de l'énergie.

Les très faibles quantités d'ATP nécessitent sa régénération permanente.

## III RÉGÉNÉRATION D'ATP PAR DÉGRADATION DU GLUCOSE

Les molécules organiques possèdent de l'énergie chimique potentielle. Dans une cellule animale ou végétale, c'est principalement la dégradation du glucose qui libère l'énergie nécessaire à la régénération de l'ATP.

## 1. La régénération de l'ATP par fermentation

La **fermentation** est une **dégradation incomplète du glucose** car elle forme une molécule organique qui possède encore de l'énergie chimique : l'acide lactique chez l'Homme et les bactéries du yaourt, l'éthanol chez les levures.

Les équations globales, sans la réaction couplée avec l'ATP, sont :

**fermentation alcoolique**



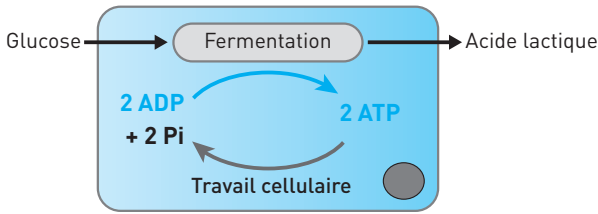
**fermentation lactique**



■ **À l'échelle cellulaire**, la cellule régénère son ATP par fermentation dans un milieu dépourvu ou pauvre en dioxygène (**doc. 4**).

**EXEMPLE :** Lors d'un effort physique, les cellules musculaires peuvent régénérer de l'ATP et se contracter quand l'apport en  $\text{O}_2$  est insuffisant. Mais l'acide lactique qui s'accumule dans le muscle entraîne fatigue musculaire et courbatures...

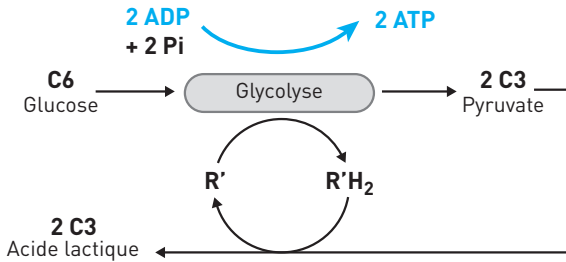
#### Doc 4 La fermentation lactique à l'échelle cellulaire



#### ■ À l'échelle moléculaire

**La glycolyse.** Les réactions chimiques de la glycolyse qui dégradent le glucose dans le hyaloplasme de la cellule régénèrent 2 ATP par glucose dégradé (**doc. 5**). Lors de la glycolyse, le glucose est déshydrogéné, l'hydrogène est fixé sur un transporteur ( $R'$ ), ce qui produit des composés réduits  $R'H_2$ . Le glucose qui possède 6 carbones ( $C_6$ ) est coupé, ce qui forme deux pyruvates, molécules à 3 carbones ( $C_3$ ).

#### Doc 5 La fermentation lactique à l'échelle moléculaire



**Le mode fermentation.** Chez l'Homme, l'absence de dioxygène active les enzymes qui régénèrent les transporteurs d'hydrogène  $R'$ , l'hydrogène est alors transféré au pyruvate qui est réduit en acide lactique (lactate) : c'est une **fermentation lactique**.

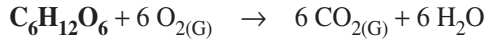
Chez la levure, en l'absence d' $O_2$ , la régénération des composés  $R'$  forme du  $CO_2$  et de l'éthanol : c'est une **fermentation alcoolique**.

#### L'essentiel

De l'ATP est régénéré lors de la dégradation du glucose par les réactions de la glycolyse. En conditions anaérobies, le pyruvate produit par la glycolyse est transformé en une autre molécule organique (lactate, éthanol).

## 2. La régénération de l'ATP par respiration

La **respiration** est une **dégradation complète du glucose** car elle forme des molécules minérales. À l'échelle du cycle de la matière, la respiration est une minéralisation. L'équation globale, sans la réaction couplée avec l'ATP, est :

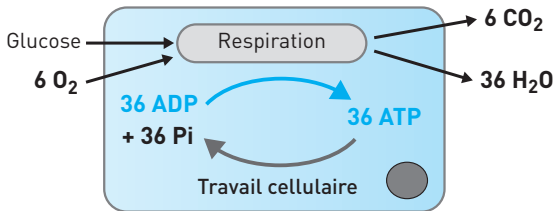


### ■ À l'échelle cellulaire

La cellule régénère son ATP par respiration dans un milieu **en présence de dioxygène (doc. 6)**.

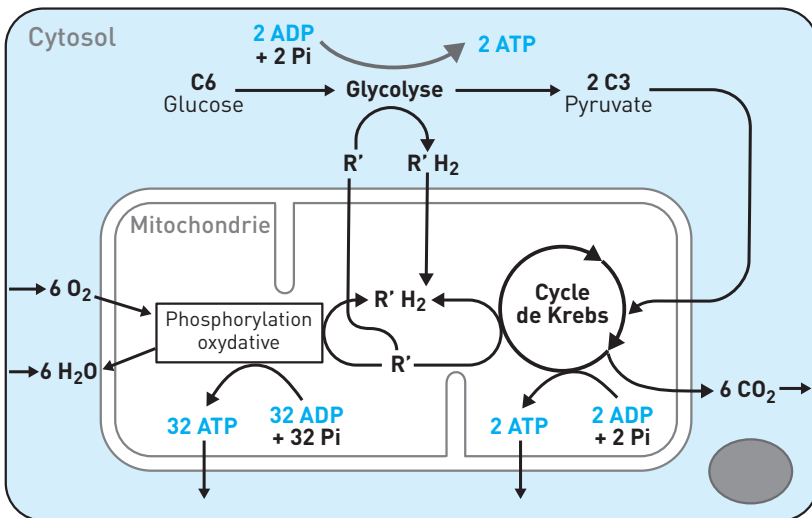
**EXEMPLE :** Lors d'un effort physique, les cellules musculaires utilisent l'ATP produit par la respiration quand l'apport en  $\text{O}_2$  est suffisant.

### Doc 6 La respiration à l'échelle cellulaire



### ■ À l'échelle moléculaire

### Doc 7 La respiration à l'échelle moléculaire



**La glycolyse.** Comme pour la fermentation, les réactions de la glycolyse dégradent le glucose en pyruvate ce qui régénère 2 ATP (document 7).

Le **mode respiration** fait ensuite intervenir la **mitochondrie** (voir plus loin le **doc. 10**), organe cellulaire qui importe le pyruvate. L'utilisation de l'énergie chimique potentielle de cette molécule se fait en deux temps :

– le **cycle de Krebs** « démonte » le pyruvate. Le carbone et l'oxygène forment du  $\text{CO}_2$ , l'hydrogène est fixé sur un transporteur  $\text{R}'$ , ce qui forme des composés réduits  $\text{R}'\text{H}_2$ . Deux ATP sont régénérés au cours de ce cycle ;

– la **phosphorylation oxydative** permet, au niveau des crêtes des mitochondries, l'oxydation des composés  $\text{R}'\text{H}_2$  :  $\text{R}'\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{R}' + \text{H}_2\text{O}$ . L'énergie chimique potentielle des composés  $\text{R}'\text{H}_2$  (issus du cycle de Krebs et de la glycolyse) permet la régénération de 32 ATP ! Des transporteurs  $\text{R}'$  retournent dans le hyaloplasme.

### 3. Approfondissement : comprendre avec l'évolution (1)

Il y a 1,7 milliard d'années apparaissent les premières cellules eucaryotes. Leur métabolisme énergétique est alors assuré par la glycolyse... Il y a 2 milliards d'années, avec l'apparition de l' $\text{O}_2$  dans l'atmosphère, apparaissent des bactéries avec cycle de Krebs et phosphorylation oxydative. L'endocytose de l'une de ces bactéries par une cellule eucaryote s'est traduite par une symbiose, l'ex-bactérie bénéficie de l'apport en molécules organiques par la glycolyse, la cellule eucaryote multiplie par 18 son apport en ATP, et aussi trouve un moyen d'éliminer le dioxygène...

#### L'essentiel

Deux ATP sont régénérés lors de la dégradation du glucose en pyruvate par la glycolyse. En conditions aérobies, le pyruvate est dégradé dans la mitochondrie en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ , ce qui permet la régénération de 34 ATP. Au total, 36 ATP sont régénérés par glucose, soit 18 fois plus que lors de la fermentation...

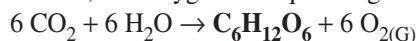
## IV LA PHOTOSYNTÈSE PRODUIT DU GLUCOSE

### 1. Une cellule chlorophyllienne respire

Une cellule chlorophyllienne (**doc. 11**) réalise aussi son travail cellulaire grâce à l'ATP régénéré par la respiration. Mais dans cette cellule, le glucose est synthétisé par le chloroplaste (**doc. 13**). La cellule chlorophyllienne est autotrophe.

### 2. La photosynthèse assure la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique

La photosynthèse assure la synthèse du glucose à partir de matières minérales, elle produit un déchet, le dioxygène. L'équation globale est :

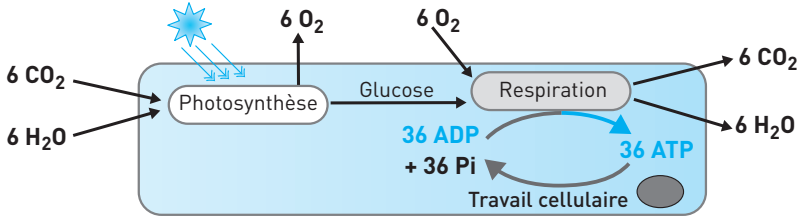




### ■ À l'échelle cellulaire (doc. 8)

Pour produire du glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ), il faut une source de matières et une source d'énergie. Pour les matières, le  $CO_2$  apporte carbone et oxygène, l'eau apporte l'hydrogène. L'énergie nécessaire à cette synthèse est apportée par l'ATP régénéré grâce à l'énergie solaire captée par la chlorophylle.

#### Doc 8 La photosynthèse à l'échelle cellulaire



### ■ À l'échelle moléculaire (doc. 9)

Deux phases peuvent être distinguées dans la photosynthèse : une phase photochimique et une phase chimique.

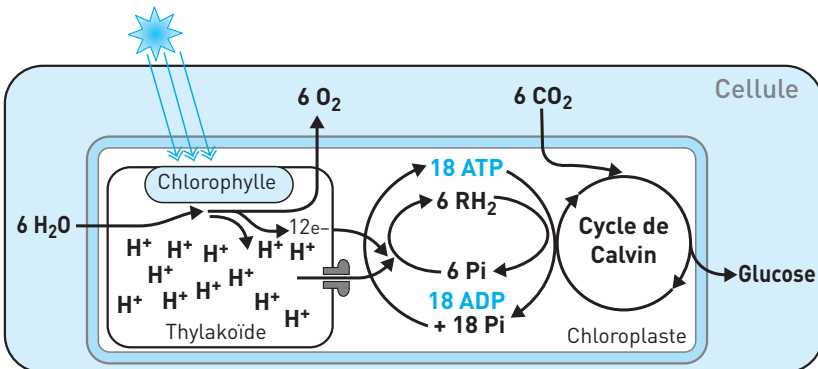
- Lors de la **phase photochimique**, l'énergie lumineuse captée par la chlorophylle permet la photolyse de l'eau, hydrogène et oxygène sont dissociés :



L'oxygène de l'eau forme de l' $O_2$ , l'hydrogène et les électrons quittent le thylakoïde pour aller dans le stroma. L'hydrogène traverse l'ATP synthétase qui assure la synthèse de l'ATP. Dans le stroma, l'hydrogène et les électrons sont fixés par un transporteur R, ce qui forme un composé réduit  $RH_2$ .

- Lors de la **phase chimique**, la **synthèse du glucose** est assurée par le cycle de Calvin à partir du carbone et de l'oxygène apportés par le  $CO_2$  et de l'hydrogène apporté par  $RH_2$ . L'énergie nécessaire à cette synthèse est apportée par l'ATP régénéré lors de la phase photochimique.

#### Doc 9 La photosynthèse à l'échelle moléculaire (très simplifié)



### 3. Approfondissement : comprendre avec l'évolution (2)

Il y a 3,5 milliards d'années apparaissent des bactéries photosynthétiques. L'endocytose d'une bactérie photosynthétique par une cellule eucaryote ayant des mitochondries s'est traduite par une nouvelle symbiose : la cellule ne dépend plus des ressources en glucose du milieu extracellulaire, c'est l'ex-bactérie, devenue chloroplaste, qui alimente le mécanisme respiratoire...

#### L'essentiel

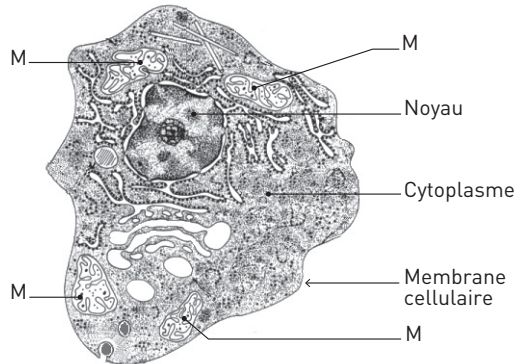
La production de glucose par photosynthèse dans le chloroplaste se fait à partir de matières minérales,  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ . L'énergie nécessaire à cette synthèse est apportée par l'ATP régénéré grâce à l'énergie lumineuse captée par la chlorophylle.

## VI ORGANISATION CELLULAIRE ET ULTRASTRUCTURE

### 1. Cellules observées au microscope électronique

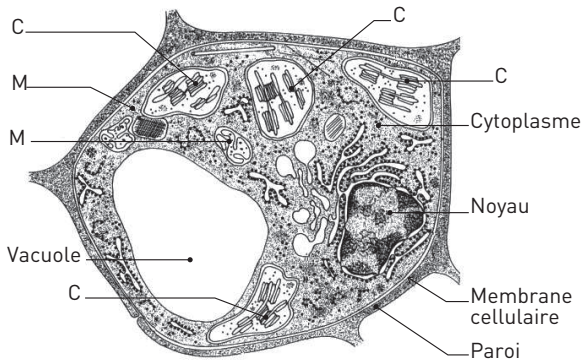
#### Doc 10 Cellule animale avec mitochondries (MEB $\times 1000$ )

Les cellules qui possèdent des mitochondries (**M**) peuvent régénérer leur ATP par respiration.



#### Doc 11 Cellule végétale chlorophyllienne (MEB $\times 1000$ )

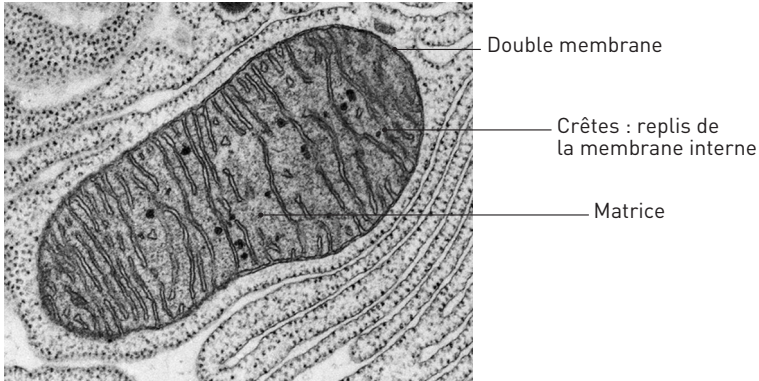
Les cellules végétales chlorophylliennes possèdent des chloroplastes (**C**) et des mitochondries (**M**).



## 2. Ultrastructure des organites

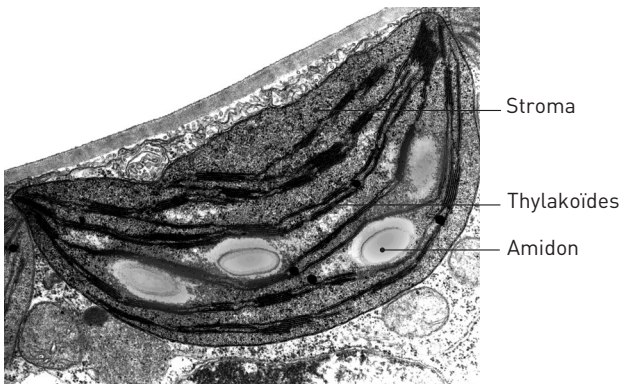
La **mitochondrie** est un organite cellulaire qui régénère l'ATP en utilisant le dioxygène pour dégrader le pyruvate produit par la glycolyse.

### Doc 12 Mitochondrie (MEB $\times 20\ 000$ )



Le **chloroplaste** est un organite cellulaire qui assure la production de glucose à partir de matières minérales ( $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ ) grâce à l'énergie solaire captée par la chlorophylle.

### Doc 13 Chloroplaste (MEB $\times 20\ 000$ )



## SAVOIR-FAIRE

### Vocabulaire

- **ATP/ADP** : Molécules impliquées dans les échanges d'énergie chimique par rupture ou réalisation d'une liaison phosphate.
- **Aérobic/anaérobic** : Qualifie la présence ou l'absence de dioxygène.

- **Autotrophe /hétérotrophe** : Une cellule autotrophe peut produire le glucose par photosynthèse, une cellule hétérotrophe doit le puiser dans le milieu extracellulaire.
- **Hydrolyse** : Décomposition d'une molécule par fixation d'eau (hydro = eau + lyse = détruire).
- **Glycolyse** : Métabolisme qui régénère de l'ATP par dégradation du glucose en pyruvate dans le cytosol.
- **Fermentation** : Métabolisme qui n'utilise que la glycolyse pour la régénération d'ATP. Le pyruvate est transformé en une autre molécule organique (acide lactique ou éthanol).
- **Respiration** : En présence de dioxygène et dans les mitochondries, ce métabolisme régénère de l'ATP par une dégradation complète du pyruvate produit par la glycolyse.
- **Photosynthèse** : Métabolisme qui utilise la lumière pour produire du glucose dans un chloroplaste.

## Compétences

1. **Comprendre** que toute cellule régénère son ATP par respiration ou par fermentation.
2. **Repérer** les étapes communes à la respiration et à la fermentation.

Les mécanismes de la fermentation et de la respiration, à l'échelle moléculaire, sont identiques au niveau de la glycolyse, mais ils divergent sur le devenir du pyruvate. Comparer les documents 6 et 8.

3. **Comprendre** les relations entre photosynthèse et respiration chez une cellule chlorophyllienne.

Dualité respiration-photosynthèse. Bien comprendre qu'une cellule chlorophyllienne assure la photosynthèse pour produire le glucose qu'elle utilise pour la respiration. Le dioxygène n'est qu'un déchet.

## Repères

1. **Connaître les bilans matières des différents métabolismes** (ces bilans n'intègrent pas la réaction couplée avec l'ATP).

Fermentation alcoolique :  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow \text{éthanol} + CO_{2(G)}$

Fermentation lactique :  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow \text{acide lactique}$

Respiration :  $C_6H_{12}O_6 + 6 O_{2(G)} \rightarrow 6 CO_{2(G)} + 6 H_2O$

Photosynthèse :  $6 CO_2 + 6 H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6 O_{2(G)}$

2. **Connaître l'essentiel.** Bien que l'épreuve de spécialité ne soit pas une restitution de connaissances, l'interprétation des documents proposés dans les exercices nécessite des savoirs de base. Voir « Essentiels ».

## EXERCICES D'APPLICATION

12

## 1 VRAI OU FAUX ?

★ 15 min ▶ P. 324

Indiquez quelles sont les affirmations exactes, corrigez les autres.

## 1. La respiration

- Ne peut se produire qu'en présence de dioxygène dans le milieu.
- Nécessite la présence de mitochondries dans la cellule.
- Débute comme la fermentation par la glycolyse.
- Chez les végétaux, elle ne se produit que la nuit. Le jour les végétaux font la photosynthèse.
- Permet de régénérer l'ADP à partir de l'ATP.

## 2. La fermentation

- La fermentation lactique se produit quand le milieu est pauvre en dioxygène.
- Régénère davantage d'ATP par mole de glucose utilisé que la respiration.
- Débute par la glycolyse.
- Produit de l'acide lactique et de l'éthanol.
- Ne se produit jamais dans une cellule qui possède des mitochondries.
- Se déroule dans le hyaloplasme de la cellule.

## 3. La photosynthèse

- Produit du glucose.
- Se déroule dans les mitochondries.
- Produit du  $\text{CO}_2$ .
- Transforme l'énergie lumineuse en énergie chimique.
- Régénère l'ATP nécessaire au travail cellulaire.

## 2 RÉDIGER

★ 15 min ▶ P. 324

Écrivez une phrase avec les éléments de chaque liste suivante.

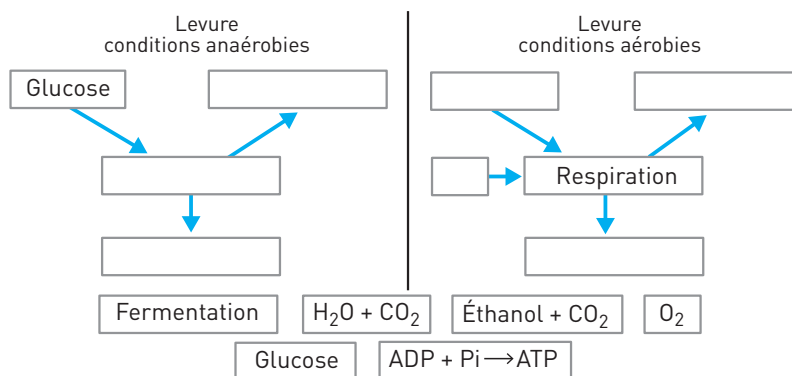
- Respiration, ATP, ADP, travail cellulaire, énergie.
- Photosynthèse, glucose, lumière,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .
- Fermentation,  $\text{O}_2$ , levure, ATP, éthanol.
- ATP, ADP, Pi, énergie.

3 ORGANISER DES CONNAISSANCES  
DANS UNE CARTE DES IDÉES

★ 10 min ▶ P. 324

Complétez la carte du document 14 en reliant les idées non placées avec des flèches (leur orientation traduit le sens du flux). Une idée peut servir plusieurs fois.

## Doc 14 Carte des idées



## 4 QCM



5 min

▶ p. 325

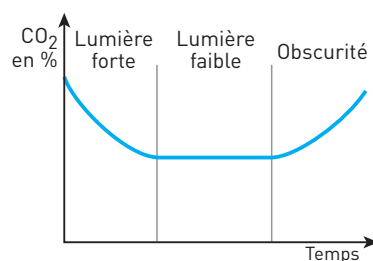
L'expérience est destinée à comprendre l'influence de la lumière sur les échanges de CO<sub>2</sub>.

**Protocole :** La feuille d'un végétal chlorophyllien est placée dans une enceinte close, un capteur permet de suivre la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'enceinte dans différentes conditions d'éclairage (doc. 15).

