

Collection A. Duco

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE



Nouveau programme 2012

LIVRE DU PROFESSEUR

Enseignement spécifique 3

Enseignement de spécialité 147

Composition: Marina Smid – SG Production

Schémas: Coredoc – Laurent Blondel

Couverture: © Michel Vaartjes/Fotonatura/Biosphoto – © Wim van Egmond/Visuals Unlimited/Getty

Toutes les références à des sites Internet présentées dans cet ouvrage ont été vérifiées attentivement à la date d'impression. Compte tenu de la volatilité des sites et du détournement possible de leur adresse, les éditions Belin ne peuvent en aucun cas être tenues pour responsables de leur évolution. Nous appelons donc chaque utilisateur à rester vigilant quant à leur utilisation.

Le code de la propriété intellectuelle n'autorise que «les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» [article L. 122-5]; il autorise également les courtes citations effectuées dans un but d'exemple ou d'illustration. En revanche «toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» [article L. 122-4]. La loi 95-4 du 3 janvier 1994 a confié au C.F.C. (Centre français de l'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris), l'exclusivité de la gestion du droit de reprographie. Toute photocopie d'œuvres protégées, exécutée sans son accord préalable, constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Collection A. Duco
SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE



Nouveau programme 2012

LIVRE DU PROFESSEUR

Enseignement spécifique

Directeur d'ouvrage

André Duco

Auteurs

Audrey Carpentier
Frédéric Celle
Pierre Chareyron
Grégoire Daoust
Pauline Deyme
Hervé Froissard
Laurent Geray
Céline Mémeteau
Claire Olive
Jean-Michel Picoche
Samuel Rebulard
Lucas Salomon
Andaine Seguin
Romina Seyed
Didier Thomas
Anne Woehrlé

Coordinateur pédagogique

Claude Censier

Conseillers scientifiques

Rémi Cadet
Ludovic Orlando
André Schaaf

SOMMAIRE

THÈME 1	Génétique, diversification et évolution du vivant	5
Chapitre 1	Brassage génétique et diversification des génomes	5
Chapitre 2	La diversification du vivant	16
Chapitre 3	De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité	21
Chapitre 4	Un regard sur l'évolution de l'Homme	25
	EXERCICES DU THÈME 1	35
THÈME 2	Relation entre organisation et mode de vie des plantes à fleur	41
Chapitre 1	Organisation des plantes à fleurs et vie fixée	41
Chapitre 2	Reproduction des plantes à fleurs et vie fixée	45
	EXERCICES DU THÈME 2	50
THÈME 3	Le domaine continental et sa dynamique	55
Chapitre 1	Caractérisation du domaine continental	55
Chapitre 2	La formation des chaînes de montagnes	62
Chapitre 3	La production de nouveaux matériaux continentaux	67
Chapitre 4	La disparition des reliefs	73
	EXERCICES DU THÈME 3	77
THÈME 4	Enjeux planétaires contemporains	83
Chapitre 1	Géothermie et propriétés thermiques de la Terre	83
Chapitre 2	La plante domestiquée	88
	EXERCICES DU THÈME 4	93
THÈME 5	Le maintien de l'intégrité de l'organisme	97
Chapitre 1	La réaction inflammatoire, une manifestation de l'immunité innée	97
Chapitre 2	L'immunité adaptative	104
Chapitre 3	Le phénotype immunitaire au cours de la vie	112
	EXERCICES DU THÈME 5	115
THÈME 6	Neurone et fibre musculaire : la communication nerveuse	121
Chapitre 1	Les réflexes myotatiques, un exemple de commande nerveuse du muscle	121
Chapitre 2	Motricité, volonté et plasticité cérébrale	125
	EXERCICES DU THÈME 6	128

THÈME 1 GÉNÉTIQUE, DIVERSIFICATION ET ÉVOLUTION DU VIVANT

CHAPITRE 1

Brassage génétique et diversification des génomes

UNITÉ 1 Reproduction sexuée et stabilité de l'espèce

[pp. 18-19 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Objectifs et mots-clés : Stabilité des caryotypes	

Conseils et suggestions

– La **page d'ouverture du chapitre** peut être utilisée pour aborder la notion de reproduction sexuée au sein d'une espèce et de transmission des caractères d'une génération à la suivante. La diversité des pelages des 3 chatons illustre la diversité génétique des descendants issus d'une reproduction sexuée.

– L'objectif de ce chapitre est d'étudier les aspects génétiques liés à la reproduction sexuée, en se limitant au cas des organismes pluricellulaires, et plus particulièrement aux organismes animaux. Cette étude passe par des analyses de cycles de développement associés à des caryotypes, des observations de phénomènes cytologiques (cellules en cours de méiose et de fécondation) et des analyses de croisements. En fin de chapitre, sont abordées les anomalies pouvant survenir au cours de la reproduction sexuée ainsi que leurs conséquences à l'échelle de l'individu et de l'espèce. L'exercice 4 p. 37 évoque la reproduction sexuée chez les végétaux ; il permet d'amener l'élève à réaliser que les processus décrits chez les animaux existent aussi chez les végétaux.

– Lors de cette première unité, l'élève est amené à montrer que les mécanismes qui sous-tendent la reproduction sexuée (méiose, fécondation) permettent d'assurer la stabilité du caryotype des individus d'une même espèce au fil des générations.

– La démarche suivie dans cette unité consiste à comparer les cycles de développement de l'espèce humaine (exemple choisi car considéré comme le plus proche du vécu des élèves) et de la drosophile (animal choisi dans la majorité des documents des unités suivantes : il s'agit de l'un des principaux animaux modèles en génétique) et de les mettre en relation avec des données caryotypiques.

– L'exercice 2 p. 36 conduit les élèves à manier la notion de ploïdie.

– Un tableau récapitulant le nombre de chromosomes dans le caryotype de différents êtres vivants est disponible à l'adresse suivante (sujet de CAPES interne 1998) : <http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/svt/format/qualif/capesint98/cintbio98.htm>

– Quelques données sur la drosophile : <http://www.yale.edu/ynhti/curriculum/units/1996/5/96.05.01.x.html>

Exploitation des documents par les activités

L'activité proposée est présentée sous la forme d'une tâche complexe : il s'agit pour l'élève de mobiliser des connaissances, de mettre en œuvre des capacités et attitudes afin de répondre à une problématique globale. L'élève construit sa propre démarche, en utilisant les ressources dont il dispose. S'il le souhaite, il peut s'aider des conseils proposés.

(Extraire et organiser des informations à partir de documents, raisonner avec rigueur, communiquer à l'écrit)

La comparaison des cycles de développement de l'Homme (**doc. 3**) et de la Drosophile (**doc. 6**) montre qu'au cours de chaque cycle, il y a alternance d'une phase haploïde (c'est-à-dire où les cellules comportent n chromosomes, **doc. 1**) et d'une phase diploïde (c'est-à-dire où les cellules comportent $2n$ chromosomes, **doc. 1**). La majeure partie du cycle, qui correspond au développement du zygote en individu adulte, constitue la phase diploïde alors que la phase haploïde est réduite aux gamètes (**doc. 1, 2 et 5**). La méiose permet de passer de la phase diploïde à la phase haploïde (des cellules germinales aux gamètes) alors que la fécondation permet de passer de la phase haploïde à la phase diploïde (des gamètes au zygote) (**doc. 3 et 6**).