**Quand la lumière est faible, le taux de CO<sub>2</sub> reste constant car...**

1. La lumière est trop faible pour que le végétal absorbe le CO<sub>2</sub> par photosynthèse.
2. Le végétal n'effectue aucun échange gazeux avec le milieu.
3. À la lumière, le végétal fait la photosynthèse et à l'obscurité il respire. Entre les deux il ne se passe rien.
4. La quantité de CO<sub>2</sub> absorbé par la photosynthèse est compensée par le CO<sub>2</sub> rejeté par la respiration.

## Doc 15 Résultats



## 5 ÉTUDE DE LA RESPIRATION DE LA LEVURE.

## EXERCICE TRÈS GUIDÉ



15 min

▶ p. 325

**Expérience 1.** Des levures sont placées dans un milieu bien oxygéné. On suit au cours du temps la concentration en O<sub>2</sub> du milieu dans différentes conditions expérimentales.

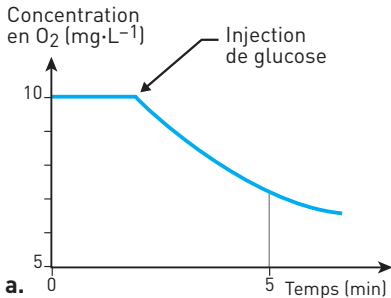
**Expérience 2.** À partir d'un broyat de levures, on a isolé un culot de mitochondries. Ces dernières sont placées dans un milieu bien oxygéné et contenant de

l'ADP + Pi. On suit au cours du temps la concentration en  $O_2$  du milieu dans différentes conditions expérimentales (**doc. 16**).

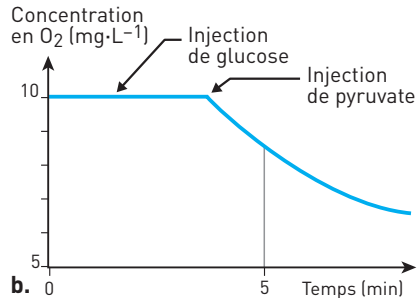
**Montrez que le glucose doit être transformé en pyruvate pour être oxydé dans la mitochondrie.**

### Doc 16 Étude de la respiration de levures

a. expérience 1



b. expérience 2



#### Stratégie d'analyse

1. **Identifier les paramètres** (les constantes : milieu oxygéné ; les variables : glucose, pyruvate, levure, mitochondrie).
2. **Lier** : identifier une relation de cause à conséquence (cause : injection ; conséquence : concentration en  $O_2$ ).
3. **Comparer** : il faut comparer les résultats obtenus avec les levures et ceux obtenus avec les mitochondries isolées.

**Interprétation.** Repère de savoir : voir le **document 7**.

## 6 LE RÔLE DE L'ATP DANS LA CONTRACTION

### MUSCULAIRE. EXERCICE TRÈS GUIDÉ

★★ | 15 min | ► P. 325

#### Étude expérimentale de la contraction de myofibrilles isolées

**Protocole** : Une cellule musculaire est disposée dans un milieu physiologique. À chaque extrémité elle est reliée à un dispositif qui mesure la tension exercée.

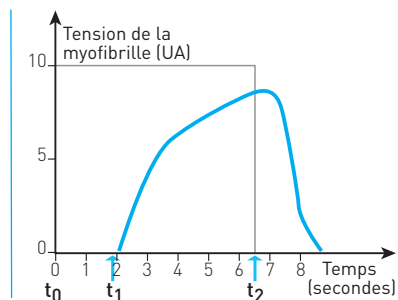
#### Doc 17 Graphe

$t_0$  : début de l'expérience ;

$t_1$  : addition dans le milieu d'une forte dose d'ATP ;

$t_2$  : addition d'une substance qui inhibe l'hydrolyse de l'ATP.

Montrez que cette expérience apporte des arguments en faveur de l'hypothèse suivante : « L'hydrolyse de l'ATP produit l'énergie utilisée par la cellule musculaire pour son déplacement. »



**Stratégie d'analyse**

- 1. Identifier les paramètres** : ATP, substance qui inhibe l'ATP, tension exercée par la fibre musculaire.
  - 2. Découper** la courbe en trois parties à l'aide du critère tension de la myofibrille, de 0 à 2 s ; de 2 à 7 s, de 7 à 9 s.
  - 3. Lier** : établir une relation de causalité.
  - 4. Comparer** les trois conditions expérimentales.
- Interprétation.** Repère de savoir : voir le **document 3**.

**EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT****7 ACTIVITÉ PHYSIQUE, MUSCLE ET ATP** | ★★ | 10 min | ► P. 325

Dans un muscle, des mesures de concentration intracellulaire de l'ATP sont réalisées, les résultats obtenus sont utilisés pour calculer la quantité d'énergie chimique de cet ATP. Les lois de la physique permettent de calculer l'énergie nécessaire pour monter un escalier (document 18).

**Quelles informations apportent les résultats de ces mesures ?**

**Doc 18 Résultats**

Mesures	Concentration d'ATP intracellulaire (mmol · L <sup>-1</sup> )	Quantité d'énergie correspondante (kJ)	Quantité d'énergie dépensée pour monter un escalier de 4 étages (kJ)
Pour un individu de 70 kg (environ 30 kg de muscles)	120 à 180	5,1 à 7,5	35

**Analyse.** Ne peuvent être comparées que les données d'énergie exprimées en kJ. La colonne ATP en mmol · L<sup>-1</sup> ne sert qu'au calcul de l'énergie.

**Interprétation.** Repère de savoir : voir le **paragraphe II-2**.

**8 RESPIRATION ET FERMENTATION**  
**CHEZ LES LEVURES. EXERCICE GUIDÉ** | ★★ | 20 min | ► P. 325**Expérience historique de Pasteur**

**Protocole** : Il prépare une suspension de levures dans un milieu contenant du glucose. Il réalise avec cette suspension 3 cultures différentes dans des conditions de concentrations en dioxygène décroissantes de l'expérience 1 à 3.

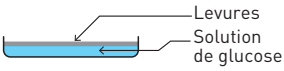
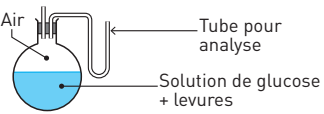
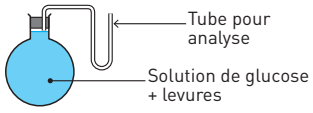


**Résultats :** Quelques heures après, Pasteur mesure la concentration en éthanol dans le milieu et dénombre les levures présentes dans chaque culture. Le tableau du document 19 présente les conditions du protocole et les résultats obtenus.

**Quelles informations peut-on dégager de ces résultats ?**

### Doc 19 Expérience de Pasteur

Le nombre de signes (+) est proportionnel à la quantité mesurée.

Conditions expérimentales	Quantité d'éthanol (alcool) produite par les levures	Rendement de la culture exprimée en mg de levures formées par g de glucose consommé
Expérience 1 : Au contact du dioxygène 	Traces	250
Expérience 2 : Air appauvri en dioxygène 	++	40
Expérience 3 : Absence de dioxygène 	+++++	5,7

**Analyse.** Ce document apparaît complexe car il juxtapose deux études simples : la production d'éthanol et l'évolution de la population des levures qui se multiplient dans le milieu exprimée sous forme de rendement en mg de levures par g de glucose consommé.

1. **Diviser** : il y a deux sujets, a) celui de la formation d'éthanol, b) celui du rendement.

2. **Lier** : cause =  $O_2$ , conséquences = éthanol et rendement.

3. **Comparer** : les conséquences avec et sans  $O_2$ .

**Interprétation.** Repère de savoir : voir les documents 4 et 6.

## 9 L'ORIGINE DE L'OXYGÈNE PRODUIT

### PAR PHOTOSYNTÈSE. EXERCICE GUIDÉ

★★★ 30 min ▶ P. 326

**Expériences de Ruben et Kamen avec des algues chlorophylliennes**

**Protocole.** Des algues chlorophylliennes sont mises en solution dans de l'eau additionnée de dioxyde de carbone. On prépare deux suspensions d'algues A et

B qui diffèrent par la proportion de molécules d'eau comportant l'isotope  $^{18}\text{O}$ , ainsi que par la proportion de dioxyde de carbone comportant ce même isotope. Les suspensions A et B sont exposées à la lumière. Le dioxygène produit par les algues est recueilli et la proportion des molécules de dioxygène comportant  $^{18}\text{O}$  est déterminée. Il existe deux isotopes stables de l'oxygène :  $^{16}\text{O}$  (le plus fréquent) et  $^{18}\text{O}$  (appelé isotope lourd de l'oxygène). La présence de chacun de ces isotopes dans une molécule peut être détectée par un spectromètre de masse. Les **résultats** sont donnés dans le **document 20**.

### Doc 20 Expérience de Ruben et Kamen

Une proportion de 0,85 signifie 85 %.

	Proportion des molécules comportant $^{18}\text{O}$		
	Eau du milieu	Dioxyde de carbone	Dioxygène produit
Suspension A	0,85	0,20	0,84
Suspension B	0,20	0,68	0,20

**Analyse.** L'interprétation de ce document présente une triple difficulté : a) comprendre pourquoi on utilise des isotopes de l'oxygène ; b) comprendre ce qu'expriment les données dans le tableau de résultats ; c) identifier dans le tableau causes et conséquences.

**1. Identifier les paramètres :** composition isotopique de l'eau du milieu, de dioxyde de carbone et du dioxygène rejeté.

**2. Lier :** établir une relation de causalité entre ces paramètres.

**3. Comparer :** % eau du milieu et  $\text{CO}_2$  avec % du dioxygène produit.

**Interprétation.** Repère de savoir : voir le **document 9**.

### 1. QCM. Répondez par vrai ou faux.

#### • Analyse de l'expérience

- L'eau du milieu dans lequel est placée la suspension A contient 85 % de  $\text{O}_2$ .
- L'eau de la suspension A est plus riche en  $\text{O}_2$  que celle de la suspension B.
- L'eau du milieu de la suspension A contient 85 % de  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ .
- Pour chaque suspension, la proportion des isotopes de l'oxygène présent dans le dioxygène rejeté par photosynthèse est voisine de la proportion des isotopes dans l'eau et très différente de celle du dioxyde de carbone.

#### • Conclusion

- L'oxygène rejeté par la cellule chlorophyllienne provient de l'eau.
- L'oxygène rejeté par la cellule chlorophyllienne provient du dioxyde de carbone.
- L'oxygène rejeté par la cellule chlorophyllienne provient des deux molécules.

**2. Après avoir répondu au QCM, rédigez une réponse écrite** comprenant une analyse et une interprétation.

## EXERCICES D'APPROFONDISSEMENT

12

**10 RÉGÉNÉRATION DE L'ATP  
DANS LES CHLOROPLASTES**

★★ | 30 min | ► P. 326

On cherche à mettre en évidence les conditions de la régénération de l'ATP dans un chloroplaste.

**Protocole.** Des chloroplastes intacts, extraits de cellules chlorophylliennes, sont placés dans quatre milieux qui diffèrent par leur composition et l'éclairage. On prépare également un milieu sans chloroplastes.

Quelques minutes après, on identifie la présence d'ATP.

**Doc 21 Résultats**

Pi = phosphate inorganique ; + = Présence ; - = absence.

	Conditions expérimentales				Formation d'ATP
	Eau	ADP	Pi	Lumière	
Milieu 1	+	+	+	+	oui
Milieu 2	+	+	+	-	non
Milieu 3	+	+	-	+	non
Milieu 4	+	-	+	+	non
Milieu sans chloroplastes	+	+	+	+	non

**Après une étude rigoureuse des résultats, indiquez les conditions de régénération de l'ATP dans un chloroplaste. Puis expliquez ces résultats à l'aide de vos connaissances.**

**Analyse.** La principale difficulté ici réside dans le nombre de données qui crée de la complexité. Il est cependant facile de produire une analyse simple !

1. **Lier** : causes = eau, ADP, Pi, lumière ; conséquence = formation ATP.
2. **Rassembler** les expériences où l'ATP n'est pas présent.
3. **Comparer** les expériences avec formation d'ATP et sans.

**Interprétation.** Repère de savoir : voir le **document 9**.

**11 EXPÉRIENCE DE HILL**

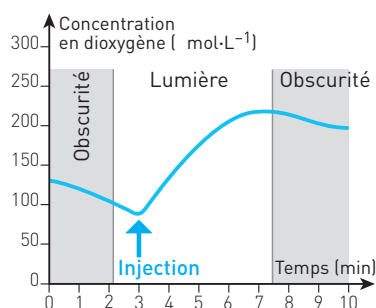
★★★ | 40 min | ► P. 327

On précise les mécanismes de la phase photochimique de la photosynthèse.

**Protocole :** Des feuilles d'épinards sont broyées pour éclater les cellules chlorophylliennes puis filtrées pour obtenir une suspension de chloroplastes dans le filtrat. On verse dans une enceinte transparente ce filtrat contenant des chloroplastes isolés dont les enveloppes sont lésées. Le milieu est dépourvu de dioxyde de carbone. L'enceinte est placée alternativement à l'obscurité et à la lumière pendant 10 minutes.

À  $t = 3$  min, on injecte dans l'enceinte 0,5 mL de ferricyanure de potassium, un accepteur d'électrons et de protons (dans les conditions physiologiques, il est appelé **R**). Une sonde permet de mesurer la concentration en dioxygène du filtrat. Après avoir étudié de manière rigoureuse les **résultats** de cette expérience, utilisez vos connaissances pour interpréter le phénomène.

### Doc 22 Résultats



1. **Découper** : avant et après injection du ferricyanure.

2. **Lier** : cause = injection ; conséquence =  $O_2$ .

3. **Comparer** les situations avant et après injection.

**Interprétation.** Repère de savoir : voir le **document 11**.

## CONTRÔLE

### 12 LA BIOLUMINESCENCE DU LAMPYRE

★★

45 min

► P. XXX

Le lampyre est un insecte capable d'émettre une lumière : ce phénomène se nomme la bioluminescence. La femelle garde toute sa vie un aspect larvaire d'où le nom de ver luisant parfois utilisé pour désigner le lampyre. Ces signaux lumineux servent notamment à la parade amoureuse.

À partir de l'étude des **documents** mise en relation avec vos connaissances, **montrez comment l'ATP intervient dans ce phénomène et comment il est produit dans la cellule.**

Il y a trois documents complémentaires pour deux questions. Identifiez le(s) document(s) qui permet(tent) de répondre à chacune des deux questions.

**Interprétation.** Repère de savoir : voir les **documents 3 et 9**.

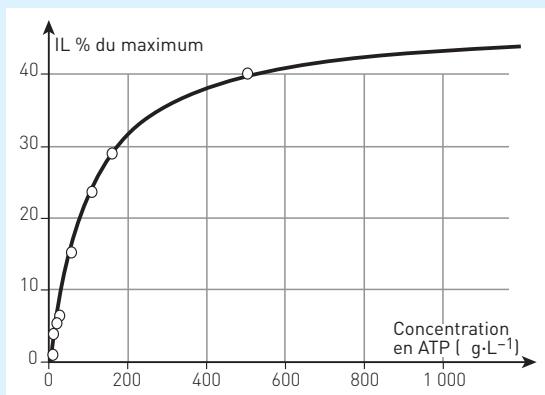
### Doc 23 Expériences de bioluminescence réalisées in vitro

Tubes	Contenus des tubes	Résultats
1	Luciférine + ATP + luciférase	Aucune lumière produite
2	Luciférine + $O_2$ + luciférase	Aucune lumière produite
3	Luciférine + ATP + $O_2$ + luciférase	Émission d'une lumière

*Remarque* : La luciférine et la luciférase (enzyme) sont présentes dans le cytoplasme des cellules du lampyre. L'oxygène intervient dans une réaction d'oxydation du complexe luciférine-luciférase.

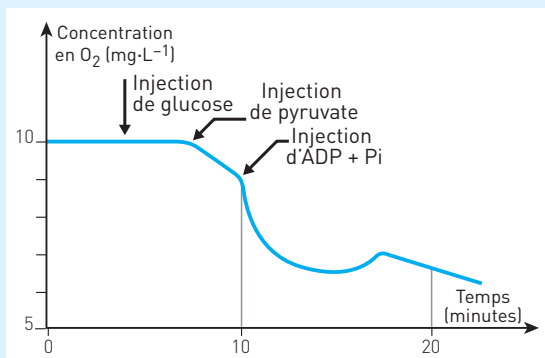
#### Doc 24 Relation entre intensité lumineuse et concentration en ATP

Un extrait d'abdomen de lampyre est placé en présence de dioxygène. On mesure l'intensité lumineuse (IL) selon la concentration d'ATP du milieu.



#### Doc 25 Consommation de dioxygène par des mitochondries isolées

Des mitochondries sont isolées à partir de cellules animales. À l'aide d'un système ExAO (expérimentation assistée par ordinateur), on suit la concentration en dioxygène du milieu dans les conditions expérimentales suivantes.



**Glucose** : sucre en C<sub>6</sub> = 6 atomes de carbone.

**Pyruvate** : molécule à 3 atomes de carbone résultant de la dégradation partielle du glucose dans le hyaloplasme.

**ADP + Pi** : adénosine diphosphate + phosphate inorganique.

## CORRIGÉS

**1** La respiration

a, b et c : Vrai.

d : Faux : un végétal respire le jour et la nuit. Mais le jour, les échanges gazeux dus à cette respiration sont masqués par ceux de la photosynthèse.

e : Faux. C'est l'inverse, l'ATP est régénéré à partir de l'ADP et Pi.

**La fermentation**

a, c et f : Vrai.

b. Faux. La fermentation produit 2 ATP par mole de glucose tandis que la respiration en produit 36, soit 18 fois plus.

d. Faux. Par fermentation une cellule produit de l'acide lactique (cellules musculaires chez l'Homme) OU de l'éthanol (levures).

e. Faux. En l'absence de dioxygène, les réactions qui se produisent dans les mitochondries sont bloquées. Certaines cellules peuvent alors utiliser la fermentation.

**La photosynthèse**

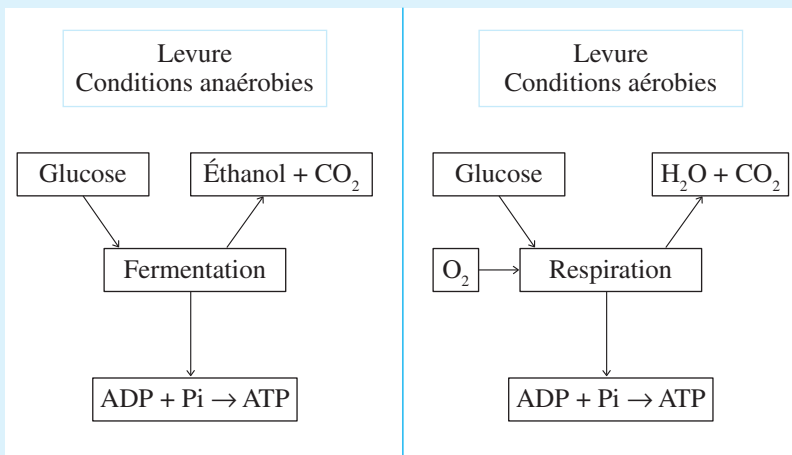
a. Vrai.

b. Faux. Dans les chloroplastes. c. Faux. Consomme du  $\text{CO}_2$ .

d. Vrai. Le glucose contient cette énergie chimique.

e. Faux. C'est le rôle de la mitochondrie. L'ATP régénéré dans le chloroplaste lors de la photosynthèse ne sert qu'à la synthèse du glucose lors de la phase chimique.

**2** 1. L'énergie nécessaire au travail cellulaire est apportée par l'ATP, régénéré à partir de l'ADP lors de la respiration. 2. La photosynthèse est un mécanisme qui produit du glucose et du dioxygène à partir de molécules minérales,  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{CO}_2$  ; l'énergie nécessaire à cette synthèse est apportée par la lumière. 3. En absence d' $\text{O}_2$ , la levure régénère son ATP par fermentation, ce qui produit de l'éthanol. 4. Deux formulations sont possibles. a) La synthèse de l'ATP à partir de l'ADP et Pi nécessite un apport d'énergie. b) La transformation de l'ATP en ADP et Pi libère de l'énergie.

**3**

**4** 1, 2 et 3 : Faux. 4 : Vrai.

Dans la cellule d'un végétal chlorophyllien, l'énergie nécessaire au travail cellulaire est apportée par l'ATP régénéré par la respiration, à l'obscurité comme à la lumière, ce qui produit du  $\text{CO}_2$ . Mais dès qu'il y a de la lumière, les chloroplastes absorbent du  $\text{CO}_2$  pour la photosynthèse. Les deux phénomènes se compensent avec la lumière faible.

**5** **Analyse** : Les deux expériences sont réalisées dans un milieu bien oxygéné.

- Avec des levures seules, l'injection de glucose provoque une baisse de la concentration en dioxygène dans le milieu.
- Mais quand les mitochondries des levures sont isolées, l'injection de glucose ne modifie pas la concentration en dioxygène, c'est l'injection de pyruvate qui la fait diminuer.

**Conclusion** : La levure importe le glucose présent dans le milieu, cette molécule est ensuite transformée en pyruvate dans le hyaloplasme. La mitochondrie importe le pyruvate et l'oxyde. La mitochondrie ne peut pas importer le glucose.

**6** **Analyse** : Dans cette expérience, on mesure la tension exercée par une cellule musculaire. Avant l'injection d'ATP, la tension est nulle.

À  $t_1$ , l'injection d'une forte dose d'ATP augmente la tension exercée par la cellule musculaire.

À  $t_2$ , l'injection d'une substance qui inhibe l'hydrolyse de l'ATP diminue rapidement la tension exercée par la cellule musculaire.

**Conclusion** : C'est la contraction de la cellule musculaire qui crée la tension mesurée. La contraction musculaire ne se produit qu'en présence d'ATP, s'il est absent, la cellule ne se contracte pas. Mais s'il y a présence d'ATP et que son hydrolyse est bloquée, il n'y a pas contraction. C'est donc l'hydrolyse de l'ATP qui produit l'énergie nécessaire à la contraction musculaire.

**7** **Analyse** : La quantité d'énergie stockée sous forme d'ATP chez un individu de 70 kg est 5 à 7 fois plus faible que la quantité d'énergie nécessaire pour monter un escalier de 4 étages.

**Conclusion** : L'ATP présent dans un muscle ne permet pas de produire l'énergie nécessaire pour monter 4 étages. L'ATP utilisé doit donc être régénéré.

**8** • **Production d'éthanol**

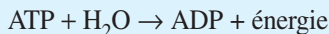
Des levures sont placées dans un milieu contenant du glucose. En présence de dioxygène, il y a très peu production d'éthanol. Si le milieu est appauvri en  $\text{O}_2$  (expérience 2) jusqu'à ne plus en contenir (expérience 3), la production d'éthanol augmente et devient importante.

**Hypothèse explicative** : En présence de dioxygène, les levures respirent. Quand la concentration en dioxygène diminue ou devient nulle, les levures fermentent : cela se traduit par la production d'éthanol.