Finalement, la stabilité du caryotype de chaque espèce est assurée par l'alternance, au cours du cycle de développement, de deux mécanismes biologiques compensatoires : la méiose, qui « divise par 2 » le nombre de chromosomes, et la fécondation, qui « multiplie par 2 » le nombre de chromosomes au cours du cycle.

Un exemple de schéma attendu figure dans le bilan de l'unité à la page 30.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
La méiose est la succession de deux divisions cellulaires précédée comme toute division d'un doublement de la quantité d'ADN (réplication). Dans son schéma général, elle produit quatre cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde. <u>Limites :</u> <i>La nomenclature des phases de la méiose n'est pas exigible. La description cytologique de la méiose s'appuie sur le seul cas de la production de gamètes chez les animaux diploïdes à cycle monogénétique.</i>	- Ordonner et interpréter des observations microscopiques de cellules en méiose (doc. 1 à 4). - Représenter schématiquement le déroulement de la méiose à partir d'une cellule diploïde (doc. 1).

Conseils et suggestions

- L'objectif de cette unité est de mettre en évidence les événements cellulaires et chromosomiques qui ont lieu au cours de la méiose.
- Cette unité s'appuie notamment sur des observations microscopiques d'une cellule-mère de grain de pollen de *Lis* tout au long de sa méiose au sein d'une anthère (**doc. 1**). Bien que le programme insiste sur la production de gamètes chez les animaux, ce matériel végétal a été choisi pour observer le déroulement de la méiose dans son intégralité car il fournit des observations de belle qualité et faciles à interpréter. Il est possible d'utiliser des lames du commerce ou de réaliser une coupe d'anthère de *Lis* en classe : un protocole est disponible à l'adresse suivante www.ac-grenoble.fr/disciplines/svt/file/TS_Fich-antheres-lis.doc.
- Les autres clichés de méiose (**doc. 2 et 3**) sont tous deux issus d'articles scientifiques (voir le fichier de références sur le site compagnon du manuel (<http://www.libtheque.fr/svtlycee>)). Ils ont été choisis pour insister sur les phases-clés qui font de la méiose une division particulière (prophase I et appariement des chromosomes homologues, métaphase-anaphase I et séparation des chromosomes homologues).
- En classe, l'observation microscopique de figures de méiose peut également être réalisée grâce à des lames du commerce utilisant comme support l'*Ascaris* (gamétogenèse) ou la Fougère (sporogénèse), ou bien en réalisant une préparation microscopique de testicules de criquets fraîchement tués. Des protocoles sont disponibles aux adresses suivantes : www.ac-grenoble.fr/disciplines/svt/file/TS_Fich-criquet.doc ; <http://espace-svt.ac-rennes.fr/applic/meiose/criquet1/criquet03.htm> (protocole associé à des photos).
- Une photo d'ovocyte de souris en anaphase I est disponible à l'adresse suivante : http://igdr.univ-rennes1.fr/equipes/recherche_equipe.php?domaine=&equipe=44&resp_equipe=

Des photos de méiose chez le Criquet sont disponibles à l'adresse suivante : <http://jean-jacques.auclair.pagesperso-orange.fr/banque/banq.htm#meiose>

Une animation de méiose est disponible à l'adresse suivante : http://genet.univ-tours.fr/gen000100_fichiers/meiose.HTM

– Le film « La méiose, la fécondation », édité par Jeulin, fournit des vidéos de méiose chez l'animal et chez le végétal qui peuvent compléter les observations microscopiques.

– La démarche proposée doit amener l'élève à utiliser ces observations microscopiques pour visualiser le comportement des chromosomes au cours de la méiose, l'interpréter en termes de ploïdie pour les cellules, et donc comprendre comment la méiose assure la passage d'une phase diploïde à une phase haploïde.

Exploitation des documents par les activités

① DOC. 1 À 4 (Extraire et organiser des informations à partir d'observations microscopiques, communiquer en annotant un graphique). Le graphique annoté attendu est fourni dans le bilan de l'unité à la page 30.

② EN CONCLUSION (Communiquer en rédigeant une synthèse). La méiose est constituée par l'association de deux divisions cellulaires particulières. Lors de la première division de méiose, les chromosomes homologues d'abord appariés se séparent, chacun migrant vers un pôle de la cellule. Les deux cellules-filles obtenues ne possèdent donc plus qu'un seul lot de chromosomes au lieu de deux : la cellule-mère diploïde a donc donné deux cellules-filles haploïdes. Puis, au cours de la deuxième division de méiose, ce sont les chromatides de chaque chromosome qui se séparent, chacune migrant vers un pôle de la cellule. Une cellule-mère diploïde à 2 chromatides par chromosome qui subit une méiose sera donc à l'origine de 4 cellules-filles haploïdes qui n'ont plus qu'une chromatide par chromosome.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Au cours de la méiose, des échanges de fragments de chromatides (crossing-over ou enjambement) se produisent entre chromosomes homologues d'une même paire. • Objectifs et mots-clés : Brassage génétique intrachromosomique au cours de la méiose. Diversité des gamètes <u>Limites :</u> <i>Les mécanismes moléculaires de la recombinaison ne sont pas au programme.</i> <i>L'analyse des produits de méiose se limite aux diplontes par l'étude des descendants issus d'un croisement avec un homozygote récessif pour tous les loci étudiés : la génétique des haplontes n'est pas au programme.</i>	• Effectuer une analyse statistique simple d'un remaniement intrachromosomique (en analysant des produits de méiose) (doc. 2 et 4, ex 4 p 37). • Illustrer schématiquement le mécanisme du crossing-over et ses conséquences génétiques (doc. 3).

Conseils et suggestions

– Dans l'unité précédente, le déroulement de la méiose a été présenté de façon à illustrer le passage d'une phase diploïde à une phase haploïde, la méiose a donc été appréhendée comme l'une des composantes de la reproduction sexuée assurant la stabilité du caryotype de l'espèce. Il s'agit ici d'aborder la notion de diversité des gamètes issus de méiose, en commençant par les remaniements qui ont lieu au cours de la prophase I.

– La démarche suivie consiste à analyser des résultats de croisements effectués chez des drosophiles et à les mettre en relation avec une observation microscopique de chromosomes en prophase I. L'apparition de nouveaux phénotypes dans la descendance du croisement 1 (**doc. 2**) associée à l'observation de chiasma chez une drosophile femelle (**doc. 3**) conduit à émettre l'hypothèse que des remaniements au sein d'une paire de chromosomes peuvent être à l'origine de ces nouveaux phénotypes. L'absence de ces nouveaux phénotypes lors du croisement inverse (**doc. 4**) associée à l'absence de chiasma chez une drosophile mâle (**doc. 3**) permet de valider l'hypothèse émise.

– Des croisements entre drosophiles peuvent être réalisés en classe. Différentes souches de drosophiles ainsi que le matériel relatif à l'élevage sont disponibles chez les fournisseurs de lycée habituels. Ces derniers proposent également des plaques de résultats de croisements observables à la loupe binoculaire.