• **Rendement**

Avec la même quantité de glucose, la culture placée au contact du dioxygène contient 40 fois plus de levures que la culture 3 qui ne contient pas de dioxygène.

**Hypothèse explicative :** Pour se multiplier, les levures ont besoin d'énergie : synthèse de biomolécules, mouvement des organites lors de la division. Cette énergie est apportée par l'ATP.



La fermentation ne régénère que 2 ATP par mole de glucose alors que la respiration en régénère 36.

### 9 1. QCM

a. et b. Faux. Les chiffres placés dans le tableau indiquent la proportion des isotopes  $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ . Le milieu de la suspension A contient 85 % de  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  (et donc 15 % de  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ), alors que le milieu B contient 20 % de  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  (et donc 80 % de  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ).

c. Vrai.

d. Vrai. Le chiffre placé dans la colonne dioxygène est toujours très voisin de celui présent dans la colonne eau du milieu.

e. Vrai.

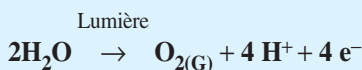
f. et g. Faux.

### 2. Réponse écrite

Les atomes d'oxygène du dioxygène rejeté peuvent provenir de l'eau  $\text{H}_2\text{O}$  et/ou du dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ . L'expérience de Ruben et Kamen est destinée à suivre ces atomes par le principe du marquage isotopique.

**Analyse :** Les suspensions de chloroplastes sont cultivées dans des milieux comportant des pourcentages différents d'isotope  $^{18}\text{O}$  dans l'eau et dans le dioxyde de carbone. Le dioxygène produit a toujours une composition isotopique très voisine de celle de l'eau, et très différente de celle du dioxyde de carbone.

**Interprétation :** Le dioxygène produit par la photosynthèse provient de l'oxygène de l'eau. Au cours de la photosynthèse, l'eau est donc détruite : c'est la photolyse de l'eau.



**10 Analyse :** Des chloroplastes intacts sont placés dans des conditions expérimentales différentes.

- Il n'y a production d'ATP qu'en présence simultanée de chloroplastes, de lumière, d'ADP et de Pi.

- L'absence de l'une de ces conditions suffit pour que l'ATP ne soit pas produit.

**Conclusion :** L'ATP est régénéré dans le chloroplaste à partir de l'ADP et du Pi : ce phosphate inorganique est fixé sur l'adénosine diphosphate (ADP) pour former de l'adénosine triphosphate (ATP) :



La formation d'ATP à partir de l'ADP nécessite de l'énergie : celle-ci est fournie par la lumière.



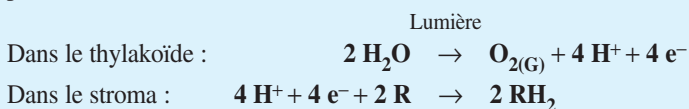
**11 Analyse :** Des chloroplastes isolés dont l'enveloppe est lésée sont soumis à des conditions expérimentales différentes de lumière et de présence d'un accepteur d'électrons, le ferricyanure de potassium, dans un milieu dépourvu de  $\text{CO}_2$ .

Il n'y a production de dioxygène qu'en présence de lumière et en présence d'un accepteur d'électrons, le ferricyanure de potassium.

**Interprétation :** La formation du dioxygène nécessite de la lumière : il est formé pendant la phase photochimique.

Cette formation se fait en l'absence de  $\text{CO}_2$ . Les atomes qui forment l' $\text{O}_2$  ne proviennent pas du  $\text{CO}_2$ .

Il faut aussi un accepteur d'électrons. Dans la cellule, l'accepteur d'électrons fixe les électrons issus de la photolyse de l'eau et fixe les atomes d'hydrogène. La réaction peut s'écrire :



**12** Certaines cellules du lampyre sont capables d'émettre de la lumière, cette bioluminescence fait intervenir l'ATP. Comment intervient l'ATP dans cette production ? Comment est-il produit dans les cellules ?

### 1. Comment intervient l'ATP dans l'émission de lumière ?

Étude du document 23

**Analyse :** De la lumière est produite uniquement en présence de luciférine, d'ATP, de dioxygène et de luciférase. En l'absence de dioxygène ou d'ATP, il n'y a pas de bioluminescence.

La luciférine et la luciférase présentes dans les cellules du lampyre forment un complexe qui est oxydé.

**Conclusion :** La lumière est produite par l'oxydation de la luciférine par la luciférase. L'ATP est indispensable à l'émission de lumière.

Étude du document 24 : Production de lumière et concentration en ATP

**Analyse :** Des cellules prélevées sur l'abdomen d'un lampyre sont placées dans un milieu en présence d' $\text{O}_2$ . Plus la concentration en ATP du milieu dans lequel baignent ces cellules est importante, plus l'intensité lumineuse produite est importante.

**Conclusion :** L'énergie lumineuse est produite par conversion de l'énergie chimique libérée par l'hydrolyse de l'ATP en ADP + Pi.

### 2. Comment l'ATP est-il régénéré dans la cellule ?

Étude du document 25

**Analyse :** Des mitochondries de cellules animales sont isolées et soumises à différentes conditions expérimentales. La concentration en  $\text{O}_2$  du milieu dans lequel sont placées ces mitochondries reste constante.

- Après injection de glucose, cette concentration en  $\text{O}_2$  reste constante.
- Si on injecte du pyruvate, la concentration diminue.

- Si on injecte ensuite de l'ADP et du Pi, la baisse de la concentration est plus importante.

**Conclusion :** L'ATP (adénosine triphosphate) peut être régénéré à partir d'ADP et d'un phosphate inorganique libre Pi.



Les mitochondries utilisent le pyruvate et le dioxygène pour régénérer l'ATP à partir d'ADP et Pi. Elles ne peuvent pas utiliser le glucose.

### **Bilan**

Dans les cellules du lampyre, l'oxydation du complexe luciférine-luciférase convertit l'énergie chimique libérée par l'hydrolyse de l'ATP en lumière.

Les cellules du lampyre qui émettent de la lumière possèdent des mitochondries : elles régénèrent l'ATP par respiration.

Le glucose, ose à 6 carbones, est importé dans les cellules. Dans le cytosol, il est transformé en acide pyruvique, ose à 3 carbones (1 mole de glucose donne 2 moles de pyruvate).

Le pyruvate pénètre dans la mitochondrie. En présence d'O<sub>2</sub>, le pyruvate est oxydé, les réactions mitochondriales produisent CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O. Cette transformation permet la régénération de l'ATP à partir d'ADP et de Pi.

13

## Atmosphère, hydrosphère, climats : du passé à l'avenir

Un article du *Monde* du 9 février 2012 présente les simulations climatiques réalisées par les chercheurs français pour 2100. « *La hausse pourrait atteindre 3,5 à 5 °C dans le scénario le plus "pessimiste" ... et 2 °C environ pour le plus "optimiste", possible en cas de mesures fortes et rapides contre les gaz à effet de serre, à l'origine du changement climatique...* »

Ces variations climatiques, étroitement associées à la composition de l'atmosphère, s'inscrivent dans une longue histoire des variations climatiques aux causes multiples : astronomiques, géologiques et biologiques.

### I DE L'ATMOSPHÈRE PRIMITIVE À L'ATMOSPHÈRE MODERNE : DE – 3,5 GA À – 0,6 GA

L'atmosphère primitive provient principalement du dégazage du manteau. La composition des gaz libérés actuellement par les volcans donne une idée de la composition de cette atmosphère :

H<sub>2</sub>O (80-90 %), CO<sub>2</sub> (6-12 %), H<sub>2</sub>S et SO<sub>2</sub> (3 %).

L'atmosphère actuelle a une composition bien différente :

N<sub>2</sub> (79 %), O<sub>2</sub> (20,8 %), CO<sub>2</sub> (0,04 %).

Qu'est devenu le CO<sub>2</sub> ? D'où vient le dioxygène ?

#### 1. Les indices géologiques utilisés pour étudier cette transformation

##### ■ Uraninite

De l'uraninite est présente dans les sédiments marins jusqu'à – 2,2 Ga. Ce minéral, très instable en conditions oxydantes, ne se dépose qu'en milieu réducteur.

##### ■ Continents : composition en fer des paléosols

Entre – 3,4 et – 2,2 Ga, les paléosols des continents montrent un appauvrissement en fer. À partir de – 1,8 Ga, les paléosols montrent au contraire un enrichissement en fer sous une forme oxydée.

### ■ Océans : Fer rubané (BIF Banded Iron Formations)

Les gisements de fer rubané, fréquents entre  $-2,3$  et  $-1,7$  Ga, sont des roches sédimentaires où alternent des minéraux de fer à l'état réduit : sidérite ( $\text{FeCO}_3$ ), pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), et du fer à l'état oxydé : magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

### ■ Continents : Couches rouges (Red beds)

Les couches rouges sont des grès dont les grains de quartz sont encroûtés d'hématite. On les trouve à partir de  $-2,2$  Ga.

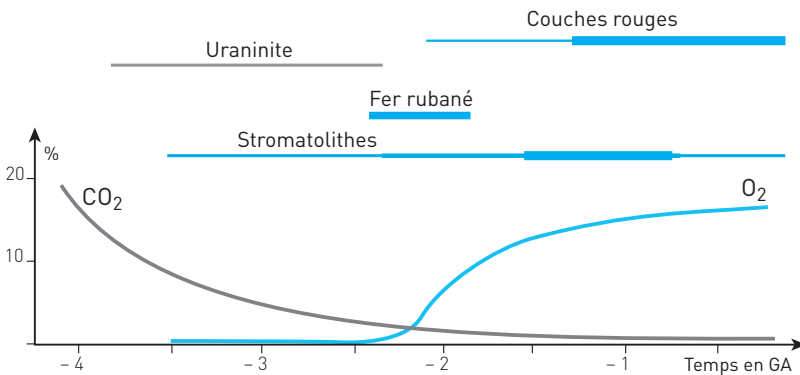
### ■ L'origine biologique du dioxygène : Cyanobactéries et stromatolithes

On retrouve des stromatolithes à partir de  $-3,5$  Ga, leur extension géographique est maximale entre  $-1,5$  et  $-0,7$  Ga. Aujourd'hui, des stromatolithes se forment en milieu océanique peu profond, principalement en Australie. Ce sont des roches sédimentaires bio-construites par des cyanobactéries, bactéries qui réalisent la photosynthèse : elles absorbent du dioxyde de carbone et produisent du  $\text{O}_2$ .

## 2. L'histoire de cette évolution

Le document 1 fournit une première approche de cette évolution.

### Doc 1 Évolution de l'atmosphère primitive



## 3. Utiliser les indices pour reconstituer l'histoire de l'atmosphère

**EXEMPLES :** Voir les exercices d'application 1 et 2, et les exercices d'entraînement 5 et 6.

### L'essentiel

Pendant plus de 2 milliards d'années, l'atmosphère est restée vierge de dioxygène. L'apparition des stromatolithes et de la photosynthèse s'est traduite par une absorption du  $\text{CO}_2$  et une libération d' $\text{O}_2$ . Après l'oxydation des minéraux réduits des océans (fer rubané) et des continents (couches rouges), le dioxygène s'est accumulé dans l'atmosphère.

## II LES CLIMATS DU PASSÉ

L'étude des climats du passé repose sur l'étude d'indices biologiques ou géologiques conservés dans les roches sédimentaires et dans les glaces.

### 1. Indices utilisés pour le dernier milliard d'années

La précision donnée par ces indices ne permet qu'une description des grandes variations du climat (à l'échelle du million d'années).

#### ■ Les indices géologiques qui témoignent d'un climat chaud

**La bauxite** est une roche colorée en rouge par les oxydes de fer et d'aluminium. En climat tropical, l'altération des minéraux des roches magmatiques et métamorphiques est intense, elle produit des oxydes de fer et d'aluminium non solubles qui restent sur place et forment des sols latéritiques.

**Les évaporites**, comme le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) et le sel ( $\text{NaCl}$ ), sont les formes cristallisées de sels solubles dans l'eau. En climat chaud et aride, l'évaporation est intense : les sels précipitent et forment des roches qualifiées d'évaporites.

**Le charbon** est une roche carbonée contenant souvent des fossiles de végétaux. Le charbon provient de la dégradation incomplète, dans un milieu pauvre en oxygène, des végétaux de forêts tropicales humides.

**Le corail** est un animal qui élabore un squelette calcaire. L'accumulation de ces squelettes forme aujourd'hui les barrières de corail et délimite les atolls dans les zones sous climat tropical.

#### ■ Les indices géologiques qui témoignent d'un climat froid

**Les vallées glaciaires** en U sont formées par les glaciers qui rabotent et rayent les roches de la vallée.

**Les tillites** sont des roches arrachées par les glaciers et enrobées d'argile.

#### ■ Utiliser ces indices pour reconstituer un climat

Un climat est reconstitué à partir d'une panoplie d'indices utilisés en étudiant en parallèle la position des continents à l'époque considérée.

**EXEMPLE :** L'évolution du climat au Carbonifère est étudiée à l'exercice 9.

#### L'essentiel

Pour le dernier milliard d'années, les grandes variations du climat peuvent être reconstituées avec des indices de climat chaud (bauxite, évaporites, charbon, corail) et des indices de climat froid (tillites, vallées glaciaires).

### 2. Indices utilisés pour les 800 000 dernières années

Les glaces et les sédiments récents apportent des indices qui permettent une description précise des variations du climat (ordre du millier d'années).

#### ■ Informations apportées par les pollens fossiles

La répartition de nombreux végétaux dépend de la température :

– en climat polaire, s'étendent les déserts de glace ;

- en climat très froid, ne vivent que des graminées, herbes de la toundra ;
- en climat froid, ce sont les conifères qui dominent : pins, sapins et épicéas ;
- quand le climat est tempéré, les feuillus dominent.

L'enveloppe très résistante des pollens se conserve pendant des milliers d'années. À chaque espèce végétale correspond une forme de pollen particulière. Un climat passé peut être déterminé par la panoplie des pollens fossiles présents en un lieu.

#### ■ Informations apportées par les glaces

L'inlandsis de l'Antarctique est un glacier continental dont l'épaisseur peut atteindre plus de 4 000 m. Le profil réalisé sur les 3 350 m de la carotte de Vostok couvre maintenant environ 400 000 ans.

Dans la glace se trouvent des **bulles d'air**, minuscules échantillons de la paléo-atmosphère piégés lors de la formation de la glace, dont on peut déterminer la composition.

Deux types de molécules d'eau peuvent être identifiées :  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  et  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ . La proportion  $\text{H}_2^{18}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$  dans les glaces constitue un paléo-thermomètre. Le  $\delta^{18}\text{O}$  (lire « delta 18 O ») est une grandeur qui décrit ce rapport : **plus le  $\delta^{18}\text{O}$  est élevé plus la température de l'atmosphère lors de la formation de la glace était élevée.**

**Explication :**  $^{16}\text{O}$  est l'isotope de l'oxygène le plus fréquent,  $^{18}\text{O}$  est un isotope plus rare et surtout plus lourd. Quand l'eau des océans s'évapore, la vapeur d'eau qui se forme est appauvrie en  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  plus lourd. Les précipitations appauvrissent de plus en plus cette vapeur en  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ .

La ségrégation entre les deux molécules est modulée par la température : plus la température de l'air est froide, plus la précipitation de  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  est importante, plus l'eau du nuage qui formera la neige et la glace s'enrichit en  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ .

#### ■ Informations apportées les sédiments récents

Les coquilles calcaires ( $\text{CaCO}_3$ ) des animaux marins fossilisent la proportion  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  contenue dans l'eau des océans, coquilles qui s'accumulent dans les sédiments calcaires. Un climat froid se traduit aux pôles par une accumulation des glaces enrichies en  $^{16}\text{O}$ , l'eau de mer s'enrichit alors en  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ .

**Plus le  $\delta^{18}\text{O}$  des sédiments est élevé, plus la température globale au moment de leur formation était basse.**

#### ■ Utiliser ces indices pour reconstituer les variations du climat

**EXEMPLES :** Pollens et variations du climat sur les 15 000 dernières années sont traités dans l'exercice 7. Pollens, données fournies par les glaces et variations du climat sur les 130 000 dernières années sont traités dans l'exercice 11 (contrôle).

#### L'essentiel

Les informations apportées par les pollens fossiles, et les apports essentiels de l'étude des glaces (bulles d'air et  $\delta^{18}\text{O}$ ) permettent de retracer une évolution précise de l'évolution du climat pour les 800 000 dernières années.

### 3. Les phénomènes physiques qui expliquent les variations du climat

La température est un paramètre déterminant pour un climat. Expliquer les variations de la température, c'est utiliser les lois de la physique qui décrivent les interrelations entre la lumière, le sol, l'atmosphère et l'hydrosphère.

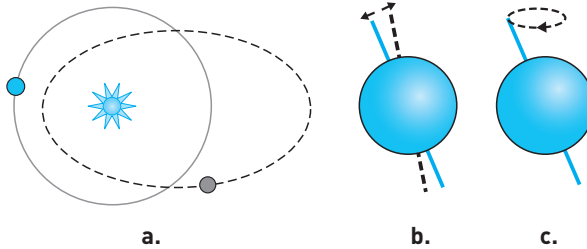
#### ■ Modulation de la puissance lumineuse absorbée par le sol

Un sol éclairé s'échauffe : l'énergie lumineuse qu'il absorbe est convertie en énergie thermique. Plusieurs paramètres vont moduler la puissance lumineuse absorbée par le sol (puissance = énergie lumineuse reçue par unité de surface).

■ **Activité solaire.** Elle est considérée comme à peu près constante.

■ **Paramètres orbitaux.** L'énergie solaire reçue par la Terre dépend de paramètres orbitaux qui changent de manière périodique.

#### Doc 2 Variation des paramètres orbitaux de la Terre



a. L'orbite de la Terre oscille entre une forme quasi circulaire (c'est le cas aujourd'hui) et une forme plus elliptique (période : 413 000 ans).

b. L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre varie de  $2^\circ$  (période : 41 000 ans).

c. La précession : l'axe de rotation décrit un cercle (période : 26 000 ans).

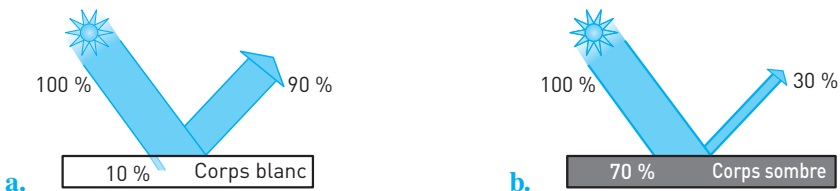
#### ■ Modulation de l'énergie absorbée par l'albédo

L'**albédo** d'une surface désigne le rapport entre l'énergie solaire incidente et l'énergie réfléchi. Plus une surface est réfléchissante plus son albédo est élevé. La capacité de réflexion d'une surface dépend de sa couleur et de sa matière.

#### Doc 3 Différentes valeurs d'albédo

a. Dans le cas de la neige ou des glaces des pôles, **l'albédo est de 0,9**. Cela signifie que 90 % de l'énergie reçue est réfléchi, 10 % absorbée : la surface est peu chauffée.

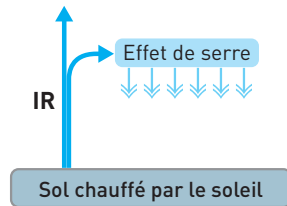
b. À la surface de la Terre, en moyenne, **l'albédo est de 0,3**. Cela signifie que 30 % de l'énergie reçue est réfléchi, 70 % transformée en chaleur par le sol : le sol s'échauffe.



### ■ Modulation du rayonnement infrarouge produit : l'effet de serre

Un sol chauffé émet un rayonnement infrarouge (IR), ce qui le refroidit. Une partie de ce rayonnement infrarouge est absorbé par les gaz à effet de serre de l'atmosphère (méthane, dioxyde de carbone, eau). L'atmosphère s'échauffe : c'est l'effet de serre. Une partie de cette chaleur est émise vers le sol.

#### Doc 4 Effet de serre



*Remarque* : La température moyenne sur Terre est de + 15 °C. Sans effet de serre, elle chuterait à – 18 °C...

### ■ Modification de la composition en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère

– Le volcanisme, les combustions liées aux activités humaines, le dégazage des océans sont des **sources de CO<sub>2</sub>**.

– L'altération des silicates, la photosynthèse, la dissolution dans l'océan sont des **puits de CO<sub>2</sub>**.

### ■ Boucles d'amplification

Les phénomènes physiques interfèrent, ce qui amplifie les variations de température et explique la rapidité des changements.

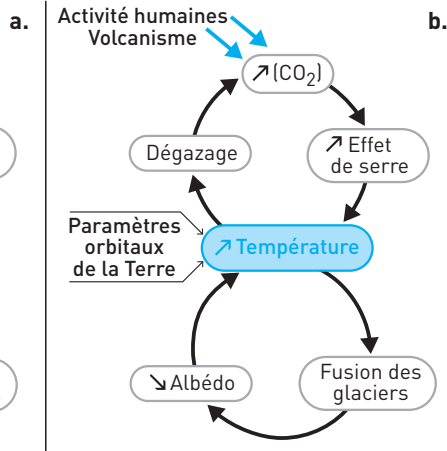
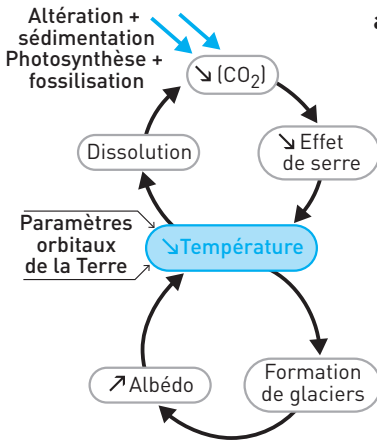
Le **document 5a** schématise cette boucle dans le sens « **refroidissement** ». Une diminution de la température globale de la Terre se traduit par une augmentation de la surface des glaces et de la neige dont l'albédo élevé accentue le refroidissement. La baisse de la température provoque une diminution de la concentration dans l'atmosphère de deux gaz à effet de serre : le CO<sub>2</sub> qui se dissout dans les eaux froides des océans, le méthane qui est moins produit parce que les phénomènes de fermentation diminuent, ce qui diminue la température...

Le **document 5b** schématise cette boucle dans le sens « **réchauffement** ». À l'inverse, une augmentation de la température provoquée par une modification des paramètres orbitaux suffisante pour faire fondre la neige et la glace provoque une diminution de l'albédo qui entraîne une augmentation de la température. Cette augmentation de la température provoque le rejet dans l'atmosphère de deux gaz à effet de serre : du CO<sub>2</sub> par dégazage des océans et du méthane par la stimulation des fermentations, ce qui augmente la température...



**Doc 5 Boucles d'amplification**

a. Refroidissement      b. Réchauffement.

**L'essentiel**

La variation cyclique des paramètres orbitaux de la Terre provoque des variations de la température globale qui sont amplifiées par l'effet de serre et l'albédo.

### III QUELS SCÉNARIOS CLIMATIQUES POUR LE FUTUR (2010-2100) ?

#### 1. Le bilan qui inquiète

Depuis un siècle, on observe une augmentation de la température corrélée avec une augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre, et du  $\text{CO}_2$  en particulier. La plupart des scientifiques expliquent ces évolutions par l'effet de serre : le  $\text{CO}_2$  rejeté dans l'atmosphère par les activités humaines depuis l'ère industrielle provoque une augmentation de température.

#### 2. Quel climat pour demain ?

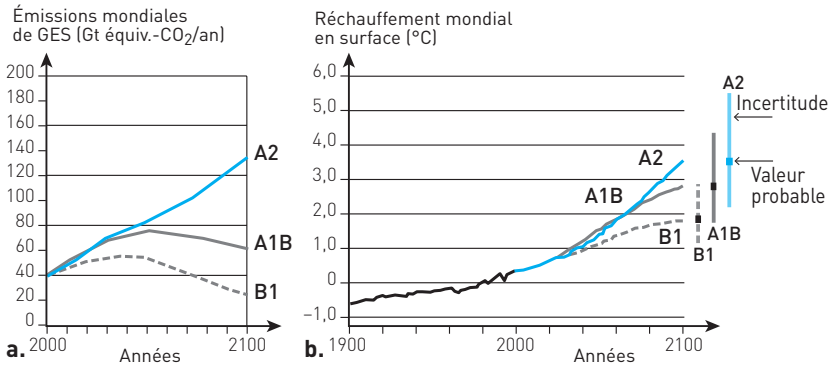
En 1988, l'augmentation de la température a été jugée suffisamment préoccupante pour la mise en place du Groupe intergouvernemental des experts du climat (GIEC), chargé d'évaluer l'état des connaissances relatives au changement climatique : causes, incidences et mesures qui pourraient être prises pour y faire face.

### 3. Modélisation, simulation et scénarios

Une investigation sur les climats du futur repose sur des simulations réalisées à l'aide de modèles mathématiques qui décrivent les relations complexes entre les paramètres climatiques. Les modèles retenus par le GIEC ont été utilisés pour simuler différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre (A1B, A2, B1) qui varient du simple au triple, et la conséquence de ces émissions en termes d'augmentation de température, qui varient selon les scénarios et les incertitudes de +1 à +5 °C (doc. 6).

#### Doc 6 Modélisations

a. Scénarios      b. Simulations.



#### L'essentiel

Les modèles mathématiques qui décrivent la relation effet de serre-climat permettent l'élaboration, pour le futur proche, d'hypothèses d'évolutions possibles du climat en fonction de scénarios d'émission de gaz à effet de serre.

## SAVOIR-FAIRE

## Vocabulaire

- **Albédo** : L'albédo désigne le rapport entre l'énergie solaire réfléchi et l'énergie solaire incidente. Un corps ayant un albédo de 0,9 réfléchit 90 % de l'énergie lumineuse qu'il reçoit et en absorbe 10 %.
- **Effet de serre** : Une partie du rayonnement infrarouge émis par un sol chauffé est absorbée par certains gaz de l'atmosphère. Celle-ci s'échauffe, une partie de cette chaleur est émise vers le sol.
- **Stromatolithes** : Formations calcaires construites par des bactéries qui réalisent la photosynthèse, cyanophycées en particulier.
- **Isotopes** : Éléments chimiques ayant le même numéro atomique mais qui diffèrent par le nombre de leurs neutrons.

## Compétences

1. Être capable de mettre en œuvre les méthodes de l'annexe « Méthodologie » (*Diviser, Découper, Regrouper, Lier, Comparer, Classer*) dans les différentes études demandées dans les exercices.
2. Comprendre les mécanismes d'amplification des variations de température.

## Repères

1. Connaître les principaux facteurs physiques qui agissent sur la température, et en particulier l'albédo et l'effet de serre.
2. Évolution de l'atmosphère primitive :
  - connaître les grandes étapes de l'évolution de l'atmosphère ;
  - connaître quelques indices de cette évolution.
3. Les climats du passé  
Connaître les principaux indices qui permettent de reconstituer les paléoclimats.

## EXERCICES D'APPLICATION

## 1 ÉVOLUTION DE L'ATMOSPHÈRE



10 min

▶ P. 347

Classez les événements suivants par ordre chronologique, du plus ancien au plus récent.

Atmosphère oxydante ; atmosphère réductrice ; accumulation d'O<sub>2</sub> dans l'atmosphère ; apparition des stromatolithes ; formation des couches rouges terrestres ; formation de fers rubanés dans les océans.

## 2 VRAI OU FAUX ?



10 min

▶ P. 347

Indiquez quelles sont les propositions exactes.

1. La composition en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère est modifiée par :

- a. la dissolution dans les océans.
- b. la formation de charbon.
- c. l'albédo.
- d. la température.
- e. l'érosion des roches non calcaires.
- f. le volcanisme.
- g. le dégazage des océans.

2. L'albédo d'un sol qui passe de 0,3 à 0,9 :

- a. peut traduire une chute de neige.
- b. peut traduire la fonte de la neige et l'apparition de la végétation.
- c. provoque un réchauffement du sol.
- d. amplifie un refroidissement.
- e. amplifie un réchauffement.

3 RELATIONS ENTRE TEMPÉRATURE ET  $\delta^{18}\text{O}$ 

15 min

▶ P. 347

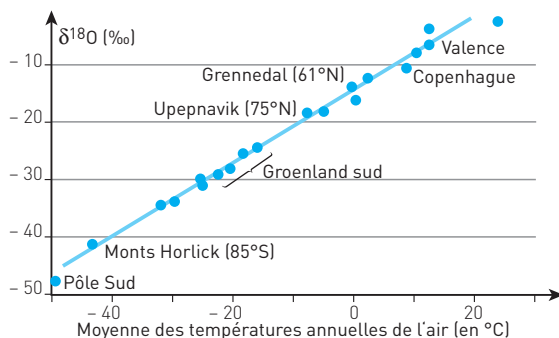
Le  $\delta^{18}\text{O}$  décrit la composition isotopique en <sup>18</sup>O et <sup>16</sup>O. Les mesures peuvent être réalisées dans la glace (H<sub>2</sub>O) ou dans les sédiments calcaires (CaCO<sub>3</sub>). Le document 7 présente la relation entre le  $\delta^{18}\text{O}$  et la température de l'air lors des précipitations d'eau ou de la neige. Le document 8 présente la relation entre le  $\delta^{18}\text{O}$  et la température de l'eau de mer utilisée pour produire une coquille calcaire.

Indiquez quelles sont les propositions exactes.

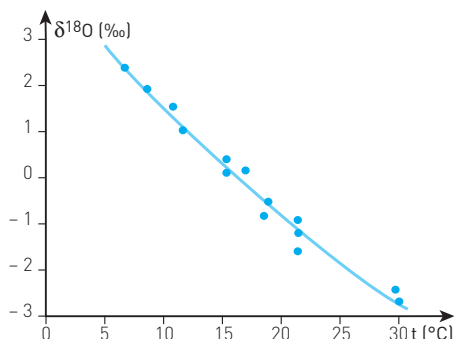
1. Quand la température de l'atmosphère augmente, le  $\delta^{18}\text{O}$  augmente.
2. Quand la température de l'eau de mer augmente, le  $\delta^{18}\text{O}$  augmente.
3. Dans la glace, un  $\delta^{18}\text{O}$  qui passe de -40 à -30 traduit un réchauffement.
4. Il existe une corrélation entre le  $\delta^{18}\text{O}$  et la température.
5. Un  $\delta^{18}\text{O}$  de -20 déterminé dans un échantillon de glace permet de dire que la température de l'air lors de sa formation était proche de 0 °C.

6. Dans un sédiment, un  $\delta^{18}\text{O}$  qui passe de  $-1$  à  $3$  traduit un réchauffement.

Doc 7  $\delta^{18}\text{O}$  des glaces



Doc 8  $\delta^{18}\text{O}$  des carbonates



## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

4

HISTOIRE ET ÉVOLUTION DE LA TERRE  
ET DES ÊTRES VIVANTS

★★ 20 min ▶ P. 347

Le document 9 présente une synthèse des indices, trouvés dans les roches sédimentaires, qui ont permis de reconstituer l'évolution du taux de dioxygène atmosphérique, de  $-4,5$  à  $-1,5$  milliard d'années.

Indiquez quelles sont les propositions exactes.

1. À  $-4$  Ga, les arguments en faveur d'une atmosphère réductrice sont :

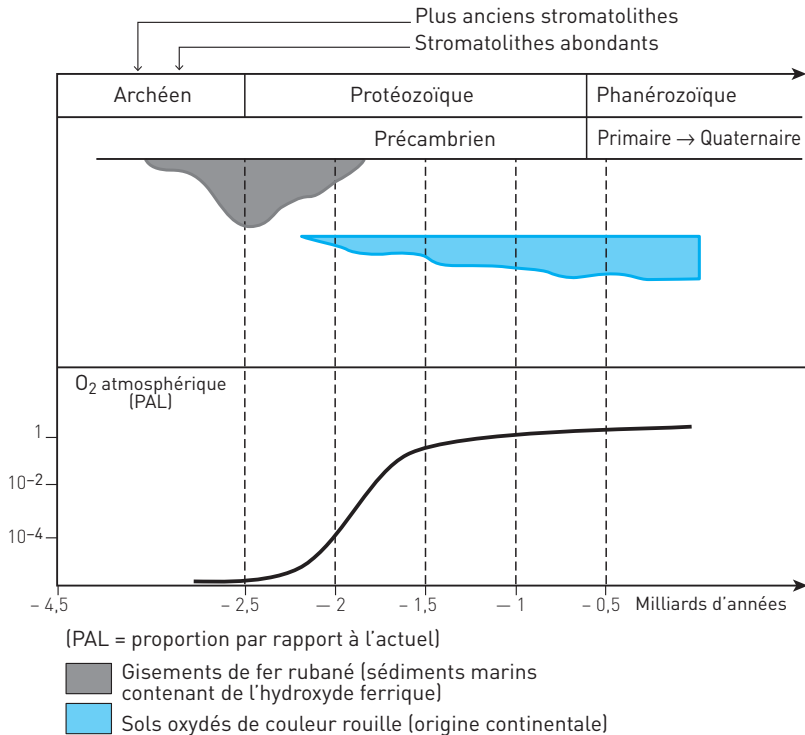
a. l'absence de stromatolithes. b. l'absence de fer à l'état oxydé. c. la présence de fer oxydé dans les océans.

2. À  $-2,5$  Ga :

a. les stromatolithes produisent du dioxygène. b. l'atmosphère est oxydante. c. le dioxygène oxyde le fer réduit des océans. d. le dioxygène oxyde le fer des sols.

3. La présence de dioxygène dans l'atmosphère est prouvée par :
- l'apparition des stromatolithes.
  - l'apparition des fers rubanés.
  - l'apparition des sols oxydés.
4. Le retard entre la production de dioxygène et son accumulation dans l'atmosphère s'explique par :
- la faible quantité de stromatolithes.
  - l'oxydation du fer réduit des océans.
  - l'oxydation des sols.

### Doc 9 Variations du taux d'oxygène atmosphérique



### 5 ATMOSPHÈRE PRIMITIVE

★★ 20 min ► P. 347

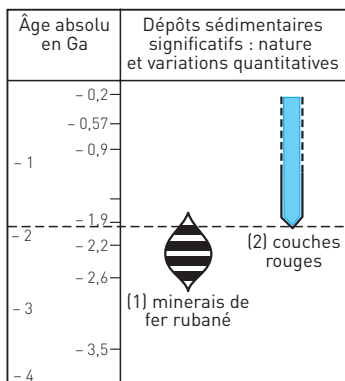
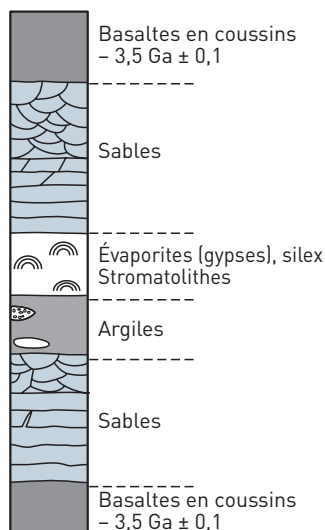
De nombreux indices géologiques font penser que la composition actuelle de l'atmosphère terrestre résulte d'une évolution à partir d'une atmosphère primitive de composition différente.

À l'aide des informations tirées des deux documents et de vos connaissances, indiquez quelles sont les **principales transformations de la composition de l'atmosphère au cours du temps**.

**Doc 10 Distribution dans le temps**

(1) Les minerais de fers rubanés sont formés par l'alternance de rubans rouges d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et de fer réduit ( $\text{Fe}_2\text{S}$ ).

(2) Les couches rouges sont observées sur tous les continents. Il s'agit de roches colorées par de l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

**Doc 11 Gisement de North Pole (Australie)**

**Diviser** : étudier séparément les deux documents.

Utiliser le document 10 pour reconstituer puis expliquer la chronologie d'apparition des oxydes, puis l'expliquer avec vos connaissances.

Utiliser le document 11 pour expliquer l'origine de ce dioxygène.

**Repère de savoir.** Voir le **paragraphe I**.

**6 POLLENS**

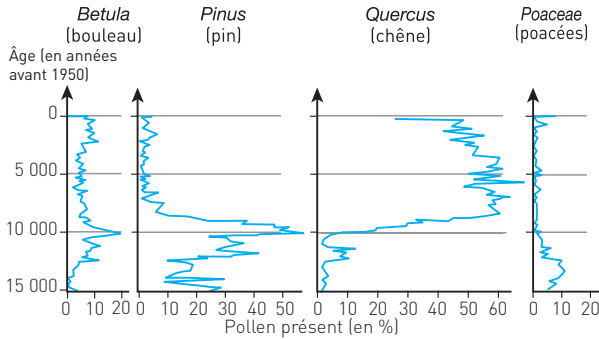
★★ 20 min ▶ P. 348

Montrez que les variations du contenu en pollens des couches déposées à Rogers Lake peuvent être utilisées pour une reconstitution du climat des 15 000 dernières années.

**Doc 12 Préférence de quelques végétaux actuels**

		Végétaux actuels	Plantes herbacées				Arbres				
			Poacées	Armoise	Chénopodes	Bruyère	Pin	Bouleau	Saute	Aulne	Chêne
Préférences											
Température	Très froide (< - 10 °C)		+								
	Froide (- 10 à + 5 °C)	+	+	+	+	+	+				
	Tempérée (+ 3 à + 18 °C)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

### Doc 13 Les pollens de Rogers Lake (États-Unis)



Commencer par identifier la relation actuelle entre un végétal et un climat, puis utiliser ces informations pour reconstituer les climats passés. Une aide détaillée est proposée avec la correction.

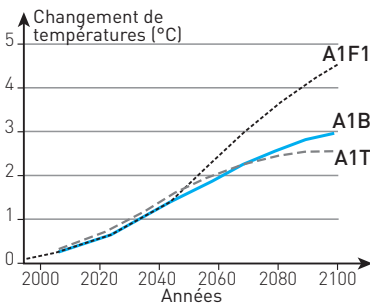
## 7 LES CLIMATS DU FUTUR

★★ 30 min ► p. 349

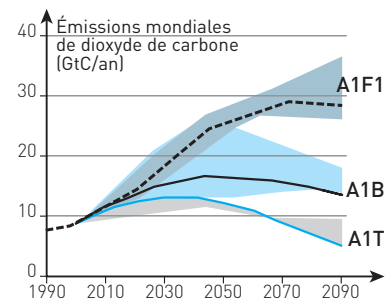
La famille de scénarios A1 élaborés en 2000 par le GIEC (Groupe intergouvernemental des experts du climat) décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, les différences régionales dans le revenu par habitant seront réduites. Les trois groupes A1 se distinguent par leur accent technologique : forte intensité de combustibles fossiles (A1FI), sources d'énergie autres que fossiles (A1T) et équilibre entre les sources (A1B).

La simulation de ces scénarios décrit les évolutions possibles de l'augmentation de la température globale (**document 14**) et des émissions en dioxyde de carbone (**document 15**).

### Doc 14 Température globale



### Doc 15 Émissions de dioxyde de carbone



Indiquez quelles sont les propositions exactes.

1. La simulation des scénarios A1 n'est destinée à étudier que l'impact des énergies fossiles sur le réchauffement climatique.



2. Comparés à 2010, seuls les scénarios A1B et A1T permettent de diminuer les émissions en CO<sub>2</sub>.
3. Les données issues du scénario A1T sont contradictoires : la température globale augmente alors que les émissions diminuent.
4. Le scénario A1T montre que la stabilisation de la température à l'horizon 2100 ne dépend que du changement des combustibles fossiles vers des énergies zéro carbone.
5. Le scénario A1T montre que l'effet de serre provoqué par les émissions de CO<sub>2</sub> est responsable de l'augmentation de la température globale.

## EXERCICES D'APPROFONDISSEMENT

### 8 ÉVOLUTION DU CLIMAT AU CARBONIFÈRE ★★★ 30 min ▶ P. 349

Plusieurs indices montrent un refroidissement du climat à la fin du Carbonifère (– 360 à – 295 millions d'années).

**À l'aide des informations extraites des trois documents, mises en relation avec vos connaissances, dégagez de manière raisonnée deux des facteurs qui ont contribué à ce refroidissement global.**

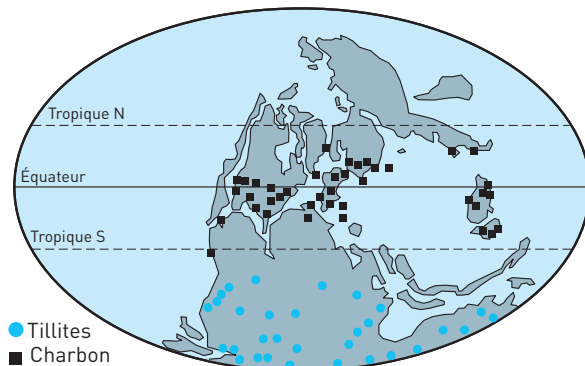
#### Doc 16 Tillites et charbon

Une **tillite** est l'équivalent des moraines glaciaires, c'est-à-dire l'accumulation de débris de roches qui sont entraînés puis abandonnés par les glaciers.

Le **charbon** se forme par sédimentation, puis fossilisation de la matière organique produite par les végétaux chlorophylliens.

71 % des réserves de charbon mondiales ont été formées au Carbonifère.

#### Doc 17 Localisation de tillites et de charbons au Carbonifère



**Doc 18 Valeur de l'albédo de différentes surfaces du globe**

Nature de la surface	Albédo
Neige	Supérieur à 0,9
Glaces de mer	0,6 à 0,8
Végétation	0,1 à 0,25

**Diviser** : étudier séparément les informations apportées par la présence de charbon et celles apportées par les tillites...  
Une aide détaillée est proposée avec la correction.

## 9 VARIATIONS DES PARAMÈTRES ORBITAUX DE LA TERRE

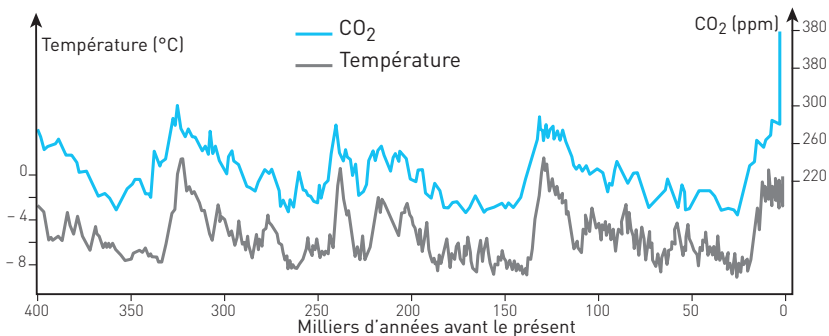
★★★ 40 min ▶ p. 350

Au cours des 500 000 dernières années, le climat a connu des variations qui ont été corrélées avec les changements cycliques des paramètres orbitaux de la Terre. Mais les petites variations de température provoquées par ces causes astronomiques ont été amplifiées par des facteurs terrestres.

1. Quels arguments peuvent montrer que les **variations du climat** sont la conséquence des **variations des paramètres orbitaux de la Terre** ?
2. À partir des informations tirées des documents ci-dessous mises en relation avec vos connaissances, **expliquez le ou les phénomènes** à l'origine de cette **amplification des variations de température**.

**Doc 19 Analyse de carottes de glace**

L'analyse des carottes de glace réalisées à Vostok (Antarctique) a permis de retracer l'évolution de la température et de la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.

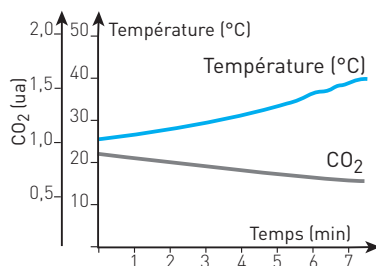
**Doc 20 Effet de serre**

« L'effet de serre » est dû à la présence de gaz à effet de serre (GES) contenus dans l'atmosphère. Une partie du rayonnement solaire traverse l'atmosphère et atteint le sol, qui en retour émet un rayonnement thermique qui, lui, est absorbé par les GES, ce qui réchauffe l'atmosphère, qui elle-même réchauffe le sol.

Contributions approximatives à l'effet de serre des principaux gaz : vapeur d'eau : 60 % ; CO<sub>2</sub> : 26 % ; ozone : 8 % ; méthane et oxyde nitreux : 6 %.

**Doc 21 Une expérience**

De l'eau est chauffée. La température de l'eau et la concentration en  $\text{CO}_2$  sont mesurés à intervalles réguliers.



Ce sujet comporte deux questions :

1. Argumenter en faveur d'une origine astronomique des variations du climat ;
2. Expliquer le rôle du  $\text{CO}_2$  dans l'amplification des variations de température provoquées par les variations des paramètres orbitaux.

Une aide détaillée pour la deuxième question est proposée avec la correction.