– Les conventions d'écriture en génétique posent souvent problème aux élèves. Une fiche d'aide (fiche génétique) est disponible en complément sur le site compagnon du manuel (<http://www.libtheque.fr/svtlycee>).

– Lorsque les chromosomes ont subi un brassage intrachromosomique en méiose I, il existe un brassage supplémentaire entre chromatides-sœurs en méiose II. Cet aspect n'a pas été particulièrement évoqué dans le chapitre car il n'est pas mentionné dans le programme.

– Certains ouvrages fournissent des ressources intéressantes :
• « *Introduction à l'analyse génétique* » A.J.F. Griffiths et coll., De Boeck, 2006 (cartographie du génome de la Drosophile, de la Tomate, exemples d'exercices)

• « *Exercices et problèmes de génétique* » G. Broussal, Flammarion Médecine, 1998.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*Mobiliser ses connaissances, mettre en relation des informations et raisonner*). Compte-tenu de la disposition des allèles sur les chromosomes de la paire 2 de la drosophile femelle hétérozygote, on s'attend à ce que cette dernière produise deux types de gamètes : (L G) et (vg b). La drosophile mâle étant homozygote pour les deux gènes étudiés, elle produit un seul type de gamètes : (vg b). Les résultats attendus sont donc : 50 % de drosophiles de génotype (L G // vg b) et de phénotype [L G] (car vg et b sont des allèles récessifs, **doc. 1**), et 50 % de drosophiles de génotype (vg b // vg b) et de phénotype [vg b].

2 DOC. 1 ET 2 (*Mettre en relation des informations et raisonner*). Les allèles fournis par la drosophile mâle homozygote étant récessifs, le phénotype des descendants du croisement est le reflet direct du génotype des gamètes apportés par la drosophile femelle hétérozygote (**doc.1**). Celle-ci a donc produit 4 types de gamètes différents : (L G), (vg b) mais aussi (L b) et (vg G).

3 DOC. 3 (*Extraire et mettre en relation des informations pour formuler une hypothèse explicative*). Comme les chromosomes homologues peuvent échanger des fragments de chromatides au cours de la prophase I, on peut émettre l'hypothèse que les deux types de gamètes inattendus produits par la drosophile femelle hétérozygote, (L b) et (vg G), sont issus d'un tel échange entre les deux chromosomes de la paire 2.

4 DOC. 3 ET 4 (*Mettre en relation des informations pour éprouver une hypothèse*). A l'issue de ce croisement (**doc. 4**), deux phénotypes de descendants seulement sont obtenus. Par un raisonnement similaire à celui mené à la question 2, on peut dire que la drosophile mâle a produit 2 types de gamètes : (L G) et (vg b),

(...)

c'est-à-dire les deux types de gamètes théoriquement attendus. D'autre part, le **doc. 3** nous apprend qu'aucun chiasma n'est observé chez la drosophile mâle. L'absence de phénotypes inattendus est donc ici associée à l'absence de chiasma. L'hypothèse émise à la question précédente est donc validée.

5 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Les allèles de deux gènes situés sur une même paire de chromo-

somes peuvent s'associer selon des combinaisons différentes à la suite d'échanges de fragments de chromatides entre chromosomes homologues.

Chaque cellule-fille issue de la méiose possèdera l'une des chromatides de l'un des chromosomes de la paire. Elle contiendra donc une seule combinaison d'allèles de ces deux gènes.

UNITÉ 4 Le brassage génétique lors de la méiose

[pp. 24-25 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
- Les chromosomes ainsi remaniés subissent un brassage interchromosomique résultant de la migration aléatoire des chromosomes homologues lors de la 1^{ère} division de méiose. Une diversité potentiellement infinie de gamètes est ainsi produite. - Objectifs et mots-clés. Brassage génétique interchromosomique au cours de la méiose. Diversité des gamètes. <u>Limites :</u> <i>L'analyse des produits de méiose se limite aux diplontes par l'étude des descendants issus d'un croisement avec un homozygote récessif pour tous les loci étudiés : la génétique des haplontes n'est pas au programme.</i> <i>Convergence. Mathématiques : probabilités.</i> <i>Pistes. Croisement entre la combinatoire génétique et la formalisation mathématique.</i>	- Effectuer une analyse statistique simple d'un brassage interchromosomique (en analysant des produits de méiose). (doc. 1 et 2) - Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique. (doc. 3) - Communiquer dans un langage scientifiquement approprié: conventions d'écriture. (doc.1)

Conseils et suggestions

- L'objectif de ce chapitre est, en s'appuyant sur les mécanismes moléculaires et cellulaires de la ségrégation des chromosomes (**unité 2**) et des remaniements chromosomiques (**unité 3**) vus précédemment, d'expliquer la diversité des gamètes.
- L'élève est amené à mettre en application la schématisation du déroulement de la méiose (**doc. 1 p. 20**), le vocabulaire (**doc. 1 p. 22**) et les conventions de représentation (échiquier de croisement, **doc. 1 p. 24**) ou d'écriture (**doc. 1 p. 22** et **doc. 1 p. 24**) vus au cours du chapitre.
- Cette unité peut être l'occasion de faire travailler les élèves sur des tests statistiques un peu plus poussés, comme le test du Khi-deux. Ce test permet entre autres de déterminer si des effectifs peuvent, de manière statistiquement significative, être considérés comme similaires. On peut pour cela se reporter au site <http://www.statistix.fr/IMG/pdf/drosophiles-caen3.pdf> ou à la fiche « test du Khi-deux » disponible en complément sur le site compagnon du manuel (<http://www.libtheque.fr/svtlycee>).
- Le croisement présenté en **doc. 1 p. 24** et également celui de l'exercice **3 p. 36** se prêtent particulièrement à un test du Khi-deux. Ceci permet d'appuyer, par une analyse statistique des résultats de croisement, l'hypothèse proposée suite à l'unité sur les mécanismes de la méiose selon laquelle la migration des chromo-

somes, puis des chromatides, lors des anaphases est un processus aléatoire.