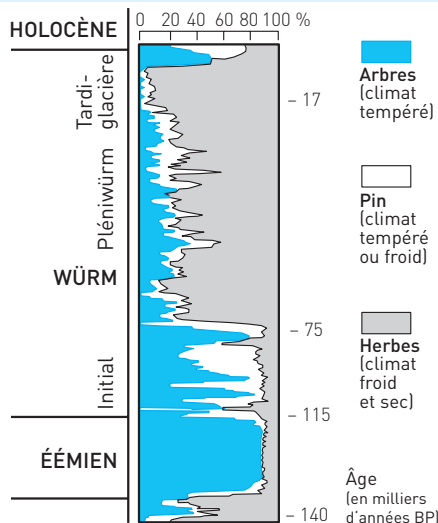
**CONTRÔLE****10**

**CORRÉLATION ENTRE LA TENEUR EN  $\text{CO}_2$   
DE L'ATMOSPÈRE ET LE CLIMAT**

★★ 45 min ▶ P. 351

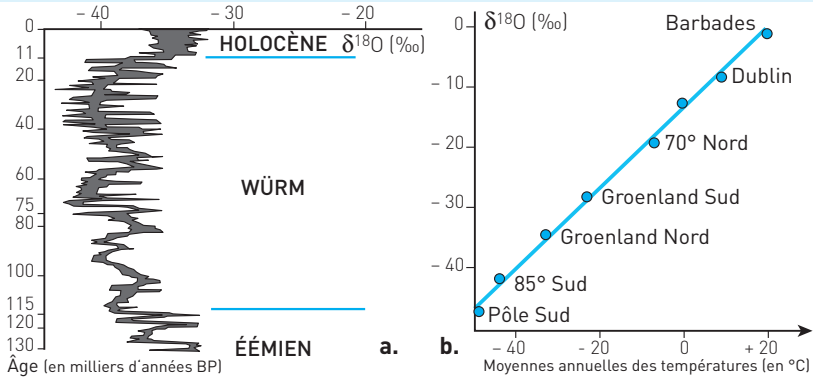
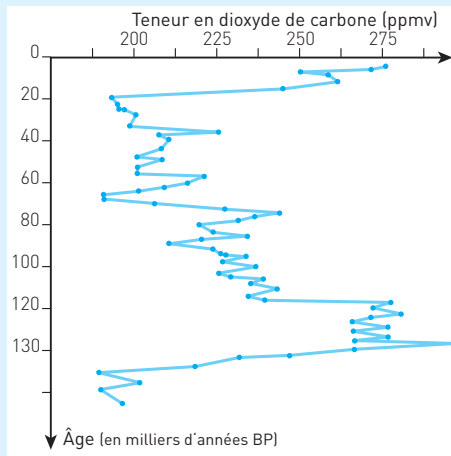
La Terre a connu d'importants changements climatiques. Des périodes froides marquées par la formation de calottes glaciaires ont alterné avec des périodes chaudes. À partir des **documents 22 à 24**, montrez que les variations climatiques des 130 000 dernières années peuvent être corrélées aux **variations de la teneur en  $\text{CO}_2$  atmosphérique**, puis à l'aide de vos connaissances, **proposez une explication à cette corrélation**.

**Doc 22 Diagramme pollinique simplifié du site de la Grande Pile (Vosges)**



**Doc 23 Variations du  $\delta^{18}\text{O}$  des glaces**

- a. Évolution du  $\delta^{18}\text{O}$  dans les carottes de glace GRIP du Groenland.  
 b.  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux et des glaces de différentes localités en fonction des moyennes annuelles des températures.

**Doc 24 Teneur en  $\text{CO}_2$  déduite de l'analyse d'une carotte de glace de la station Vostok (Antarctique)**

Ce sujet pose de manière implicite trois questions qui vont structurer l'investigation.

1. Identifier les variations climatiques à l'aide des données polliniques et du  $\delta^{18}\text{O}$  des glaces.
2. Établir une corrélation entre climat et dioxyde de carbone.
3. Expliquer cette corrélation à l'aide de vos connaissances.

## CORRIGÉS

13

**1** **Ordre chronologique :**

1. Atmosphère réductrice (absence d'O<sub>2</sub>).
2. Apparition des stromatolithes (microorganismes photosynthétiques qui ont libéré de l'O<sub>2</sub> dans les océans).
3. Formation de fers rubanés dans les océans.
4. Atmosphère oxydante (quand il n'y a plus eu de fer à oxyder dans les océans).
5. Formations des couches rouges terrestres.
6. Accumulation d'O<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

**2** 1. a. Vrai. b. Vrai. c. Faux. d. Vrai, car la température agit sur la dissolution (plus importante lorsque la température baisse) et le dégazage des océans (qui augmente avec la température). e. Vrai. f. Vrai. g. Vrai.

2. a. Vrai, la neige réfléchit au moins 90 % de la lumière incidente (albédo = 0,8).  
 b. Faux, l'albédo d'un sol recouvert de végétation est voisin de 0,3. c. Faux, un refroidissement : la lumière qui était absorbée par le sol et convertie en énergie thermique est maintenant réfléchi. d. Vrai. e. Faux.

**3** 1. Vrai. 2. Faux. 3. Vrai. 4. Vrai. 5. Faux : elle était voisine de - 10 °C. 6. Faux, un refroidissement.

**4** 1. a. Faux, le dioxygène produit par les stromatolithes a dans un premier temps oxydé le fer à l'état ferreux des océans. b. Vrai. c. Faux, il y a du fer à l'état oxydé dans les océans vers - 2,5 Ga alors que l'atmosphère ne contient presque pas de dioxygène.

2. a. Vrai. b. Faux. c. Vrai. d. Faux (très peu d'O<sub>2</sub> dans l'atmosphère).  
 3. a et b. Faux : l'O<sub>2</sub> produit par les premiers stromatolithes a été consommé pour oxyder le fer réduit des océans. c. Vrai.  
 4. a. Vrai. b. Vrai. c. Vrai.

**5** • **Étude du document 10 : distribution des oxydes de fer**

**Analyse :** À partir de - 2,6 Ga se forment dans les océans des fers rubanés, alternance de lits de fer oxydé (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et de fer réduit (FeS).

Vers - 2 Ga, la disparition des fers rubanés dans les océans coïncide avec l'apparition sur les continents des couches rouges colorées par l'oxyde de fer.

**Interprétation :** Dans les océans, avant - 2,6 Ga, le fer se trouve à l'état réduit.

À partir de - 2,6 Ga, la présence de dioxygène dans les océans provoque la formation d'oxyde de fer.

Vers - 2 Ga, tout le fer réduit des océans est oxydé. Le dioxygène présent dans les océans s'échappe dans l'atmosphère qui devient oxydante : le fer réduit présent dans les sols est alors oxydé.

● **Étude du document 11 : gisement North Pole**

**Analyse :** Le gisement de North Pole montre la présence de fossiles de stromatolithes, intercalés entre des coulées de basaltes datées de  $-3,5$  Ga.

**Interprétation :** Les stromatolithes sont des formations calcaires construites par des bactéries photosynthétiques.

La photosynthèse apparaît vers  $-3,5$  Ga, elle produit du dioxygène.

**Bilan**

L'apparition de la photosynthèse vers  $-3,5$  Ga produit du dioxygène qui oxyde le fer réduit des océans. Vers  $-2$  Ga, quand tout le fer réduit des océans est oxydé, le dioxygène est libéré dans l'atmosphère qui devient oxydante.

6

**Diviser.** Faire deux études séparées :

1. relation actuelle entre un végétal et un climat : **rassembler** les végétaux ayant les mêmes préférences, **comparer** les groupes obtenus pour **lier** végétaux et climats ;

2. reconstitution des climats passés. **Découper** le graphique en trois périodes.

**Interprétation.** Reconstituer l'histoire du climat à l'aide des informations dégagées de la première étude.

● **Étude du document 12 : préférence de quelques végétaux actuels**

**Analyse**

Les données actuelles montrent que parmi les arbres qui vivent en zone tempérée, certains ne vivent pas dans un milieu où la température est froide : saule, aulne et chêne alors que d'autres peuvent y vivre : pin et bouleau.

Dans un milieu très froid ne vivent que des poacées.

**Conclusion :** L'absence d'arbres et la présence de poacées traduisent un climat très froid. La présence de pins et de bouleaux et l'absence d'autres espèces d'arbres traduit un climat froid. La présence de saule, chêne et aulne traduit un climat tempéré.

● **Étude du document 13 : pollens de Rogers Lake**

**Analyse**

La répartition temporelle des pollens de Rogers Lake montre trois grandes périodes :

– de  $-15\ 000$  à  $-12\ 000$  ans, les pollens d'arbres sont peu abondants. Les pollens les plus abondants sont ceux des poacées ;

– de  $-12\ 000$  à  $-8\ 000$  ans, le pourcentage des pollens de pin et de bouleau augmente ;

– de  $-9\ 000$  à aujourd'hui, dominent les pollens de chêne.

**Conclusion :** En appliquant le principe des causes actuelles (les espèces végétales qui vivaient autrefois avaient les mêmes préférences climatiques que celles qui vivent aujourd'hui), trois périodes climatiques peuvent être reconstituées en Amérique du Nord :

- climat très froid entre – 15 000 et – 12 000 ans ;
- climat froid entre – 12 000 et – 9 000 ans : amorce de réchauffement ;
- climat tempéré entre – 8 000 ans et aujourd'hui : le réchauffement se stabilise.

- 7** 1. Vrai, car la nature du combustible est la seule variable entre ces scénarios.  
 2. Faux, si les émissions diminuent de moitié avec le scénario A1T, elles passent de 10 à 15 GtC/an avec le scénario A1B.  
 3. Faux, le graphique ne montre pas le taux atmosphérique en CO<sub>2</sub> mais les émissions, donc la quantité qui est rejetée dans l'air.  
 4. Faux, si ces scénarios diffèrent par la nature des sources d'énergie, ils partagent d'autres facteurs qui peuvent aussi intervenir : croissance économique rapide, différences des revenus par habitant réduites, et qui font l'objet d'autres simulations.  
 5. Vrai.

**8**

**Diviser.** Étudier séparément les informations apportées par la présence de charbon et celles apportées par les tillites.

1. Étude des dépôts de charbon
  - Analyse : **Lier** la localisation des charbons et leurs conditions de formation et le CO<sub>2</sub>.
  - Interprétation : Repère de connaissance : CO<sub>2</sub> et effet de serre (paragraphe I).
2. Étude des dépôts de tillites
  - Analyse : **Lier** la localisation des tillites, leur origine et l'albédo.
  - Interprétation : Repère de connaissance : albédo et température (paragraphe I).

Les indices géologiques datés du Carbonifère permettent d'identifier deux facteurs responsables du refroidissement global du climat observé à la fin du Carbonifère. Quels sont ces facteurs ? Comment expliquer ce refroidissement ?

• **Informations apportées par la présence des charbons**

**Étude des documents 16 et 17**

**Analyse :** Les charbons sont issus de la sédimentation et de la fossilisation de végétaux. Les charbons datés du Carbonifère sont localisés sur la plupart des continents qui étaient à cette époque situés au niveau de l'équateur.

**Interprétation :** Pour former sa matière organique, le végétal chlorophyllien puise du CO<sub>2</sub> dans l'air. L'enfouissement et la transformation de cette matière organique en charbon ne restituent pas le CO<sub>2</sub> à l'atmosphère.

L'importance des dépôts datés du Carbonifère s'est traduite par une baisse importante du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, ce qui a diminué l'effet de serre et donc la température.

- **Informations apportés par les tillites**

#### Étude des documents 16 et 17

**Analyse :** Les tillites sont des témoins de la présence de glaciers. Au Carbonifère, elles sont localisées sur des continents qui se trouvaient entre le pôle et les tropiques, même assez proches du tropique au sud.

**Interprétation :** La répartition des tillites permet de mesurer l'importance de la surface occupée par les glaces aux deux pôles.

#### Étude du document 18

**Analyse :** L'albédo de la neige et de la glace ( $> 0,6$ ) est beaucoup plus élevé que celui d'un sol recouvert de végétation ( $< 0,3$ ).

**Interprétation :** Un sol avec de la végétation qui est recouvert de neige voit son albédo passer de 0,3 à 0,9 : avec la neige, 90 % de l'énergie solaire est réfléchi.

En réfléchissant le quasi-totalité de l'énergie solaire, la neige accentue la baisse de la température.

#### Bilan

La formation des charbons au Carbonifère a entraîné une baisse de la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$ , ce qui a provoqué une baisse de la température globale par diminution de l'effet de serre.

Cette baisse de la température a provoqué une augmentation de la surface recouverte par la neige et la glace. L'augmentation de l'albédo de ces surfaces a augmenté le refroidissement.

9

Pour identifier les phénomènes qui amplifient les variations :

- utiliser le document 19 pour **comparer** les évolutions de la température et de la concentration en  $\text{CO}_2$  et identifier une **corrélation** entre leurs évolutions.
- utiliser les deux autres documents pour préciser les **relations de causalité** entre ces deux paramètres.

- **Arguments en faveur d'une origine astronomique : document 19**

**Analyse :** Les paramètres orbitaux de la Terre changent de manière cyclique. Or, on observe une variation cyclique du climat : tous les 100 000 ans environ se produit réchauffement climatique qui se traduit par une augmentation assez rapide de la température qui passe de  $-7\text{ °C}$  à  $+1\text{ °C}$  en moyenne, avant de descendre à nouveau de façon irrégulière pendant 90 000 ans.

- **Identification des phénomènes qui amplifient les variations**

– *Étude des évolutions passées de la température et du  $\text{CO}_2$*  : document 19

**Analyse :** Au cours des 500 000 dernières années, la température varie de manière cyclique. Ces variations de température peuvent être corrélées avec les variations de la concentration en dioxyde de carbone, ces deux paramètres évoluent toujours dans le même sens et de manière quasi synchrone (lors des périodes de réchauffement, le taux de  $\text{CO}_2$  est de 280 ppm, lors des périodes glaciaires, il peut atteindre 200 ppm).



**Conclusion :** Il existe donc une relation de cause à conséquence entre ces deux paramètres qu'il convient de préciser. L'aspect synchrone des variations ne permet pas de préciser cette relation.

– *Étude des relations entre CO<sub>2</sub> et température : documents 20 et 21*

**Analyse :** Le CO<sub>2</sub> est un gaz à effet de serre : une augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> provoque une augmentation de la température.

Quand la température de l'eau augmente, sa concentration en CO<sub>2</sub> diminue.

**Interprétation :** Le CO<sub>2</sub> présent à l'état dissous forme du gaz qui s'échappe dans l'atmosphère. Une augmentation de la température des océans est la cause du dégazage de CO<sub>2</sub>, ce qui provoque l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère.

### Bilan

Deux cas peuvent être distingués.

1. Les variations des paramètres orbitaux de la Terre provoquent une augmentation de la température du globe. L'eau des océans ainsi chauffée libère du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Cette augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère augmente sa température par effet de serre, ce qui augmente le dégazage... Le phénomène s'amplifie.
2. Les variations des paramètres orbitaux de la Terre provoquent une diminution de la température du globe. L'eau des océans est refroidie et dissout du CO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère, ce qui diminue l'effet de serre et donc la température... Là aussi le phénomène s'amplifie.

**10** Le climat de la Terre a beaucoup changé au cours des 130 000 dernières années, des périodes froides ont alterné avec des périodes chaudes. Quelles sont les données qui permettent de montrer l'existence pour cette période d'une corrélation entre variations de température et variations de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique ? Comment expliquer cette corrélation ?

## I. Reconstitution des climats

### Étude du document 22 : diagramme pollinique du site de la Grande Pile

#### Analyse

La répartition des pollens permet de distinguer quatre grandes périodes :

- entre – 135 000 ans et – 115 000 ans, les pollens d'arbres dominant ;
- entre – 115 000 ans et – 75 000 ans, le pourcentage des pollens d'arbres diminue, celui des pins augmente ;
- entre – 75 000 ans et – 10 000 ans, les pollens d'herbes dominant ;
- entre – 10 000 ans et aujourd'hui, les pollens d'arbres dominant.

#### Interprétation

Aujourd'hui, la présence d'herbes caractérise un climat froid et sec, les arbres caractérisent un climat tempéré. Les pollens de pins caractérisent l'un ou l'autre. Ces relations entre climat et végétation permettent de reconstituer les climats du passé :

- avant – 135 000 ans : climat froid ;
- entre – 135 000 ans et – 115 000 ans : climat chaud ;
- entre – 115 000 ans et – 10 000 ans : refroidissement, puis climat froid ;
- entre – 10 000 et aujourd'hui : climat chaud.

## Mise en relation des documents 23 et 24 : données fournies par les glaces

### Analyse

Les variations du  $\delta^{18}\text{O}$  dans la carotte GRIP permettent de distinguer trois périodes :

- entre – 130 000 ans et – 115 000 ans :  $\delta^{18}\text{O}$  voisin de – 35 ‰ ;
- entre – 115 000 et – 10 000 :  $\delta^{18}\text{O}$  voisin de – 40 ‰ ;
- entre – 10 000 et aujourd’hui :  $\delta^{18}\text{O}$  voisin de – 35 ‰.

Le **document 24** montre qu’un  $\delta^{18}\text{O}$  de – 40 ‰ représente aujourd’hui une température de – 40 °C tandis qu’un  $\delta^{18}\text{O}$  de – 35 ‰ représente une température de – 30 °C.

### Interprétation

Ces variations du  $\delta^{18}\text{O}$  permettent de reconstituer les changements du climat :

- avant – 115 000 ans : climat chaud ;
- entre – 115 000 ans et – 10 000 ans, climat froid.
- de – 10 000 ans à aujourd’hui, climat chaud.

### Bilan

Les données polliniques des Vosges et le  $\delta^{18}\text{O}$  des glaces du Groenland donnent des indications climatiques concordantes. Les variations climatiques affectent l’ensemble du globe.

## II. Corrélation entre climat et teneur en $\text{CO}_2$ atmosphérique (documents 22, 23 et 24)

**Analyse :** La période froide identifiée entre – 115 000 et – 10 000 ans correspond à la période où la teneur en  $\text{CO}_2$  est la plus faible.

Les périodes chaudes, entre – 10 000 ans et aujourd’hui, et avant – 115 000 ans correspondent à des périodes où la teneur en  $\text{CO}_2$  est plus élevée.

**Conclusion :** Il existe bien une corrélation entre climat froid et faible teneur en  $\text{CO}_2$ , climat chaud et forte teneur en  $\text{CO}_2$ .

## III. Comment expliquer cette corrélation ?

Le  $\text{CO}_2$  est un gaz à effet de serre. L’augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$  augmente l’effet de serre, ce qui provoque une augmentation de la température, qui entraîne à son tour une augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$ . La baisse de la teneur en  $\text{CO}_2$  diminue l’effet de serre, ce qui provoque la baisse de la température, et une dissolution plus forte du  $\text{CO}_2$  atmosphérique dans les eaux océaniques et continentales.

Les variations de la température et du  $\text{CO}_2$  atmosphérique créent une boucle de rétroaction qui amplifie la variation de la température initiale.

## 14

# Glycémie et diabète

**T**héo, 25 ans, est atteint d'un diabète de type 1, comme 150 000 personnes en France. En fin de matinée ou d'après-midi, il sait reconnaître les symptômes de l'hypoglycémie (sueurs, tremblements, très grande faim), il connaît le remède, prendre trois sucres. Après un repas, si ses injections d'insuline ont été mal calculées, il risque de faire une crise d'hyperglycémie (soif intense, élimination importante d'urine). Pour Théo, manger, faire du sport, tout doit être prévu chaque matin dans les calculs de ses doses d'insuline...

## I LA RÉGULATION DE LA GLYCÉMIE : UNE NÉCESSITÉ

La glycémie désigne la concentration du glucose dans le sang.

### 1. Le glucose est utilisé pour produire de l'énergie

Le glucose est principalement utilisé dans le métabolisme énergétique : respiration ou fermentation (chapitre 12). Les **cellules gluco-indépendantes** peuvent aussi utiliser d'autres molécules pour leur métabolisme énergétique : acides gras, acides aminés... Les **cellules gluco-dépendantes** comme les cellules nerveuses ne peuvent utiliser que le glucose, ce qui explique les comas observés lors de glycémies extrêmes.

### 2. La glycémie est maintenue autour d'une valeur moyenne de 1 g/L

L'alimentation constitue la principale source de glucose. La digestion va donc augmenter la glycémie. Entre les repas, les cellules puisent du glucose dans le sang, ce qui diminue la glycémie.

La glycémie est un paramètre régulé. Une glycémie normale varie au cours de la journée dans un intervalle [0,7-1,2]. À jeun, elle doit être inférieure à 1,1 g/L.

Chez un diabétique, la glycémie sort de l'intervalle [0,7-1,2] plusieurs fois par jour. Un repas est suivi par une **hyperglycémie** (glycémie > 1,26 g/L). Entre les repas ou après un effort se produit une **hypoglycémie** (glycémie < 0,7 g/L).

#### L'essentiel

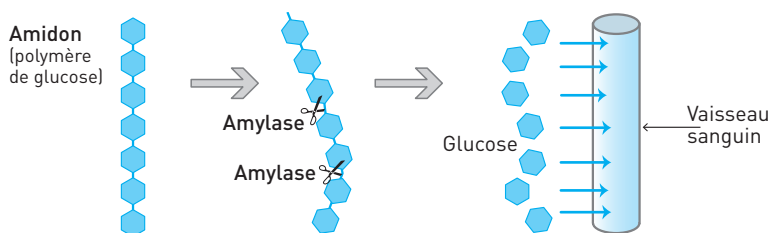
La glycémie est un paramètre régulé. Les variations minimales de la concentration en glucose dans le sang se font autour de 1 g/L. Les variations importantes de la glycémie, notamment une hyperglycémie après un repas, caractérisent le diabète...

## II ALIMENTATION, DIGESTION ET GLUCOSE

### 1 De l'aliment au nutriment sanguin

- **Aliments.** À l'échelle moléculaire, les aliments contiennent de petites molécules (eau, glucose...) et de grosses molécules (amidon, protéines, lipides...).
- **Digestion.** Les enzymes digestives catalysent l'hydrolyse des macromolécules des aliments en molécules simples ou nutriments. L'hydrolyse de l'amidon (qui est un polymère de glucose) produit du glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ). Le glucose apporté par les aliments comme les fruits n'est pas transformé.
- **Absorption intestinale.** Les nutriments traversent la paroi de l'intestin pour passer dans le sang.

#### Doc 1 Digestion de l'amidon et absorption du glucose



### 2. Les enzymes digestives catalysent les transformations chimiques des aliments

#### ■ Une enzyme, un catalyseur spécifique

Les enzymes sont des protéines qui accélèrent les réactions chimiques : ce sont des **catalyseurs**. Une enzyme n'est pas détruite lors de la catalyse.

**Spécificité de substrat :** Le substrat désigne la molécule spécifique sur laquelle agit l'enzyme. Une enzyme n'agit que sur un substrat (une amylase agit sur l'amidon, une protéase agit sur une protéine, une lipase agit sur un lipide).

**Spécificité d'action :** Les enzymes digestives permettent la coupure des liaisons, ce sont des « ciseaux moléculaires ». Pour le chimiste c'est une hydrolyse.

#### ■ Le nom d'une enzyme est construit pour décrire sa fonction

Le nom de l'enzyme est formé du nom du substrat suivi du nom de l'action sur le substrat (si c'est une hydrolyse, on ne met rien). Le terme se termine toujours par « **ase** ».

**EXEMPLES :** L'amylase est l'enzyme qui hydrolyse l'amidon ; l'ATP synthétase est l'enzyme qui catalyse la synthèse de l'ATP.

#### L'essentiel

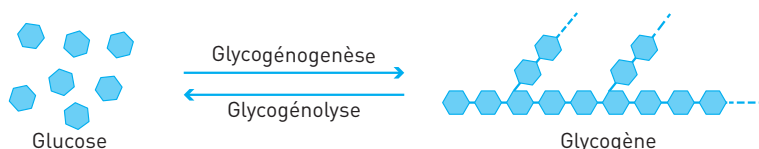
Les enzymes digestives transforment l'amidon apporté par les féculents en glucose. Cette petite molécule traverse la paroi de l'intestin et passe dans le sang.

### III RÉGULATION DE LA GLYCÉMIE

#### 1. Corriger la glycémie : mécanismes et organes effecteurs

■ Les cellules du foie et les cellules musculaires prélèvent le glucose sanguin et le polymérisent pour former du glycogène (75 à 100 g pour le foie, 300 à 500 g pour les muscles). Cette **glycogénogenèse** corrige une hyperglycémie. La **glycogénolyse** est la réaction inverse de la glycogénogenèse. Elle se produit dans les cellules du foie et des muscles, mais seules les cellules du foie peuvent libérer dans le sang le glucose issu de la glycogénolyse. Cette réaction corrige une hypoglycémie.

#### Doc 2 Stockage et déstockage du glucose



#### ■ Épargner le glucose

Les cellules gluco-indépendantes peuvent changer de « carburant » et utiliser des acides gras pour la respiration et la fermentation, lors d'une hypoglycémie.

#### ■ Néoglucogenèse : produire et libérer du glucose

Les cellules du foie peuvent produire du glucose à partir d'autres biomolécules (acides aminés, glycérol). Cette **néoglucogenèse** assure l'approvisionnement en glucose des cellules gluco-dépendantes quand les réserves hépatiques en glycogène sont faibles.

#### ■ Lipogénèse : stocker

Les cellules du foie et les cellules adipeuses peuvent aussi transformer en lipides le glucose en excès : c'est la **lipogénèse**.

#### L'essentiel

Après un repas, le foie et les muscles importent le glucose et le transforment en glycogène par glycogénogenèse. En période de jeûne, seul le foie peut libérer du glucose dans le sang, par glycogénolyse ou néoglucogenèse.

#### 2. Système de régulation de la glycémie

#### ■ Le pancréas mesure la glycémie et produit des hormones pour la corriger.

La coordination des métabolismes correcteurs de la glycémie, présentés dans le paragraphe précédent, est assurée par le pancréas. Cet organe mesure la glycémie et produit des **hormones**, messagers chimiques qui circulent par voie sanguine et agissent sur des organes cibles.

■ Une **hyperglycémie** stimule les cellules  $\beta$  du pancréas qui répondent par la libération d'**insuline**. Cette hormone stimule les organes cibles et les mécanismes qui corrigent une hyperglycémie : glycogénogenèse, augmentation de la consommation de glucose, lipogenèse.

■ Une **hypoglycémie** stimule les cellules  $\alpha$  du pancréas qui répondent par la libération de **glucagon**. Cette hormone stimule les organes cibles et les mécanismes qui corrigent une hypoglycémie : glycogénolyse, épargne du glucose, néoglucogenèse.

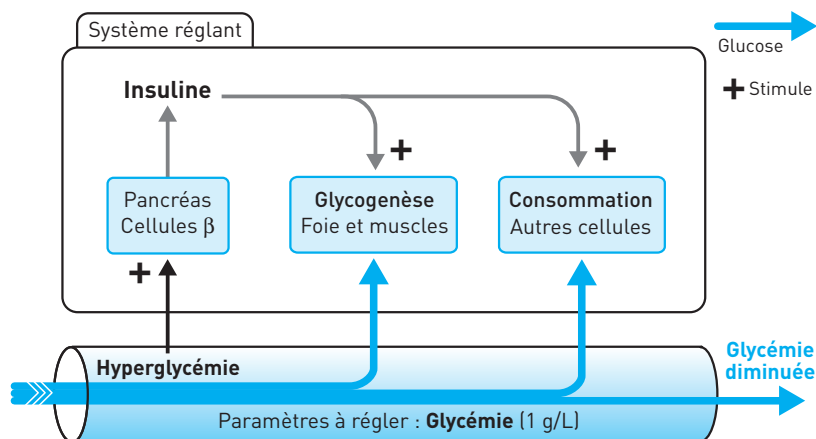
### ■ Fonctionnement du système de régulation de la glycémie

Le **paramètre réglé** est la glycémie qui doit être maintenue autour de 1 g/L.

Le **système régulateur** comprend :

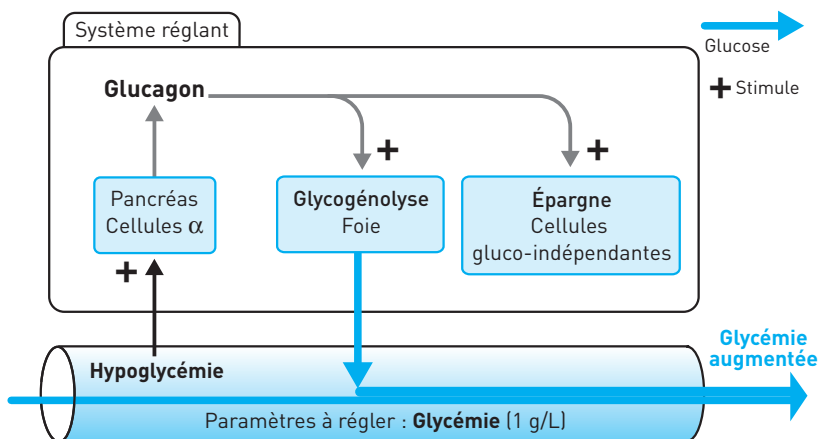
- des **capteurs**, les cellules  $\alpha$  et  $\beta$  du pancréas, qui détectent les variations de glycémie par rapport à la valeur consigne (1 g/L) et répondent en libérant des hormones ;
- un mode de communication, le sang qui véhicule les **hormones** ;
- des **effecteurs** – foie, muscles et autres cellules – qui corrigent la glycémie.

### Doc 3 Réponse du système de régulation lors d'une hyperglycémie



#### L'essentiel

Une hyperglycémie stimule la production d'insuline par les cellules  $\beta$  du pancréas. L'insuline stimule l'importation de glucose et la glycogénogenèse.

**Doc 4 Réponse du système de régulation lors d'une hypoglycémie****L'essentiel**

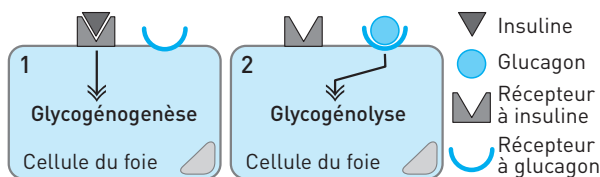
Une hypoglycémie stimule la production de glucagon par les cellules  $\alpha$  du pancréas. Le glucagon stimule la glycogénolyse et l'épargne de glucose par les cellules gluco-indépendantes.

**3. Approfondissement****■ Demi-vie des hormones**

Les hormones ont une durée de vie limitée dans le temps, elles sont en permanence détruites. La demi-vie de l'insuline, comme celle du glucagon est de 6 min (temps après lequel il ne reste que la moitié des hormones).

**■ Hormone, récepteur hormonal et métabolisme**

Toute communication entre cellules implique l'existence de molécules réceptrices sur les cellules cibles, un récepteur est spécifique à une hormone (**doc. 5**). Dans une cellule du foie, la fixation de l'insuline sur son récepteur active les réactions de la glycogénogénèse (1), alors que la fixation du glucagon sur son récepteur active les réactions de la glycogénolyse (2).

**Doc 5 Une hormone se fixe sur son récepteur spécifique**

## IV LE DIABÈTE

### 1. Dépistage du diabète

Mesurée à jeun, la glycémie d'un diabétique est supérieure à 1,26 g/L.

La présence de glucose dans les urines traduit une glycémie supérieure à 1,7 g/L.

### 2. Le diabète de type 1, ou diabète insulino-dépendant (DID)

■ **Dépistage.** Le diabète de type 1 survient brutalement à n'importe quel âge, souvent après une maladie. Les symptômes sont nets (voir le **paragraphe I**). Le diabète de type 1 est provoqué par une production insuffisante d'insuline.

■ **Cause.** Les cellules  $\beta$  du pancréas sont détruites, le plus souvent par le système immunitaire du diabétique (maladie auto-immune).

■ **Conséquences.** Les cellules  $\alpha$  se multiplient et la production de glucagon augmente. L'organisme se trouve en permanence sous l'effet de cette hormone qui commande le déstockage du glucose...

■ **Traitement.** Il consiste à injecter de l'insuline dont il faut adapter la quantité à la glycémie mesurée, à l'activité prévue, au repas en cours... C'est un diabète insulino-dépendant (DID).

### 3. Le diabète de type 2, ou non insulino-dépendant (NDID)

■ **Dépistage.** Ce diabète apparaît souvent après 45-50 ans. Les symptômes sont plus discrets, l'état diabétique est découvert par hasard : un diabétique sur deux s'ignore ! Le diabète de type 2 est provoqué par une régulation moins performante.

■ **Cause.** Les cellules cibles sont peu sensibles et répondent faiblement à l'insuline : elles sont devenues insulino-résistantes. Les cellules  $\beta$  du pancréas produisent moins d'insuline.

■ **Conséquences.** L'organisme se trouve de plus en plus incapable de stocker le glucose, le diabète s'accroît.

■ **Traitement.** Il faut contrôler l'alimentation, et en particulier l'apport de sucres et de féculents... L'injection d'insuline est inutile : c'est un diabète non-insulino-dépendant (NDID).

### 4. Diabète : facteurs génétiques et facteurs environnementaux

Les analyses statistiques concernant le risque diabétique montrent l'intervention de facteurs génétiques et de facteurs environnementaux.

■ **Les facteurs génétiques.** Ils interviennent plus pour le diabète de type 2 que pour le diabète de type 1. Plusieurs gènes sont connus pour leurs implications. Chez les vrais jumeaux, si l'un est atteint de diabète de type 1, l'autre a 50 % de risque d'être atteint, cette proportion atteint 90 % dans le cas d'un type 2.



■ **Les facteurs environnementaux.** Les facteurs environnementaux interviennent donc pour une part non négligeable, mais la liste et leur implication reste mal définie.

Le cas des Indiens Pimas en Arizona illustre la double influence, génétique et environnementale. Dans cette population, le diabète apparaît chez les Pimas atteints d'obésité, celle-ci étant liée à leur sédentarisation. Les Pimas non obèses ne sont pas diabétiques.

#### L'essentiel

Le diabète de type 1, qualifié d'insulinodépendant, est provoqué par une production insuffisante d'insuline. Le diabète de type 2, non insulinodépendant, est provoqué par une insulino-résistance des cellules cibles et/ou une production insuffisante d'insuline.

## SAVOIR-FAIRE

### Vocabulaire

- **Glycémie** : Concentration en glucose dans le sang. Sa valeur normale est voisine de 1 g/L.
- **Diabète** : Qualifie une mauvaise régulation de la glycémie. Se traduit à jeun par une glycémie voisine de 1,3 g/L.
- **Glycogénogenèse** (glycogène + genèse) : Réaction chimique de synthèse d'une molécule de glycogène par polymérisation du glucose.
- **Glycogénolyse** (glycogène + lyse) : Réaction chimique de destruction (lyse) du glycogène en glucose.
- **Néoglucogenèse** (néo + glucose + genèse) : Réaction chimique de synthèse de glucose à partir d'autres molécules organiques (lipides en particulier).
- **Hormone** : Molécule, messenger chimique, qui circule par voie sanguine et agit sur certaines cellules qualifiées de cibles.
- **Insuline** : Hormone produite par les cellules  $\beta$  du pancréas. Elle provoque une baisse de la glycémie (hypoglycémiant).
- **Glucagon** : Hormone produite par les cellules  $\alpha$  du pancréas. Elle provoque une augmentation de la glycémie (hyperglycémiant).

Retrouver la définition par la logique de construction du mot. **Hyperglycémie, hypoglycémie, glycogénogenèse, glycogénolyse, néoglucogenèse.**


EXEMPLE : glycogénogenèse. Glycogéno = glycogène, genèse = qui forme. C'est une réaction qui forme du glycogène, une réaction de synthèse donc.

## Compétences

1. **Être capable de mettre en œuvre les méthodes** de l'annexe « Méthodologie » (*Diviser, Découper, Regrouper, Lier, Comparer, Classer*) dans les différentes études demandées dans les exercices.
2. **Construire un schéma** du système de régulation à partir des documents proposés.

## Repères

1. **Connaître l'intervalle de valeur** pour une glycémie normale [0,7 g/L, 1,3 g/L].
2. **Connaître l'essentiel.** Bien que l'épreuve de spécialité ne soit pas une restitution de connaissances, l'interprétation des documents proposés dans l'exercice nécessite des savoirs de base. L'essentiel apparaît en bas de chaque paragraphe.
3. **Établir un lien** entre activité, repas, hyperglycémie et hypoglycémie ; entre cellule productrice d'hormone, l'hormone produite et son action.

 Astuce mnémotechnique : **BIS** = cellule **B**eta-**I**nsuline-**S**tockage.  
Par déduction, pour le glucagon, cellule alpha et déstockage.

4. **Connaître le schéma du système de régulation** de la glycémie (**doc. 3 et 4**).
5. **Expliquer le diabète de type 1** et le diabète de **type 2**. Savoir que le diabète de type 1 est le DID, qu'il est caractérisé par l'absence totale de sécrétion d'insuline alors que le DNID est associé à des symptômes plus variables, présente différents stades d'évolution et est souvent lié à l'obésité.

## EXERCICES D'APPLICATION

14

**1 VRAI OU FAUX ?**

★ | 10 min | ► P. 371

Relevez les propositions exactes.

**1. Une enzyme :**

- a. accélère les réactions chimiques : c'est un catalyseur.
- b. est détruite lors de la transformation chimique.
- c. n'agit que sur une molécule donnée.

**2. Toutes les enzymes :**

- a. réalisent une hydrolyse.
- b. ont un nom qui se termine par ase.

**3. Si l'ATP synthétase est une enzyme qui catalyse la synthèse de l'ATP, alors :**

- a. l'amylase est une enzyme qui catalyse la synthèse de l'amylose.
- b. le maltose est une enzyme qui catalyse l'hydrolyse de la maltase.
- c. la phosphoglucomutase est une enzyme qui catalyse le déplacement d'un phosphate sur le glucose.
- d. une protéase est une enzyme qui catalyse l'hydrolyse d'un lipide.

**4. Une hormone :**

- a. est une enzyme produite par le pancréas.
- b. est un messenger chimique.
- c. circule uniquement par voie sanguine.
- d. agit sur toutes les cellules.
- e. exerce une action spécifique.

**5. Le diabète :**

- a. est dépisté chez un sujet à jeun par une hypoglycémie.
- b. est toujours provoqué par une production insuffisante d'insuline.
- c. est caractérisé par des variations importantes de la glycémie dans une journée.
- d. de type 2 est insulino dépendant.

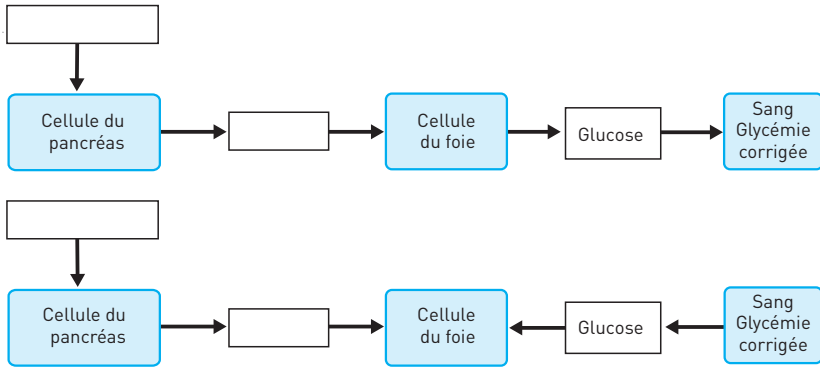
**2 ORGANISER DES CONNAISSANCES****À L'AIDE D'UN SCHÉMA FONCTIONNEL**

★ | 10 min | ► P. 371

Complétez les schémas proposés dans le **document 6** ci-dessous à l'aide des **mots clés suivants** :

Glucagon – glucose sanguin – insuline – hyperglycémie – hypoglycémie.

## Doc 6 Diagramme à compléter



## EXERCICES D'ENTRAÎNEMENT

## 3 GLYCÉMIE ET ALIMENTATION



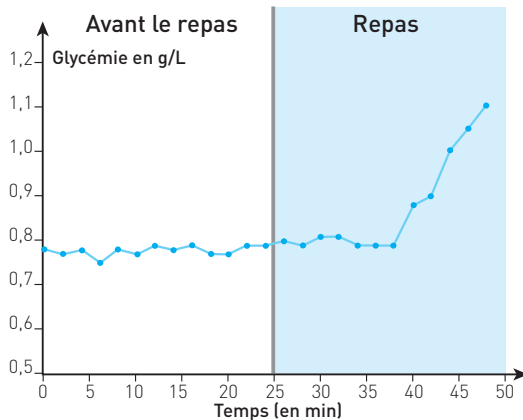
15 min

► p. 371

On se propose d'étudier les variations de la glycémie lors d'un repas.

**Protocole :** La glycémie est mesurée chez un homme adulte non diabétique avant et au début d'un repas riche en glucides.

## Doc 7 Résultats



Après avoir étudié le **document 7**, expliquez à l'aide de vos connaissances les variations observées de la glycémie.

**Analyse.** Découper l'évolution de la glycémie en deux phases puis les comparer.

**Interprétation.** Repère de savoir : voir le **document 1**.

## 4 EXPÉRIENCE DU FOIE LAVÉ

★ 15 min ▶ p. 371

**Claude Bernard** cherche le devenir du glucose issu de la digestion des aliments. Il réalise une expérience devenue célèbre sous le nom d'expérience du foie lavé (1855).

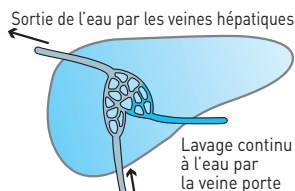
**Doc 8** Expérience du foie lavé

« J'ai choisi un chien adulte, vigoureux et bien portant ; je le sacrifiai 7 h après un repas riche en tripes. Aussitôt, le foie fut enlevé, et cet organe soumis à un lavage continu par la veine porte [...] »

« Je laissai ce foie soumis à un lavage continu pendant 40 min ; j'avais constaté au début de l'expérience que l'eau qui jaillissait par les veines hépatiques était sucrée ; je constatai en fin d'expérience que l'eau qui sortait ne renfermait plus aucune trace de sucre. »

« J'abandonnai dans un vase ce foie à température ambiante et, revenu 24 h après, je constatai que cet organe que j'avais laissé la veille complètement vide de sucre s'en trouvait pourvu très abondamment. »

Après une analyse rigoureuse du compte rendu de cette expérience, **proposez une interprétation des résultats à l'aide de vos connaissances.**



**Analyse.** Le texte relate de manière chronologique à la fois le protocole et les résultats.

**1. Identifier les paramètres :** présence de sucre dans la veine hépatique, lavage et le temps.

**2. Découper** l'expérience pour faire apparaître deux phases puis les **comparer**.

**Interprétation.** Repère de savoir : voir le **paragraphe III**.

## 5 GLYCÉMIE, INSULINE ET ALIMENTATION

★★ 15 min ▶ p. 372

On veut étudier les variations de la glycémie et de l'insuline lors d'un repas.

**Protocole :** La glycémie et la concentration en insuline (= insulinémie) sont dosées chez un homme adulte non diabétique avant et au début d'un repas riche en glucides.

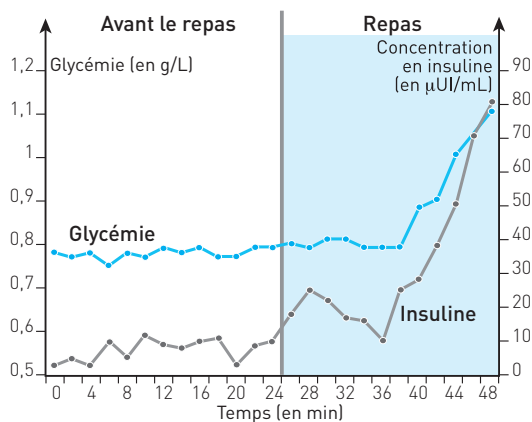
Après une étude rigoureuse du document 9, **expliquez les variations de l'insuline.**

**1. Identifier les paramètres :** personne non diabétique (constante), glycémie, repas, insuline (variables).

**2. Comparer** les évolutions de l'insuline et de la glycémie pour les deux périodes – avant et après un repas – pour établir une **corrélation** entre leurs évolutions.

**Interprétation.** Proposer une relation de causalité pour cette corrélation. Repère de savoir : voir les **documents 1 et 3** (boucle de régulation de la glycémie).

## Doc 9 Résultats

6 DEVENIR DU GLUCOSE PRODUIT  
PAR LA DIGESTION DES ALIMENTS

★★ 20 min ► p. 372

Le glucose produit par la digestion des féculents traverse la paroi intestinale pour passer dans le sang. On cherche à connaître le devenir de ce glucose alimentaire.

**Protocole :** En laboratoire, il est possible de produire du glucose dont le carbone est radioactif (carbone 14). Une personne ingère ce glucose. Avant l'ingestion, la radioactivité est nulle. Quelques minutes après l'ingestion, la radioactivité est mesurée. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (doc. 10).

## Doc 10 Résultats

Résultats	Sang et lymphes	Foie	Muscles	Tissu adipeux
Molécule radioactive	Glucose	Glycogène	Glycogène	Lipides
Radioactivité*	5 %	55 %	18 %	11 %

\* La radioactivité est exprimée en % de glucose radioactif ingéré.

Après une étude rigoureuse du document 10, expliquez ce que devient le glucose dans l'organisme.

**Stratégie d'analyse.** On cherche ici à savoir ce que devient le glucose issu de la digestion des aliments.

1. Identifier les paramètres : glucose (constante), organes et molécules (variables).
2. Comparer l'évolution de la radioactivité avant et après ingestion de glucose radioactif.

**Interprétation.** Repère de savoir : voir le paragraphe III.

## 7 RÔLE DU PANCRÉAS

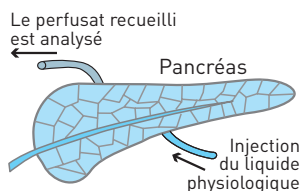
★★ 20 min ▶ p. 372

On cherche à comprendre les relations entre la glycémie et la libération des hormones par le pancréas.