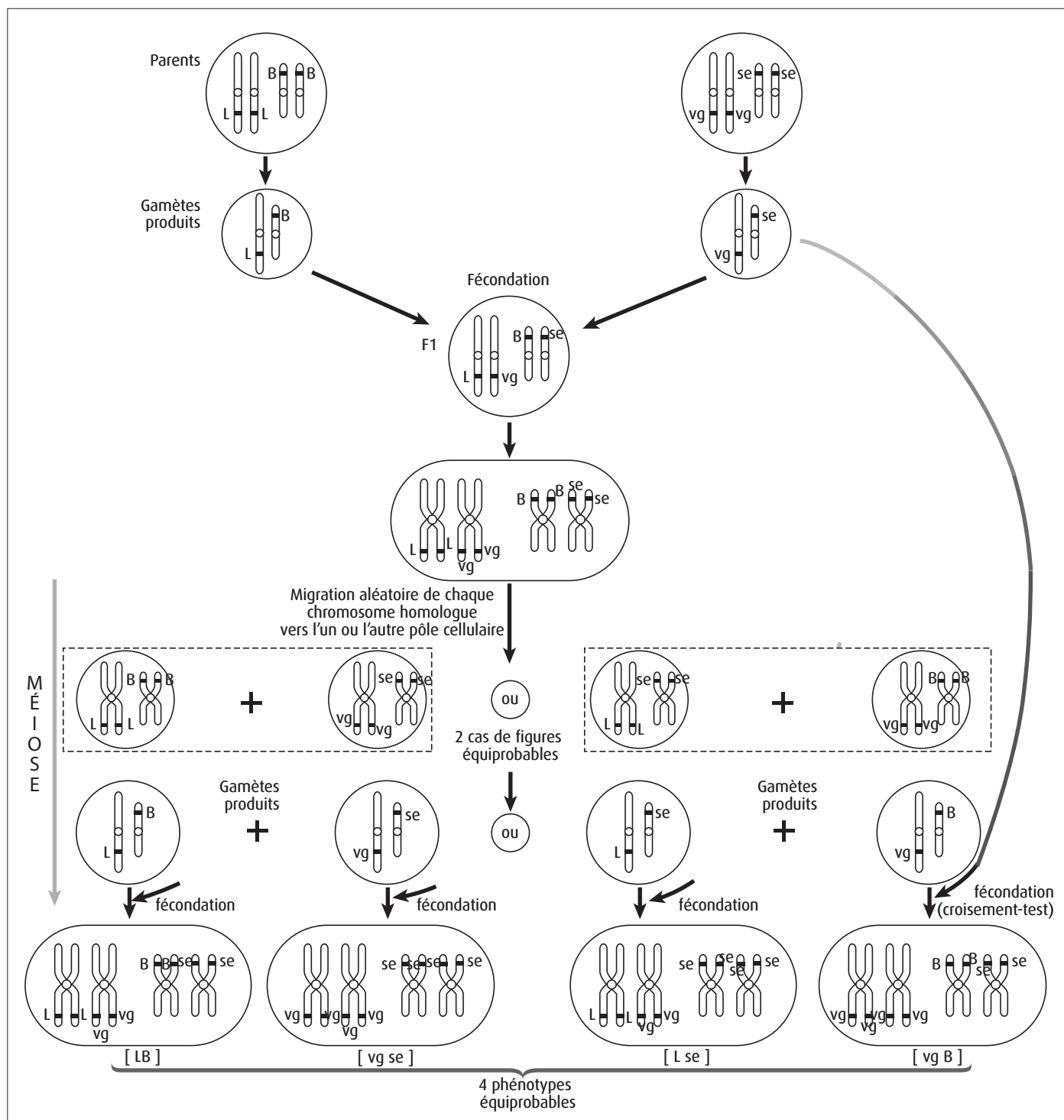
- Les conventions d'écriture **p. 24** viennent compléter celles présentées dans le **doc. 1 p. 22** et seront indispensables pour la résolution des exercices.
- Le **doc. 2 p. 25** présente un croisement impliquant 3 gènes, situés sur deux chromosomes différents. L'utilisation d'un logiciel de simulation tel que drosfly prend ici tout son sens, étant donnée la difficulté de se procurer de telles souches, de réaliser matériellement des croisements et surtout d'effectuer des comptages sur des effectifs tels que les résultats soient significatifs. De nombreuses aides à l'utilisation du logiciel sont disponibles sur internet, entre autres sur le site <http://www.inforef.be/swi/drosolab.htm>. Un protocole détaillé pour réaliser cette simulation avec la version de démonstration de drosfly est proposé en complément sur le site compagnon du manuel (<http://www.libtheque.fr/svtlycee>).
- L'exercice **4 p. 37** présente également un croisement simple, avec test-cross, mais impliquant 2 gènes sur le même chromosome. Cet exercice permet d'illustrer chez les végétaux ce qui a été vu chez la drosophile et ainsi de généraliser les mécanismes. Il permet de souligner que, contrairement à ce qui se passe chez la drosophile, il peut y avoir des crossing-over chez les mâles d'autres espèces, le cas de la drosophile faisant exception.
- Il peut être judicieux de rappeler aux élèves que, les crossing-over

n'ayant pas lieu chez la drosophile mâle (voir **unité 3**), le choix du sexe du parent est crucial. En effet, on obtient des résultats totalement différents si lors du test-cross on croise des mâles F1 avec des femelles triple homozygotes récessives. En revanche, lors du comptage des phénotypes de la descendance, on additionne les valeurs obtenues chez les mâles et les femelles, la représentation du sexe mâle ou femelle des descendants n'a pas de signification ici.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (extraire des informations, analyser des produits de méiose, communiquer par un schéma).

On observe, à l'issue du test-cross, 4 phénotypes différents, représentés par des effectifs équivalents. Le mâle utilisé lors du test-cross étant homozygote récessif, le phénotype des descendants traduit