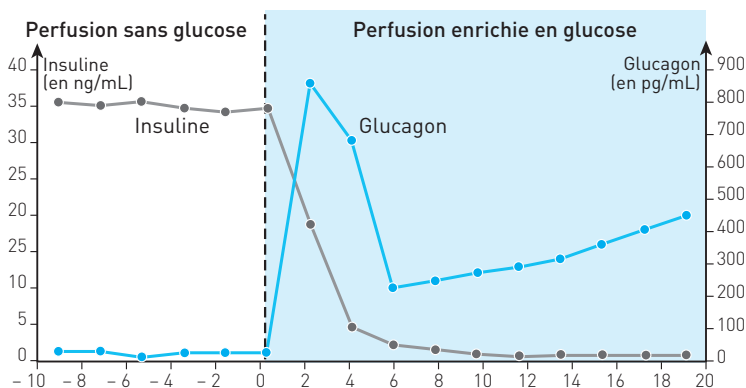
## Doc 11 Expérience

**Protocole :** Des pancréas de chien sont prélevés puis perfusés à vitesse constante avec du liquide physiologique.

Le pancréas est perfusé par l'artère pancréatique avec du liquide physiologique (ne contenant que de l'eau et du chlorure de sodium) pendant 10 min, puis par du liquide enrichi en glucose. Le liquide recueilli à la sortie du pancréas est analysé.



## Doc 12 Résultats



## 1. Indiquez les propositions exactes.

L'étude de cette expérience montre que :

- a. quand le pancréas libère beaucoup de glucagon, il libère peu d'insuline.
- b. le glucagon libéré par le pancréas enrichit la perfusion en glucose.
- c. une glycémie élevée stimule la libération d'insuline.
- d. une glycémie élevée stimule la libération de glucagon.
- e. le glucagon freine la production d'insuline.

## 2. Rédigez une réponse au problème initial (relations entre la glycémie et la libération d'hormones par le pancréas).

Si vous rencontrez des difficultés, étudiez le corrigé de la question 1 avant de rédiger.

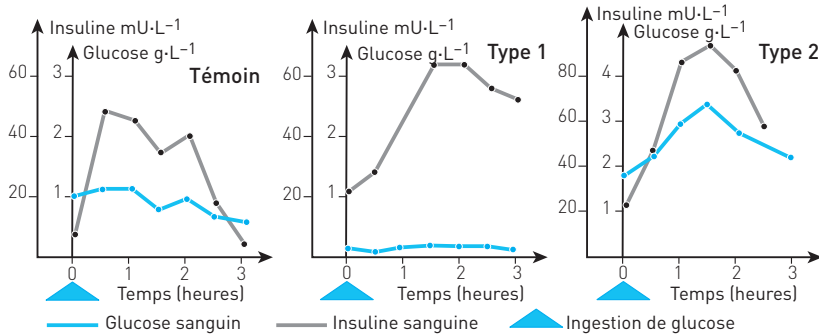
**Vous devez connaître** les organes effecteurs de la glycémie (qui agissent directement sur l'apport ou le prélèvement de glucose sanguin) et le rôle du pancréas sur ces organes effecteurs (paragraphe III).

## 8 DIABÈTES

★★ 20 min ► p. 373

Un test d'hyperglycémie provoquée est pratiqué chez trois personnes à jeun : un témoin non diabétique, deux personnes atteintes de diabète, de type 1 pour l'une et de type 2 pour l'autre. La glycémie et la concentration sanguine en insuline sont mesurées toutes les heures.

## Doc 13 Résultats des tests



UI = unité internationale [1 UI d'insuline est l'équivalent biologique d'environ 45,5  $\mu$ g d'insuline cristalline pure].

**Dégagez** de l'analyse des courbes du **document 13** les caractéristiques d'un diabète de type 1 et d'un diabète de type 2.

**Analyse.** Il y a en réalité deux questions : caractériser le diabète (par l'étude de la glycémie), et analyser les différences entre le type 1 et le type 2 (par la mise en relation de l'évolution de la glycémie et de l'insulinémie).

Réaliser deux études distinctes.

**Conclusion.** Repère de savoir : voir le **paragraphe IV**.

## 9 DIABÈTE ET SÉCRÉTION D'INSULINE

★★★ 20 min ► p. 373

Des doses de glucose différentes sont injectées dans un vaisseau qui amène le sang au pancréas. La sécrétion en insuline est mesurée dans le sang qui sort du pancréas. Ce protocole est mis en œuvre chez deux personnes : un témoin non diabétique et une personne atteinte d'un diabète de type 2 (diabète Mody 2). Les résultats de ces mesures sont donnés par le graphique du **document 14**.

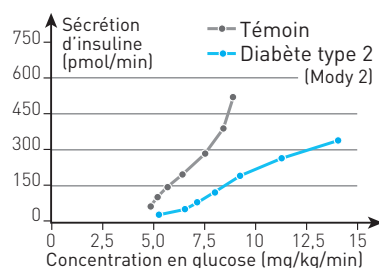
**Vrai ou faux ? Indiquez les propositions exactes.**

1. La sécrétion d'insuline est plus rapide chez le témoin que chez le diabétique Mody 2.
2. La sécrétion d'insuline est plus importante chez le témoin.
3. À glycémie égale, la sécrétion d'insuline est toujours plus importante chez une personne non diabétique.



4. Il faut toujours une glycémie plus élevée chez le témoin pour obtenir une sécrétion d'insuline identique.
5. Le témoin est en hyperglycémie pour une faible dose d'insuline.
6. C'est l'injection du glucose qui provoque une augmentation de la sécrétion d'insuline.
7. C'est la sécrétion d'insuline qui provoque l'augmentation de la glycémie.

## Doc 14 Résultats



**Analyse.** Le graphique n'est simple qu'en apparence : l'axe des abscisses ne représente pas le temps !

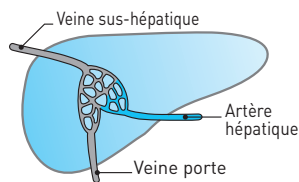
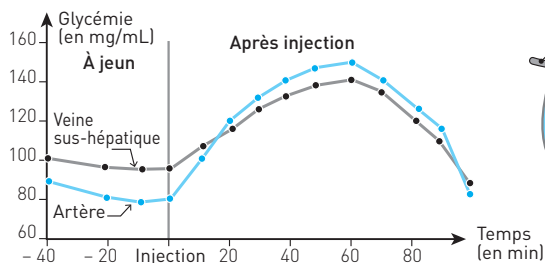
Il faut ici **comparer** la relation glycémie-sécrétion d'insuline pour le témoin et le diabétique Mody 2.

Pour établir une relation de causalité entre glycémie et sécrétion d'insuline, étudier le protocole expérimental.

## EXERCICES D'APPROFONDISSEMENT

## 10 RÉGULATION DE LA GLYCÉMIE ET RÔLE DU FOIE ★★★ 20 min ▶ p. 373

## Doc 15 Résultats



On étudie expérimentalement le rôle du foie dans la régulation de la glycémie. La glycémie est mesurée dans le sang artériel arrivant dans le foie et dans le sang veineux qui quitte le foie. Ces mesures ont été effectuées chez une personne à jeun avant et après injection de glucose.

Après une analyse rigoureuse du document 15, expliquez les résultats à l'aide de vos connaissances.

## Stratégie d'analyse

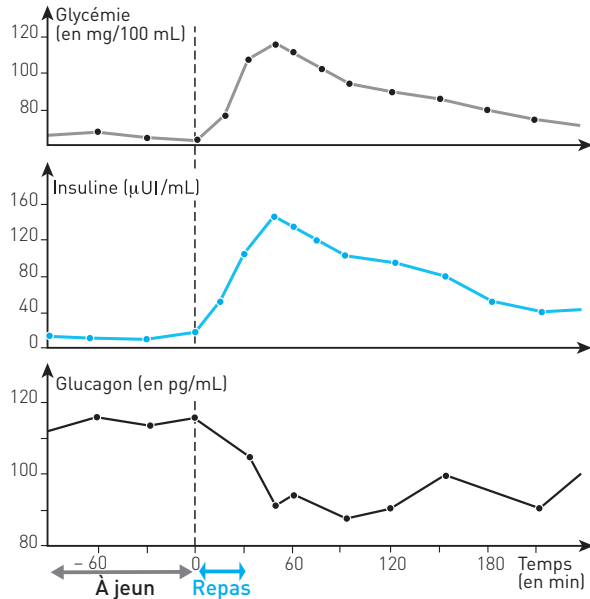
1. Diviser l'expérience en deux études séparées : avant et après injection.
  2. Comparer pour chaque étude la glycémie à l'entrée et à la sortie.
- Interprétation. Utiliser le **paragraphe III**.

## 11 LA RÉGULATION DE LA GLYCÉMIE

★★★ 20 min ► P. 374

Le document 16 montre l'évolution des concentrations en hormones pancréatiques à jeun et à la suite d'un repas chez une personne non diabétique. Après une analyse rigoureuse du document 16, expliquez les résultats à l'aide de vos connaissances.

## Doc 16 Résultats



## Stratégie d'analyse

Il faut **comparer** les trois courbes simultanément avant, puis après le repas. Une analyse séparée des courbes n'est pas informative.

## CONTRÔLE

## 12 LE DIABÈTE MODY 2

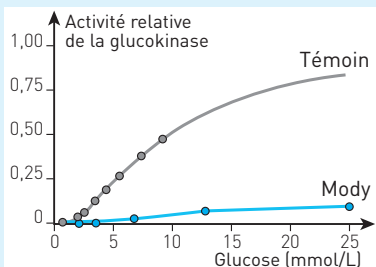
★★★ 45 min ► P. 374

Le diabète Mody 2 (Maturity onset diabetes of the young) est un diabète de type 2 qui survient souvent avant 20 ans, parfois pendant l'enfance. Il se traduit par une hyperglycémie modérée. Ce diabète est provoqué par une mutation qui affecte le gène de la glucokinase. Le rôle de la glucokinase est présenté dans le document 17.

Après une étude rigoureuse des documents, expliquez les mécanismes qui aboutissent au diabète Mody 2.

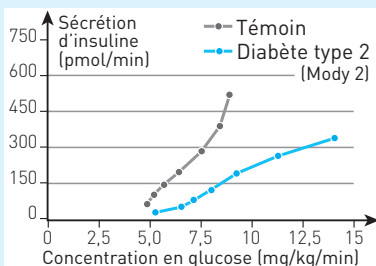
### Doc 17 Activité de la glucokinase

La glucokinase est une enzyme qui catalyse la transformation du glucose en glucose 6-phosphate. Pour comprendre les effets de la mutation du gène sur l'activité de la glucokinase Mody, une étude compare l'activité de la glucokinase Mody 2 et d'une glucokinase témoin ayant une activité normale. L'activité de l'enzyme est testée pour différentes conditions de concentration en glucose (voir le graphique ci-contre).

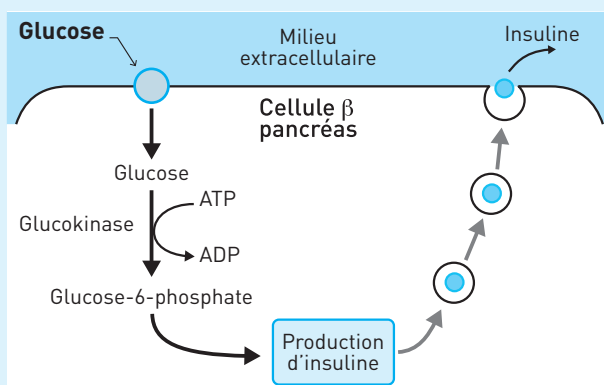


### Doc 18 Sécrétion d'insuline par les cellules $\beta$ du pancréas

Des doses de glucose différentes sont injectées en amont du pancréas, la sécrétion en insuline est mesurée en aval du pancréas chez deux personnes : un témoin non diabétique et une personne atteinte d'un diabète de type 2 (diabète Mody 2). Les résultats de ces mesures sont placés dans le graphique ci-contre.

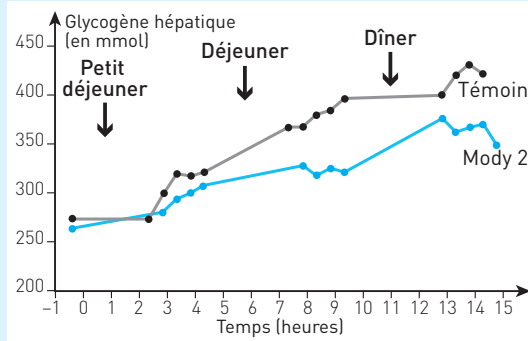


Doc 19 Réactions métaboliques impliquées dans la sécrétion d'insuline en réponse à la concentration en glucose dans le milieu extracellulaire

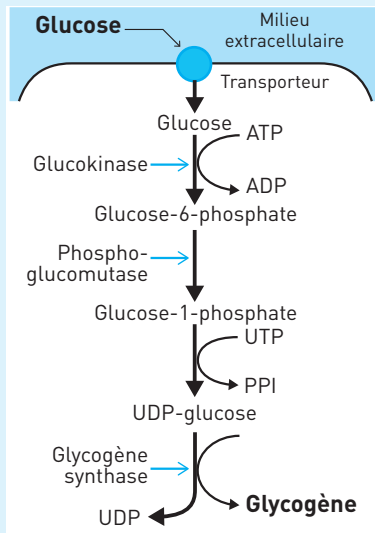


### Doc 20 Synthèse du glycogène par les cellules du foie

Des biopsies du foie sont réalisées pour déterminer l'importance des réserves en glycogène du foie chez deux personnes, un témoin non diabétique et une personne atteinte du diabète Mody 2.



### Doc 21 Réactions métaboliques qui aboutissent à la synthèse du glycogène dans la cellule du foie



**Conseils.** Ce sujet comporte plusieurs documents à étudier dans l'ordre donné. Pour ce type de sujet, appliquez les méthodes générales présentées dans le chapitre consacré à la méthodologie. Le diabète Mody 2 étant lié à une modification de l'activité de la glucokinase, il est important dans un premier temps d'étudier l'activité de cette enzyme, puis de rechercher le lien entre l'enzyme et les différents acteurs du système de régulation de la glycémie (vous devez donc parfaitement connaître ce système : **paragraphes I à III**).

## CORRIGÉS

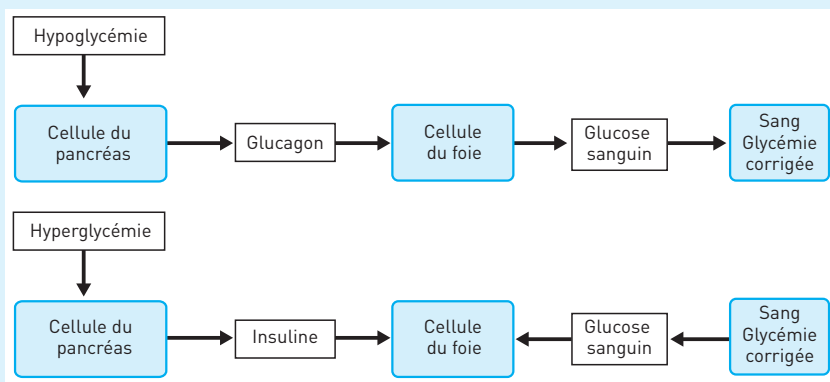
**1** **1. a.** Vrai. **b.** Faux : une enzyme n'est pas détruite, elle peut catalyser plusieurs transformations chimiques. **c.** Vrai, c'est la spécificité de substrat.

**2. a.** Faux : il y a aussi des réactions de synthèse, de déplacement, d'oxydation...  
**b.** Vrai.

**3. a.** Faux : elle catalyse son hydrolyse. Une amylosynthétase catalyse la synthèse de l'amylose. **b.** Faux : le maltose est un ose, le nom d'une enzyme se termine toujours par ase. **c.** Vrai. **d.** Faux : une protéase hydrolyse une protéine.

**4. a.** Faux : une hormone n'est pas une enzyme, c'est un messenger chimique. **b.** Vrai. **c.** Vrai. **d.** Faux : elle n'agit que sur les cellules cibles de cette hormone, celles qui possèdent un récepteur spécifique à l'hormone. **e.** Vrai.

**5. a.** Faux : par une hyperglycémie ( $> 1,26 \text{ g/L}$ ). **b.** Faux : cette affirmation n'est vraie que pour le diabète de type 1. **c.** Vrai. **d.** Faux : le diabète insulino-dépendant est le type 1.

**2** Doc 22

**3** **Analyse :** Avant le repas, la glycémie est stable autour de  $0,8 \text{ g/L}$ .

15 min après le début du repas, la glycémie augmente pour atteindre  $1,1 \text{ g/L}$  30 min après le début du repas.

**Conclusion :** La digestion des aliments, et des féculents en particulier produit du glucose. 15 min après le début du repas, le glucose produit par la digestion traverse la paroi intestinale pour passer dans le sang : la glycémie augmente.

**4** Analyse

– Un foie isolé est lavé jusqu'à ce que l'eau sortant par la veine hépatique soit dépourvue de sucre. Le foie est ensuite abandonné dans un vase.

– 24 h après, le foie est de nouveau riche en sucre.

**Interprétation :** Le foie a produit du sucre.

Le foie possède des réserves de glycogène. Le lavage du foie a enlevé le glucose, mais pas le glycogène qui est insoluble. 24 h après, le foie a produit du glucose par glycogénolyse : il a hydrolysé le glycogène en glucose.

**5 Analyse :** Il existe une corrélation entre l'évolution de la glycémie et l'évolution de la concentration en insuline.

– Avant le repas, la glycémie est stable à 0,8 g/L et la concentration en insuline est inférieure à 10  $\mu$ UI/mL.

– Après le début du repas, la glycémie et la concentration en insuline augmentent. 24 min après le début du repas, la glycémie atteint 1,1 g/L et la concentration en insuline atteint 80  $\mu$ UI/mL.

**Interprétation :** Le repas provoque une augmentation de la glycémie qui stimule la libération sanguine d'insuline par le pancréas. L'insuline va ensuite stimuler le prélèvement du glucose sanguin par le foie, les muscles, les cellules adipeuses...

**6 Analyse :** Avant l'ingestion de glucose radioactif, aucune molécule de l'organisme n'est radioactive.

Quelques minutes après l'ingestion de glucose radioactif, il y a peu de glucose radioactif dans le sang, la radioactivité est importante pour le glycogène du foie et des muscles, ainsi que pour les lipides du tissu adipeux.

**Conclusion :** En quelques minutes, le glucose sanguin est importé par plusieurs organes qui vont le transformer. Le foie et les muscles transforment le glucose en glycogène (c'est la glycogénogenèse), le tissu adipeux transforme le glucose en lipides (lipogenèse).

**7 1. a.** Vrai. **b.** Faux : c'est la perfusion enrichie en glucose qui est la cause des variations des concentrations des hormones pancréatiques observées après  $t = 0$ .

**c.** Vrai. **d.** Faux. **e.** Faux : c'est la glycémie qui agit sur les capteurs du pancréas.

**2. Analyse :** Avant la perfusion de glucose, liquide qui sort du pancréas contient beaucoup de glucagon (800 pg/mL) et très peu d'insuline (2 ng/mL).

Après une perfusion avec un liquide enrichi en glucose, la composition du liquide qui sort du pancréas change : la concentration en glucagon baisse pour devenir très faible, alors que la concentration en insuline augmente, elle présente un pic à 40 ng/mL 4 min après l'injection.

**Interprétation :** Les cellules du pancréas possèdent des capteurs sensibles à la concentration en glucose. Une forte concentration en glucose stimule la production d'insuline, une faible concentration en glucose stimule la production de glucagon.

**8 • Caractériser le diabète**

**Analyse :** Avant l'ingestion de glucose, la glycémie est inférieure à 1 g/L chez le témoin, et supérieure à 1 g/L chez les deux personnes diabétiques.

Après l'ingestion de glucose, la glycémie atteint 2,5 g/L chez le témoin alors qu'elle dépasse les 3 g/L chez les deux personnes diabétiques.

Le témoin retrouve sa glycémie initiale 3 heures après l'ingestion, alors que pour les deux diabétiques, la glycémie reste supérieure à 2,5 g/L.

**Conclusion :** Le diabète est caractérisé par :

- une glycémie élevée à jeun, supérieure à 1 g/L ;
- une hyperglycémie importante après la prise de glucose et qui se prolonge dans le temps.

**• Caractériser les deux types de diabète**

**Analyse :** Pour le diabète de type 1, la concentration en insuline sanguine est dix fois plus faible que chez le témoin, mais pour le type 2, la concentration en insuline est trois fois plus élevée que celle du témoin.

**Conclusion :** Le diabète de type 1 est provoqué par une sécrétion insuffisante en insuline : il est insulino-dépendant.

Le diabète de type 2 n'est pas lié à la sécrétion d'insuline : c'est un diabète non insulino-dépendant.

**9** 1. Faux : le temps n'apparaît pas sur ce graphique, il n'est donc pas possible d'estimer la vitesse de sécrétion. 2. Vrai, quelle que soit la glycémie. 3. Vrai. 4. Faux, c'est l'inverse, elle est toujours moins élevée chez le Mody 2. 5. Faux : il n'est pas question de glycémie dans cet exercice, mais d'injections de glucose dans un vaisseau à l'entrée du pancréas. L'injection de glucose est ici la cause, la libération d'insuline est la conséquence. 6. Vrai. 7. Faux : dans l'énoncé du protocole expérimental, le glucose est injecté dans un vaisseau à l'entrée du pancréas (cause) et l'insuline est prélevée dans le vaisseau qui sort du pancréas (conséquence).

**10** **Analyse :** En période de jeûne, la glycémie à l'entrée du foie est plus importante dans la veine hépatique (à la sortie du foie) que dans l'artère (à l'entrée du foie).

**Interprétation :** En période de jeûne, le glycogène stocké dans les cellules du foie est hydrolysé en glucose : c'est la glycogénogenèse. Le glucose est ensuite libéré dans le sang, ce qui corrige la glycémie.

**Analyse :** Après l'injection de glucose, la glycémie augmente dans la veine et dans l'artère. 20 minutes après l'injection de glucose, la glycémie est plus élevée à l'entrée du foie qu'à la sortie.

**Interprétation :** Après l'injection de glucose, le foie corrige la glycémie en stockant ce glucose sous forme de glycogène (= glycogénogenèse).

**11** Analyse

Avant le repas, la glycémie est stable autour de 72 mg/100 mL. La concentration en glucagon est stable et élevée (110 pg/mL), la concentration en insuline est stable et faible (10  $\mu$ UI/mL).

Après le repas : pendant les 60 min qui suivent le repas, la glycémie augmente, la concentration en insuline augmente pour atteindre 130  $\mu$ UI/mL et la concentration en glucagon diminue de moitié.

**Interprétation**

Avant le repas, l'hypoglycémie stimule la libération de glucagon par le pancréas. Le glucagon stimule la production et la libération de glucose par le foie, ce qui maintient la glycémie autour de 72 mg/100 mL.

Après le repas, l'hyperglycémie stimule la libération d'insuline par le pancréas. L'insuline stimule alors les cellules chargées de prélever le glucose dans le sang pour corriger la glycémie qui diminue.

**12** Une mutation du gène qui code pour une enzyme, la glucokinase, est responsable d'un diabète de type 2, le diabète Mody 2. Comment expliquer les relations entre l'activité de la glucokinase et le diabète Mody 2 ?