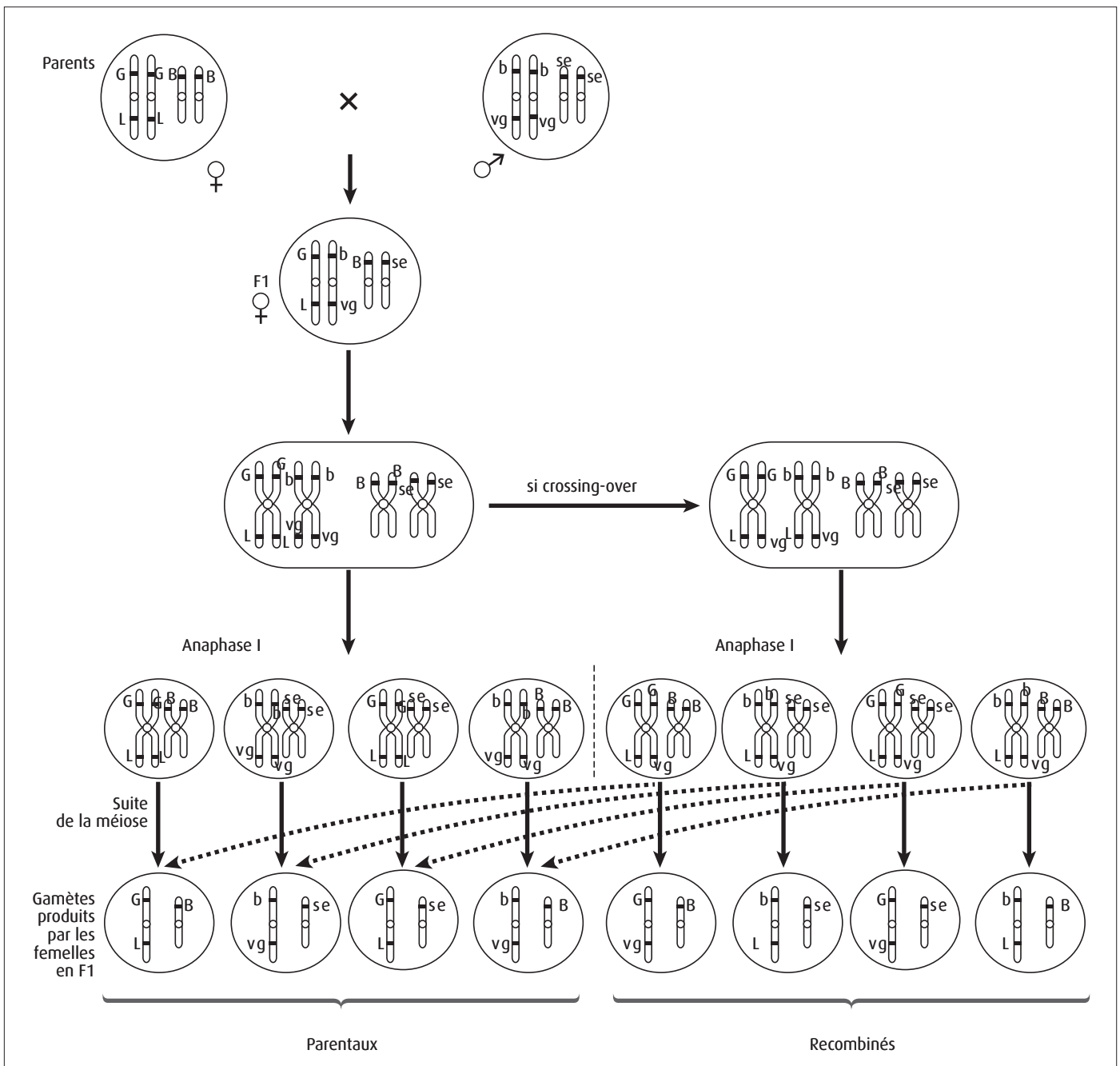


(...)

directement les allèles portés par les gamètes de la femelle F1. La femelle F1 est issue du croisement de deux individus homozygotes (double récessif et double dominant), elle est donc hétérozygote pour les deux gènes étudiés. Ainsi la proportion des différents phénotypes observés à l'issu du test-cross traduit la proportion des différents gamètes produits par des individus hétérozygotes pour deux gènes situés sur deux chromosomes différents. La migration des chromosomes homologues lors de l'anaphase I de méiose se faisant de manière aléatoire, les 4 combinaisons d'allèles des deux gènes sont équiprobables, ce qui explique que les effectifs des 4 phénotypes observés soient équivalents.

2 DOC. 2 (extraire des informations, analyser des produits de méiose, communiquer par un schéma).

Comme précédemment, le mâle utilisé lors du test-cross étant homozygote récessif, le phénotype des descendants traduit directement les allèles portés par les gamètes de la femelle F1. On observe la présence de 4 phénotypes en proportions importantes et équivalentes (en moyenne 107 individus, soit 21 % de l'effectif total) : [L G B], [L G se], [vg b B] et [vg b se]. Ces phénotypes correspondent à des individus issus de gamètes (produits par les femelles F1) n'ayant pas subi de remaniements intrachromosomiques. On observe 4 autres phénotypes minoritaires, également en propor-



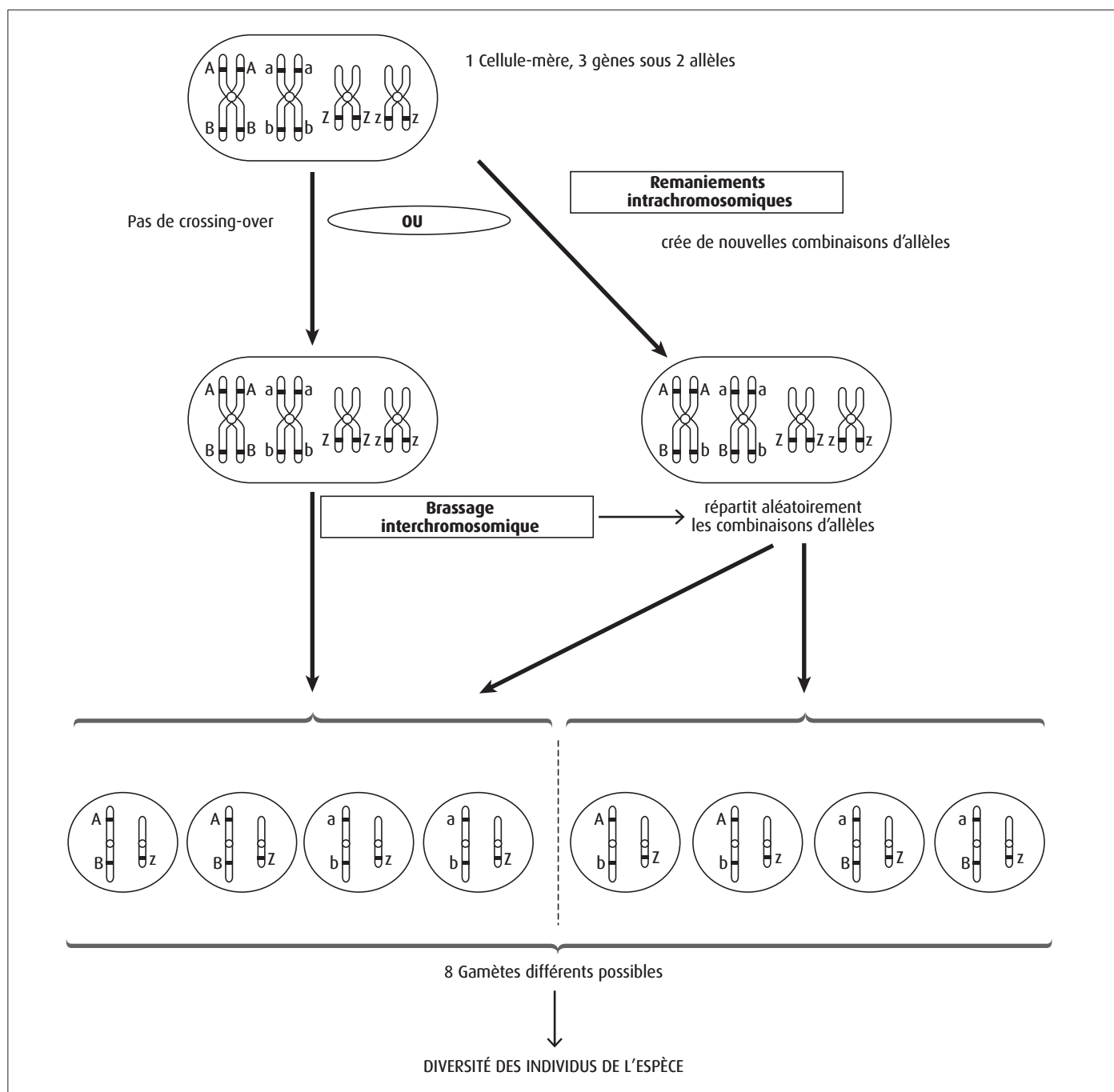
tions équivalentes (en moyenne 4% des descendants): [vg G B], [vg G se], [L b B], [L b se], qui correspondent à des individus issus de gamètes (produits par les femelles F1) ayant subi un crossing-over remaniant les gènes « couleur du corps » et « taille des ailes ».

3 DOC. 3 (Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique). La population mondiale est de 7 milliards d'individus. La combinaison des remaniements intrachromosomiques et du brassage interchromosomique de n gènes possédant chacun 2 allèles différents conduit à la formation de 2^n gamètes différents.

$$n = \log_2(7 \cdot 10^9) = 32,704$$

Donc seulement 33 gènes permettant d'obtenir une diversité théorique de gamètes supérieure à la population mondiale. Notons que notre génome compte quelque 20 000 gènes (**doc.5 p. 27**)

4 EN CONCLUSION (Communiquer en réalisant un schéma de synthèse).



Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Au cours de la fécondation, un gamète mâle et un gamète femelle s'unissent : leur fusion conduit à un zygote. La diversité génétique potentielle des zygotes est immense. Chaque zygote contient une combinaison unique et nouvelle d'allèles. Seule une fraction de ces zygotes est viable et se développe. • Objectifs et mots-clés. La fécondation est abordée à partir d'un exemple choisi chez une espèce animale présentant un cycle monogénétique diplophasique. (Collège, seconde, première. Première idée des mécanismes de la fécondation.) [Limites. Seules les notions de portée générale sont exigibles. Si l'élève doit pouvoir illustrer son propos par un exemple, aucun n'est imposé par le programme. Si l'on met en évidence la fusion des matériels nucléaires, les autres phénomènes cellulaires de la fécondation (réaction acrosomiale, réaction corticale, activation métabolique) sont hors programme.] Pistes. Approche mathématique du risque génétique.	• Observer et interpréter des observations microscopiques relatives à la fécondation (doc.1). - Réaliser une analyse statistique simple des résultats d'une fécondation (doc.3 et 4). - Décrire schématiquement un exemple de fécondation et ses conséquences génétiques (doc.1, 3 et 4). - Communiquer dans un langage scientifique approprié: conventions d'écriture, échiquier de croisement (doc.3 et 4). - Comprendre le lien entre des phénomènes naturels et le langage mathématique (doc.5).

Conseils et suggestions

- Cette unité vise à présenter la fécondation essentiellement sous l'angle génétique. Les observations microscopiques (**doc. 1**) permettent de mettre en évidence la fusion des matériels nucléaires des gamètes mâles et femelles, sans entrer dans le détail cytotologique, comme l'exige le programme. Les conséquences génétiques de la fécondation sont ensuite abordées (**doc. 3 à 5**).
- Les documents microscopiques (**doc. 1**) font partie d'une série de clichés réalisée pour l'étude « *Drosophila I-R hybrid dysgenesis is associated with catastrophic meiosis and abnormal zygote formation* » (voir le fichier de références sur le site compagnon du manuel (<http://www.libtheque.fr/svtlycee>)).
- L'observation de la fécondation peut être l'occasion de souligner les différences entre les mécanismes de la fécondation chez la drosophile (ovocyte bloqué en MI, spermatozoïde pénétrant en entier, globules polaires restant dans l'ovocyte avant de dégénérer) et chez l'Homme (ovocyte bloqué en MII, réaction acrosomiale, expulsion des globules polaires).
- Si les conditions locales permettent de se procurer des oursins mâles et femelles à maturité sexuelle, il pourrait être profitable de compléter les observations en microscopie à fluorescence par des observations en microscopie optique d'une fécondation réalisée chez l'oursin (voir <http://www.snv.jussieu.fr/vie/dossiers/oursin/oursinfec.htm>).
- Les données du **doc. 2** peuvent être l'occasion de comparer avec les données des techniques de PMA, comme les FIV. (<http://www.fivfrance.com/>).
- Cette unité se prête également à l'utilisation de logiciels de simulation de croisements, comme drosfly ou flylab (voir atelier *Science in English*). Il peut être profitable de proposer aux élèves un travail en réseau, avec mise en commun des résultats de comptage pour une plus grande validité statistique.
- Frantz Depaulis détaille davantage le calcul de la diversité des gamètes (**doc. 5**), en lien avec le pool de gamètes disponibles et

l'effectif de la population, sur le site compagnon du manuel.

- Le brassage génétique lors de la fécondation a également des implications dans le domaine médical. L'exercice **5 p. 37** conduit à évaluer un risque génétique au sein d'une famille touchée par des cas de phénylcétonurie.
- L'exercice **6 p. 38** présente un exemple de brassage interchromosomique et permet de faire travailler les élèves sur un échiquier de croisement simple mettant en évidence le brassage génétique lors de la fécondation.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Extraire des informations à partir de documents microscopiques, organiser ces informations, communiquer par écrit*)

Les étapes clés de la fécondation sont :

- Pénétration du spermatozoïde dans l'ovocyte. (note: contrairement à ce qui se passe chez l'Homme, chez la drosophile le spermatozoïde entier pénètre).
- Fin de la méiose de l'ovocyte (qui était bloqué en MI chez la drosophile, en MII chez l'Homme)
- Migration des pronucléi mâle et femelle.
- Accolement des pronucléi mâle et femelle.
- Fusion des matériels génétiques des pronucléi lors de la première mitose de l'embryon.

2 DOC. 2 (*Extraire des informations*) Sur 100 ovocytes qui rencontrent des spermatozoïdes, 80 seront fécondés, 40 (50 % des 80 fécondés) subissent la nidation, et au final 26 (65 % des 40 précédents) seront à l'origine d'une naissance. Donc 26 % des ovocytes rencontrant des spermatozoïdes conduiront à la naissance d'un individu.

Gamètes produits par les parents	vg $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ se	L $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ se	vg $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ B	L $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ B
vg $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ se	[vg se]	[L se]	[vg B]	[L B]
L $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ se	[L se]	[L se]	[L B]	[L B]
vg $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ B	[vg B]	[L B]	[vg B]	[L B]
L $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ B	[L B]	[L B]	[L B]	[L B]

Phénotypes des descendants

3 DOC. 3 (*S'informer, raisonner et communiquer dans un langage scientifiquement approprié*)

[v se]: 1/16 ; [L se]: 3/16 ; [vg B]: 3/16 ; [L B]: 9/16 (tableau ci-contre)

4 DOC. 4 (*S'informer, raisonner et communiquer dans un langage scientifiquement approprié*)

Les résultats observés (tableau ci-dessous) sont cohérents avec la réalisation de crossing-over, chez les femelles uniquement, entre les locus des gènes « taille des ailes » et « couleur du corps ».