- **Étude du document 17 : activité de la glucokinase**

**Analyse :** La glucokinase est une enzyme qui catalyse la transformation du glucose en glucose 6-phosphate. Quelle que soit la concentration du glucose, l'activité de la glucokinase Mody 2 est toujours plus faible que celle de la glucokinase témoin. Quand l'activité relative de la glucokinase témoin est de 0,8, celle de la glucokinase Mody est de 0,1, soit 8 fois plus faible.

**Conclusion :** La mutation du gène de la glucokinase entraîne la formation d'une enzyme dont l'activité catalytique est réduite. Chez les personnes atteintes de diabète Mody 2, la transformation du glucose en glucose 6-phosphate sera ralentie car faiblement catalysée.

- **Comment expliquer la relation entre glucokinase et sécrétion d'insuline ?**

**Mise en relation des documents 18 et 19****Analyse**

– *Document 18 :* Des doses différentes de glucose sont injectées en amont du pancréas, l'insuline produite est dosée à la sortie.

Pour obtenir la même sécrétion d'insuline, 300 pmol/min par exemple, il faut une concentration en glucose plus élevée pour un Mody 2 : 12 mg/kg/min contre 7,5 mg/kg/min pour une personne non diabétique prise pour témoin.

– *Document 19 :* Le glucose qui pénètre dans la cellule  $\beta$  du pancréas est transformé en glucose 6-phosphate par la glucokinase. Le glucose 6-phosphate stimule ensuite la sécrétion d'insuline.



**Conclusion :** La cellule  $\beta$  du pancréas sécrète de l'insuline en réponse à la concentration en glucose. La glucokinase est une enzyme qui intervient dans la chaîne de réaction qui lie glycémie et sécrétion d'insuline.

Pour le diabète Mody 2, une activité réduite de la glucokinase entraîne une transformation moindre de glucose en glucose 6-P à l'intérieur des cellules  $\beta$  du pancréas, donc une sécrétion d'insuline réduite.

Un Mody 2 peut produire autant d'insuline qu'un non diabétique, mais il faut pour cela une glycémie plus importante.

• **Comment expliquer la relation entre glucokinase et synthèse du glycogène ?**

**Mise en relation des documents 20 et 21**

**Analyse**

– *Document 20 :* Au cours d'une journée, les réserves en glycogène du foie sont toujours plus faibles chez un Mody 2 que chez une personne non diabétique prise comme témoin.

– *Document 21 :* Dans la cellule du foie, le glucose est incorporé dans le glycogène après quatre transformations chimiques catalysées par des enzymes. La glucokinase catalyse la première réaction de cette chaîne métabolique.

**Conclusion**

Le glucose présent dans le milieu extracellulaire est importé par les cellules du foie puis transformé en glycogène, c'est la glycogénogenèse. L'activité réduite de la glucokinase (qui intervient dans la première étape de transformation du glucose) réduit la synthèse du glycogène chez une personne atteinte du diabète Mody 2, ce qui explique ses réserves plus faibles que celles d'un non diabétique.

**Bilan**

Le diabète Mody 2 est provoqué par une mutation d'un gène qui aboutit à la synthèse d'une glucokinase dont l'activité est beaucoup plus faible que l'enzyme normale. L'hyperglycémie qui caractérise ce diabète a deux origines.

– Dans les cellules  $\beta$  du pancréas. Par rapport à la glucokinase normale, la glucokinase Mody 2 freine la sécrétion d'insuline. Le capteur glycémique est décalé, sécrétant autant d'insuline pour 1,2 g/L qu'une cellule normale pour un 1 g/L.

– Dans les cellules du foie. La glucokinase Mody 2 freine les réactions de synthèse du glycogène, ce qui freine l'importation du glucose et son stockage, et augmente la glycémie.



# Méthodologie

## I DE LA LECTURE DU SUJET À LA RÉDACTION D'UNE RÉPONSE

### 1. Version « restitution organisée de connaissances » pour le sujet de type 1

#### ■ Lecture du sujet

Souligner les mots clés : ils fixent les connaissances à exposer et les limites. Identifier dans le texte la ou les questions posées (encadrer, surligner).

#### ■ Au brouillon

Écrire les principales idées à exposer (ne pas rédiger), les mots clés en vrac. Identifier les schémas utiles aux explications.

Trier et classer ces idées pour construire un plan. Trois grands types de plans existent comme détaillé ci-dessous.

- Le *plan chronologique* est adapté quand les événements présentent une organisation temporelle, ce qui est assez fréquent.
- Le *plan en entonnoir* présente les connaissances en allant du général au détail : organisme-cellule-molécule ; région-roche-minéral...
- Le *plan donné par le sujet*, soit un paragraphe par question posée ou par sujet abordé.

#### ■ Au propre

Rédiger directement au propre. L'exposé doit comprendre :

- une **introduction** : définir les mots clés et présenter le sujet ;
- deux ou trois **paragraphes** : exposé des connaissances. Intégrer si nécessaire des schémas soignés de taille suffisante, avec un titre, des annotations ou une légende ;
- une **conclusion** : bilan qui répond aux différentes questions posées, ouverture éventuelle du sujet.

### 2. Version « QCM » pour le sujet de type 1

Lire attentivement la question posée et les réponses proposées.

Plusieurs propositions peuvent être exactes. Une proposition peut avoir l'air exacte, mais être fautive en réalité pour un mot ou un verbe. Faire attention aux *négations*, aux liens logiques *et/ou*. Deux parties de la proposition peuvent être exactes séparément mais reliées par une relation de cause à effet fautive.

### 3. Pratique du raisonnement scientifique : sujet de type 2

#### ■ Sur le sujet distribué : dégager l'essentiel

Identifier les mots clés, souligner la ou les questions posées.

Identifier le **sujet scientifique** et les parties du cours concernées.

#### ■ Au brouillon : construire un plan

Faire autant de parties que de questions posées dans l'énoncé.

Pour chaque question, établir une stratégie d'étude : identifier les documents liés à la question traitée puis classer les documents dans l'ordre d'étude.

#### ■ Sur la copie : rédiger une réponse structurée

L'**introduction** présente le sujet et les questions posées dans l'énoncé.

L'**investigation** consiste à rédiger un titre (à partir de la question de l'énoncé)

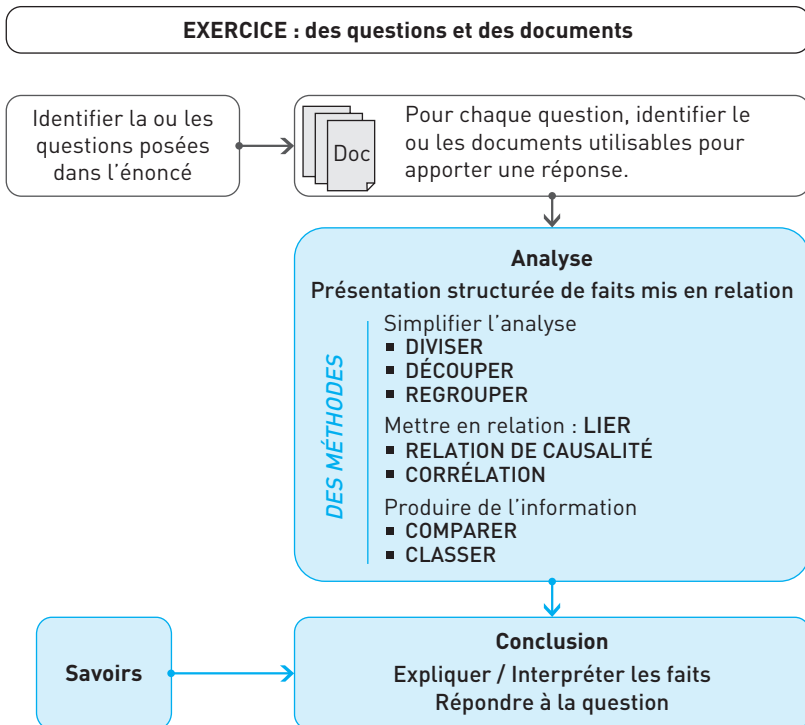
puis, pour chaque document utilisé, ou pour les documents mis en relation :

- rédiger une **analyse** qui expose les faits de manière structurée ;
- rédiger une **interprétation/conclusion**.

Le **bilan** consiste à présenter une synthèse des conclusions dégagées.

## II MÉTHODOLOGIE

### Doc 1 Pratique de raisonnement scientifique



## 1. Diviser

Il est fréquent de réunir dans un document des résultats de différentes sources ou expériences. Ce document de synthèse devient complexe car il réunit plusieurs sujets simples qu'il convient d'identifier et de séparer pour faciliter le travail d'analyse qui se trouve ainsi divisé en plusieurs études.

### EXEMPLE : La réaction immunitaire

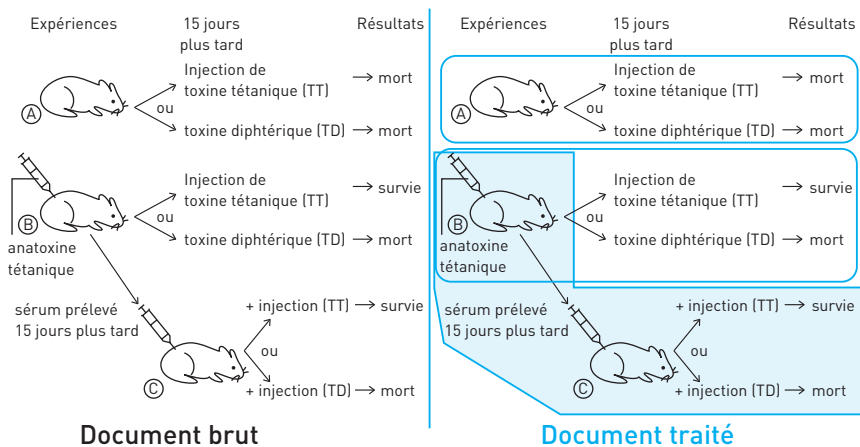
Des expériences sont conduites pour comprendre le fonctionnement du système immunitaire. Le document 2 présente les protocoles et les résultats obtenus.

Ce document est complexe : expériences avec 3 souris et 2 toxines différentes, associées avec des injections d'anatoxine et de sérum. Il faut ici diviser ce document pour faire trois études distinctes, mais qui vont se compléter :

1. Étudier la souris A, qui sert ici de témoin.
2. Étudier la souris B, qui par rapport à la souris A reçoit au préalable une injection d'anatoxine.
3. Étudier la souris C qui reçoit au préalable du sérum issu de la souris B.

L'étude de ce document est réalisée dans le chapitre Immunologie.

### Doc 2

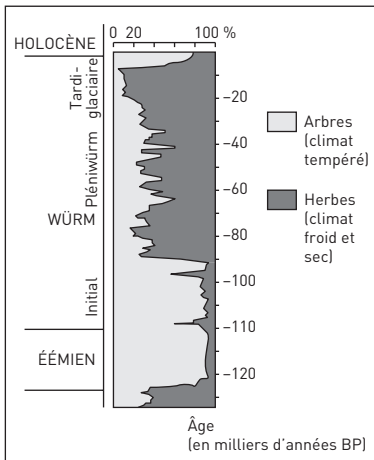


## 2. Découper

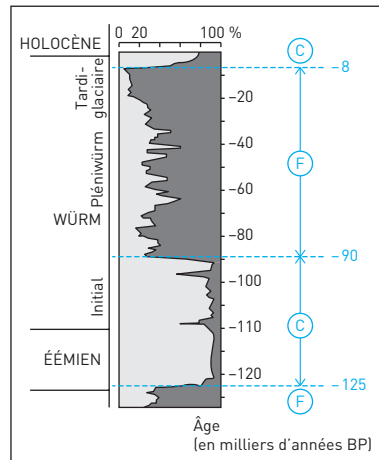
L'évolution temporelle d'un ou plusieurs paramètres dans un graphique peut être découpée en plusieurs phases homogènes qui seront présentées dans l'analyse.

### EXEMPLE : Climats du passé

### Doc 3 Analyse du contenu en pollens de la Grande Pile



Document brut



Document traité

La répartition des pins et des herbes montre des variations importantes et rapides : - 8 000, - 90 000 et - 125 000 ans, séparées par des périodes où les variations sont moindres. Ce découpage permet d'identifier deux types de périodes : le type C, avec domination des pollens de pins, et le type F marqué par une domination des pollens d'herbes.

*Analyse.* La répartition des pollens dans la grotte de la grande pile permet d'identifier quatre périodes :

- avant - 125 000 ans et entre - 90 000 et - 8 000 ans : domination des pollens d'herbes dont la proportion varie entre 90 et 60 % ;
- entre - 125 000 et - 90 000 ans et entre - 8 000 et aujourd'hui : domination des pollens d'arbres, dont la proportion varie entre 80 et 90 %.

### 3. Regrouper

Il s'agit de **regrouper** des événements, des expériences ayant des résultats comparables. Les tests ou expériences qui fournissent des résultats semblables peuvent être rassemblés.

#### EXEMPLE : Énergie et cellule vivante

Les parties vertes des feuilles panachées du pélargonium contiennent de la chlorophylle, les parties blanches n'en possèdent pas. Certaines feuilles sont entourées d'un cache pour masquer la lumière, d'autres sont placées dans un sac dans lequel l'air est privé de CO<sub>2</sub>. 24 heures après le début de l'expérience, les feuilles sont décolorées puis un test sur la présence d'amidon est réalisé au Lugol. Le tableau du document 4 présente les conditions et les résultats obtenus.

## Doc 4

Expériences	1	2	3	4
Chlorophylle	Oui	Oui	Oui	Non
Lumière	Oui	Non	Oui	Oui
CO <sub>2</sub>	Oui	Oui	Non	Oui
Amidon	Oui	Non	Non	Non

Document brut

Expériences	1	2	3	4
Chlorophylle	Oui	Oui	Oui	Non
Lumière	Oui	Non	Oui	Oui
CO <sub>2</sub>	Oui	Oui	Non	Oui
Amidon →	Oui	Non	Non	Non

Document traité

L'absence d'amidon permet de rassembler les expériences 2, 3 et 4, ce groupe peut alors être comparé avec l'expérience 1.

*Analyse*

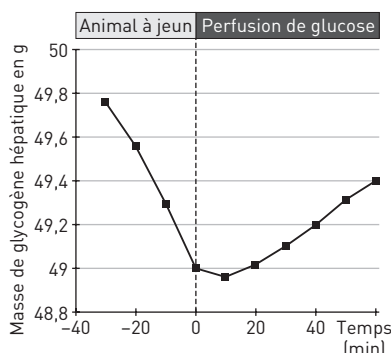
- Il y a présence d'amidon dans une feuille si trois conditions sont réunies : présence de chlorophylle, de CO<sub>2</sub> dans l'air, de lumière.
- Si l'une des ces conditions manque, il n'y a pas d'amidon.

## 4. Lier : relation de causalité

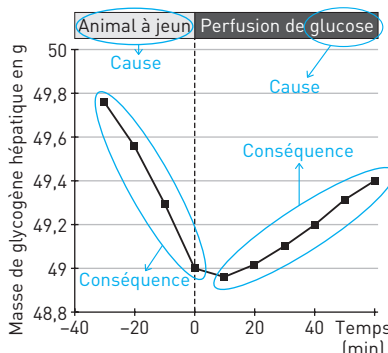
Une approche expérimentale pose souvent le problème de l'identification des causes et des conséquences, identification fondamentale pour l'interprétation des résultats.

## EXEMPLE : Régulation de la glycémie

## Doc 5 Évolution des réserves en glycogène du foie



Document brut



Document traité

C'est la perfusion de glucose (= cause) qui change l'évolution de la masse de glycogène (= conséquence) présent dans le foie. C'est donc le jeûne de l'animal qui est la cause de la baisse de la masse de glycogène dans le foie.

*Analyse*

- À jeun, la masse de glycogène hépatique diminue régulièrement.
- Pendant la perfusion de glucose, la masse de glycogène hépatique augmente.

## 5. Lier : corrélation

Deux paramètres peuvent présenter des évolutions qui traduisent une relation entre eux sans qu'il ne soit possible de déterminer avec certitude une relation de cause à conséquence. Dans ce cas, on parle de corrélation (co-relation) entre ces deux paramètres.

Si une corrélation existe entre le paramètre A et le paramètre B, il y a trois manières de l'expliquer :

A = cause, B = conséquence ;

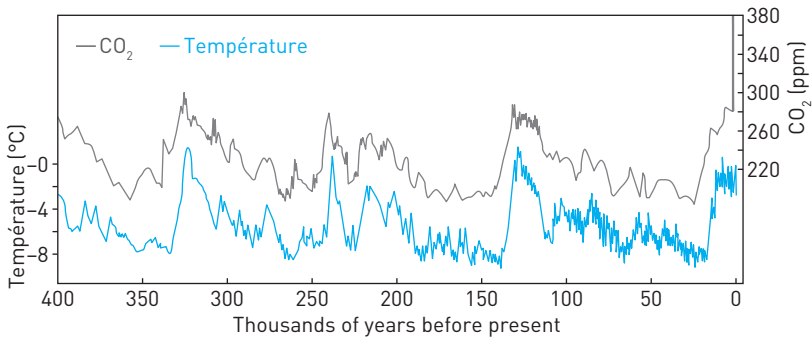
B = cause, A = conséquence ;

A et B = conséquences d'une cause indéterminée qu'il faut rechercher.

### EXEMPLE : Climats du passé.

L'analyse des carottes de glaces issues des forages réalisés sur le site de Vostok (Antarctique) a permis de retracer l'évolution de la température et de la concentration en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère.

#### Doc 6



#### Analyse

Au cours de 400 000 dernières années, il existe une **corrélation** entre l'évolution de la température et celle du dioxyde de carbone : ils évoluent de manière synchrone, et dans le même sens.

#### Interprétation

Comment expliquer cette corrélation ? L'explication est double.

- L'augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère provoque par effet de serre une augmentation de la température.
- L'augmentation de la température provoque un dégazage des océans, ce qui libère du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère.



## 6. Comparer

■ Il s'agit de **comparer** des situations, des expériences, des informations, etc. pour dégager des informations qui permettent de répondre à la question posée. La démarche expérimentale repose sur la comparaison de situations où l'on ne fait varier qu'un seul paramètre à la fois pour dégager de l'information de la comparaison des résultats. Mais l'analyse comparative ne se limite pas à l'expérimentation : on peut aussi comparer des observations, des données...

### EXEMPLE : Énergie et cellule vivante

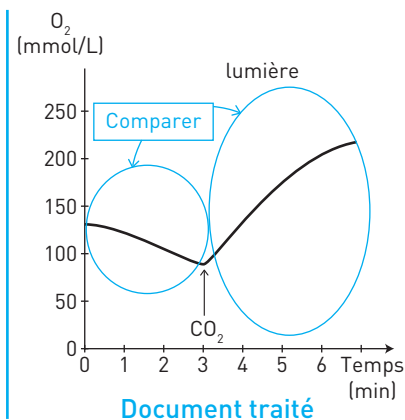
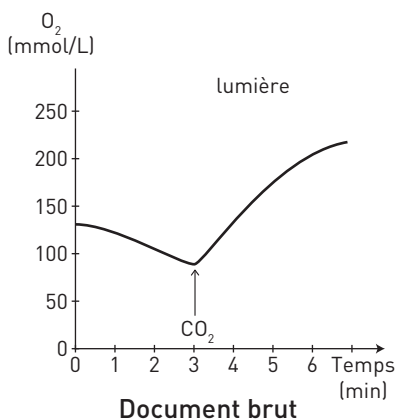
Des algues sont placées dans une eau sans  $\text{CO}_2$ . La culture est placée à la lumière. À  $t = 3$  min, du  $\text{CO}_2$  est injecté dans la culture. Le document 7 présente l'évolution de la concentration en dioxygène dans le milieu. Pour connaître la relation entre l' $\text{O}_2$  produit par le végétal et la présence de  $\text{CO}_2$  dans l'air, il faut **comparer** l'évolution de la concentration en  $\text{O}_2$  avant et après l'injection de  $\text{CO}_2$ .

#### Analyse

Un végétal chlorophyllien est placé dans une enceinte éclairée mais dont l'air est au début de l'expérience dépourvu de  $\text{CO}_2$ .

- Dans une atmosphère privée de  $\text{CO}_2$ , la concentration en dioxygène diminue régulièrement.
- Après l'injection de  $\text{CO}_2$  dans cette enceinte, la concentration en  $\text{O}_2$  augmente régulièrement.

#### Doc 7



## 7. Classer

Pour de nombreux mécanismes, la **chronologie** des événements est fondamentale. Un classement chronologique permet de structurer une réponse et de l'organiser en respectant les relations de causalité.

## Table des Illustrations

16	ph ©	Extr. de « Looking for chromosomes », J. Mc. Leish & B. Snoad
104	©	Christian Aubert - <a href="http://www.microscopie.ch">www.microscopie.ch</a>
113-d	ph ©	Claudius Thiriet/Biosphoto
113-g	ph ©	Hugh Iltis/The Doble Lab University of Wisconsin-Madison (USA)
233-a,b,d	ph ©	Steve Gschmeissner/SPL/Biosphoto
233-c	ph ©	Pr. Zagury/UPMC
261	ph ©	F. Robert/LMCN - <a href="http://www.orleans.fr">www.orleans.fr</a>
268	ph ©	INSERM
313-12	ph ©	Omikron/BSIP
313-13	ph ©	Dr.R. Howard Berg/Visuals Unlimited/Getty Images

Malgré nos efforts, il nous a été impossible de joindre certains photographes ou leurs ayants-droit, ainsi que des éditeurs ou leurs ayants-droit de certains documents, pour solliciter l'autorisation de reproduction, mais nous avons naturellement réservé en notre comptabilité des droits usuels.

Iconographie : Hatier Illustration



# 100 % EXOS

# SVT T<sup>le</sup> S

Spécifique & spécialité

*Un maximum  
d'entraînement  
pour un maximum  
de réussite !*

Des **fiches de cours** pour mémoriser l'essentiel du programme

**180** exercices progressifs et des exercices d'approfondissement pour réussir l'entrée en classe prépa

Des **sujets de type bac** pour se mettre dans les conditions de l'examen

Tous les **corrigés**, avec des explications pas à pas



L'achat de cet ouvrage vous permet d'accéder, **GRATUITEMENT\***, aux ressources d'[annabac.com](http://annabac.com) : fiches de cours, podcasts, quiz, exercices et sujets corrigés...

## TOUTE LA COLLECTION 100 % EXOS

Maths	2 <sup>de</sup>	Maths	T <sup>le</sup> S spécifique & spécialité
Maths	1 <sup>re</sup> S	Maths	T <sup>le</sup> S spécifique
Maths	1 <sup>re</sup> ES/L	Maths	T <sup>le</sup> ES/L
Physique-Chimie	1 <sup>re</sup> S	Physique-Chimie	T <sup>le</sup> S spécifique & spécialité
SVT	1 <sup>re</sup> S	SVT	T <sup>le</sup> S spécifique & spécialité

\*selon conditions précisées sur le site [www.annabac.com](http://www.annabac.com)