Non-recombinés					recombinés			
♀ \ ♂	G $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ B	G $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ se	b $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ B	b $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ se	G $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ B	G $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ se	b $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ B	b $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ se
G $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ B	$\left(\frac{GL}{GL}, \frac{B}{B} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{GL}{GL}, \frac{se}{B} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{bvg}{GL}, \frac{B}{B} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{bvg}{GL}, \frac{se}{B} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{Gvg}{GL}, \frac{B}{B} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{Gvg}{GL}, \frac{se}{B} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{bL}{GL}, \frac{B}{B} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{bL}{GL}, \frac{se}{B} \right)$ [GLB]
G $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ se	$\left(\frac{GL}{GL}, \frac{B}{se} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{GL}{GL}, \frac{se}{se} \right)$ [GLse]	$\left(\frac{bvg}{GL}, \frac{B}{se} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{bvg}{GL}, \frac{se}{se} \right)$ [GLse]	$\left(\frac{Gvg}{GL}, \frac{B}{se} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{Gvg}{GL}, \frac{se}{se} \right)$ [GLse]	$\left(\frac{bL}{GL}, \frac{B}{se} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{bL}{GL}, \frac{se}{se} \right)$ [GLse]
b $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ B	$\left(\frac{GL}{bvg}, \frac{B}{B} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{GL}{bvg}, \frac{se}{B} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{bvg}{bvg}, \frac{B}{B} \right)$ [bvgB]	$\left(\frac{bvg}{bvg}, \frac{se}{B} \right)$ [bvgB]	$\left(\frac{Gvg}{bvg}, \frac{B}{B} \right)$ [GvgB]	$\left(\frac{Gvg}{bvg}, \frac{se}{B} \right)$ [GvgB]	$\left(\frac{bL}{bvg}, \frac{B}{B} \right)$ [bLB]	$\left(\frac{bL}{bvg}, \frac{se}{B} \right)$ [bLB]
b $\frac{+}{-}$ $\frac{+}{-}$ se	$\left(\frac{GL}{bvg}, \frac{B}{se} \right)$ [GLB]	$\left(\frac{GL}{bvg}, \frac{se}{se} \right)$ [GLse]	$\left(\frac{bvg}{bvg}, \frac{se}{se} \right)$ [bvgB]	$\left(\frac{bvg}{bvg}, \frac{se}{se} \right)$ [bvgse]	$\left(\frac{Gvg}{bvg}, \frac{B}{se} \right)$ [GvgB]	$\left(\frac{Gvg}{bvg}, \frac{se}{se} \right)$ [Gvgse]	$\left(\frac{bL}{bvg}, \frac{B}{se} \right)$ [bLB]	$\left(\frac{bL}{bvg}, \frac{se}{se} \right)$ [bLse]

Phénotypes	Fréquence attendue en absence de crossing-over	Fréquence attendue en présence de crossing-over chez la femelle	Fréquence observée
[G L B]	9/16	>15/32 (47%)	54%
[G L se]	3/16	>5/32 (16%)	15%
[b vg B]	3/16	<3/32 (9%)	4%
[b vg se]	1/16	<1/32 (3%)	1.2%
[b L B]	-	<3/32 (9%)	3.3%
[b L se]	-	<1/32 (3%)	0.8%
[G vg B]	-	>3/32 (9%)	16%
[G vg se]	-	>1/32 (3%)	5.7%

5 DOC. 5 (*Comprendre le lien entre des phénomènes naturels et le langage mathématique*). D'après le doc. 3 p. 25, en présence de n gènes possédant chacun 2 allèles différents, 2ⁿ gamètes différents sont théoriquement possibles. Cela correspond à la borne supérieure possible de gamètes différents (tous les gènes sont hétérozygotes et tous les gènes peuvent être séparés par crossing-over). Suite à la fécondation, il pourra donc en théorie y avoir m = 2ⁿ x 2ⁿ = 2²ⁿ zygotes différents.

6 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*).

La fécondation peut être considérée comme 2 tirages aléatoires d'un gamète parmi une quasi-infinité de gamètes possibles. La combinaison d'allèles portée par un zygote est donc unique. Ainsi, la fécondation participe à la diversité génétique d'une espèce.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
Des anomalies peuvent survenir. Un crossing-over inégal aboutit parfois à une duplication de gène. Un mouvement anormal de chromosomes produit une cellule présentant un nombre inhabituel de chromosomes. Ces mécanismes, souvent sources de troubles, sont aussi parfois sources de diversification du vivant (par exemple à l'origine des familles multigéniques).	- Extraire et exploiter des informations (schéma, tableau, graphique, observations microscopiques) pour comprendre les conséquences d'anomalies lors des remaniements intrachromosomiques (doc.1 et 2) et lors du brassage interchromosomique (doc.3, 4 et 5). - Illustrer schématiquement les mécanismes expliquant certaines anomalies chromosomiques.

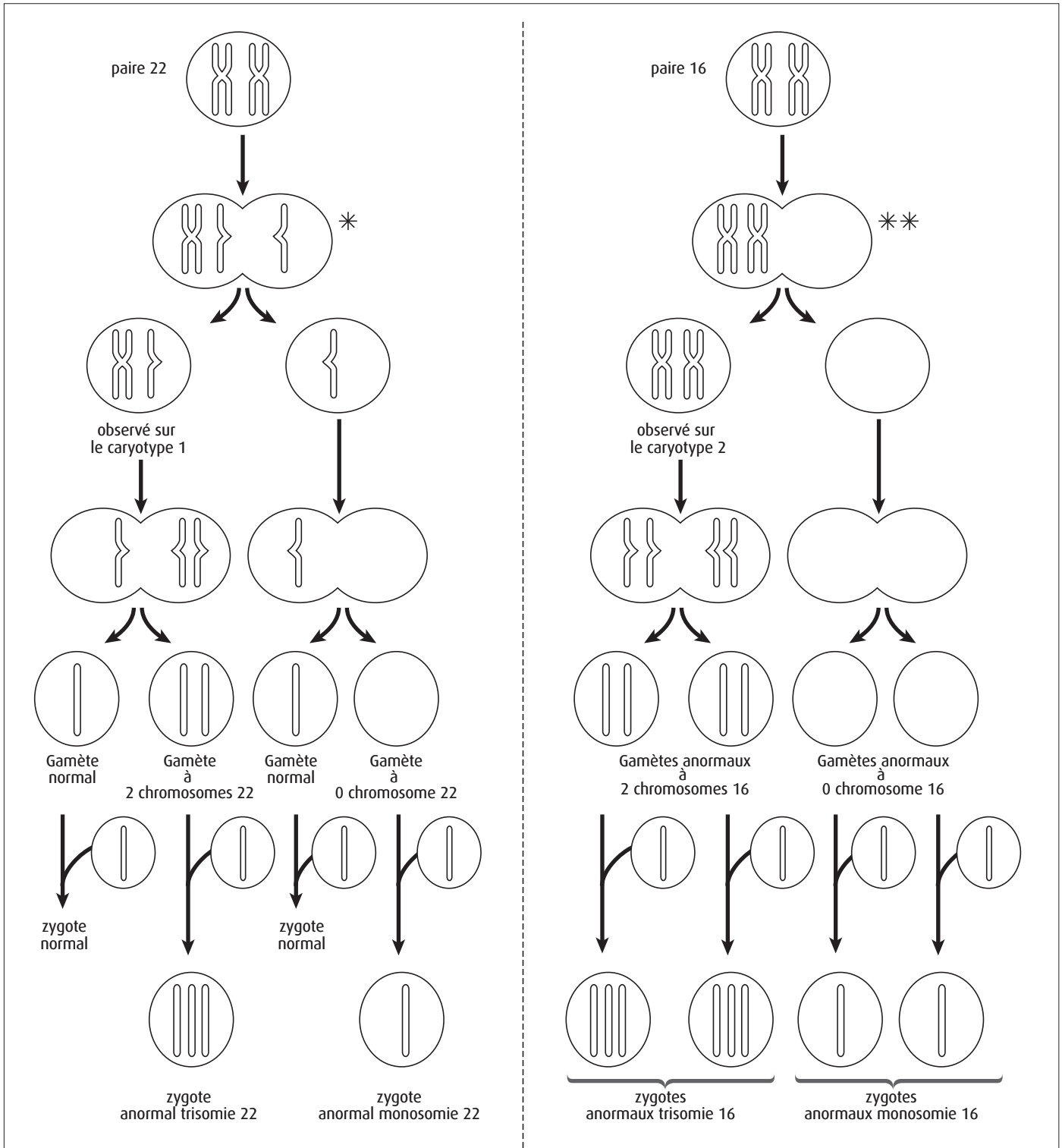
Conseils et suggestions

- Les **unités 2 et 3** ont présenté les mécanismes mis en jeu lors du déroulement de la méiose, notamment les crossing-over et la répartition aléatoire des chromosomes puis des chromatides dans les cellules filles lors des deux étapes d'anaphase. Cette unité s'intéresse aux perturbations pouvant survenir à ces étapes et à leurs conséquences, tant positives que négatives, pour l'individu et pour l'espèce.
- Le **doc. 1** explicite le mécanisme de crossing-over inégal, à l'origine des duplications de gènes. L'exercice **7 p. 38** reprend les travaux de Morgan et Sturtevant qui ont permis de montrer que des modifications du nombre de copies d'un gène étaient associées au mécanisme de crossing-over (*The Effects of unequal Crossing Over at the Bar Locus in Drosophila*, Sturtevant, 1924).
- Le **doc. 2** présente l'importance du mécanisme de duplication de gènes dans l'évolution, en s'appuyant sur l'exemple de la famille multigénique des gènes Hox, exemple qui sera repris dans **l'unité 1 du chapitre 2** (modifications du développement et diversification du vivant). On peut également rappeler l'exemple de la famille multigénique des opsines, étudié en classe de 1^{re} S.
- Un article précisant l'importance de la duplication des gènes dans l'évolution des génomes est disponible sur le site de La Recherche : <http://www.larecherche.fr/content/recherche/article?id=25131>.
- Le **doc. 4** permet de mettre en évidence des anomalies chromosomiques ou chromatidiennes au niveau des ovocytes, anomalies qui auront des conséquences sur le caryotype du zygote éventuellement formé.
- Le **doc. 5** permet de faire le lien entre les anomalies chromosomiques des ovocytes et leur vieillissement. Il permet donc de comprendre pourquoi l'âge maternel est un facteur de risque des maladies chromosomiques.

Exploitation des documents par les activités

- DOC. 1** (*Extraire des informations d'un schéma*). Si un crossing-over inégal se produit en prophase I de méiose, alors cette méiose conduit à la formation de 4 cellules-filles dont seulement 2 posséderont des chromosomes intacts (1^{er} et 4^e sur la schéma). Un des gamètes aura un chromosome incomplet (2^e sur le schéma), amputé d'une partie de son matériel génétique. Un autre (3^e sur le schéma) portera une portion de matériel génétique supplémentaire. Si cette région additionnelle comporte un gène, alors une des cellules filles ne portera pas ce gène et l'autre le possèdera en 2 exemplaires.
Ce phénomène est favorisé par la présence de séquences répétées, au niveau desquelles l'appariement des chromosomes homologues lors de la prophase I ne s'effectue pas correctement.
- DOC. 2 ET 3** (*S'informer à partir d'une interview, d'un schéma et d'un tableau*). Les anomalies lors des remaniements intrachromosomiques, comme les crossing-over inégaux, peuvent conduire à des duplications de gènes. Ce phénomène de duplication, associé aux mutations, entraîne la mise en place de familles multigéniques, comme la famille des gènes Hox, et donc participe à l'évolution de l'espèce.
Une anomalie lors du brassage interchromosomique, c'est-à-dire lors de la ségrégation des chromosomes homologues (anaphase I) ou des chromatides (anaphase II) peut conduire à la présence d'un chromosome surnuméraire (trisomie 21) ou absent (syndrome de Turner), ce qui a des conséquences négatives sur la santé de l'individu.

3 DOC. 4 (Extraire des informations et raisonner).



*: Il se produit une anomalie au niveau de l'anaphase I: il y a séparation des 2 chromatides d'un des chromosomes 22 et ségrégation d'une de ces chromatides avec l'autre chromosome de la même paire.

**: Il se produit une anomalie au niveau de l'anaphase I: il y a migration des 2 chromosomes homologues dans la même cellule-fille.

4 DOC. 5 (S'informer à partir d'un graphique pour formuler une hypothèse explicative). On observe une augmentation de la fréquence des anomalies chromosomiques dans les ovocytes avec l'âge maternel. Cette augmentation est surtout marquée après 45

(...)

ans : on passe de 5 % des ovocytes ayant une anomalie chromosomique (une chromatide surnuméraire ou absente) dans la tranche d'âge 31-34 ans, à 38 % chez les 42-46 ans. Ceci pourrait s'expliquer par le vieillissement des ovocytes. En effet, contrairement aux spermatozoïdes qui sont produits en continu à partir de la puberté chez l'homme, les ovocytes sont tous formés lors du développement embryonnaire de la future fille.

5 EN CONCLUSION (Communiquer en rédigeant une synthèse).

De nombreuses anomalies chromosomiques ont pour origine une anomalie lors du déroulement de la méiose. Ainsi, une duplication

de gène est due à un mésappariement des chromosomes homologues en prophase I de méiose, au niveau de séquences répétées, entraînant un crossing-over inégal. Une anomalie du nombre de chromosomes, ou aneuploïdie, est quant à elle due à une mauvaise répartition des chromosomes en anaphase I, ou des chromatides en anaphase II. Ces anomalies peuvent avoir des conséquences délétères pour l'individu (ex : trisomie 21), mais participent également à l'évolution des génomes (ex : duplication de gènes et familles multigéniques).

CHAPITRE 2 La diversification du vivant

UNITÉ 1 Modifications du développement et diversification du vivant [pp. 40-41 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« S'agissant des gènes impliqués dans le développement, des formes vivantes très différentes peuvent résulter principalement de variations dans la chronologie et l'intensité d'expression de gènes communs, plus que d'une différence génétique. »	- Comparer des gènes du développement pour en identifier les homologies de séquences. - Interpréter un changement évolutif en termes de modification du développement. - Voir aussi exercice 8 p.56

Conseils et suggestions

– La **page d'ouverture du chapitre** peut être utilisée pour faire une mise au point sur les différents niveaux de la biodiversité. Il sera également possible d'utiliser cette photo dans le cadre de la notion de symbiose (**unité 4**), montrant ainsi l'importance écologique du corail, organisme symbiotique.

– La comparaison de séquence pourra être mise en œuvre par l'utilisation du logiciel Anagène (**doc. 3**). Les séquences n'étant pas forcément disponibles au format Anagène, il est possible de les créer à partir des données de la base de données UNIPROT (uniprot.org). Voir par exemple le protocole sur le site pedagogie.ac-nantes.fr « fabriquer un fichier de séquences pour Anagène avec Mega 4.1 ». Les fichiers Anagène des protéines ici présentées sont fournis sur le site compagnon du manuel.

– La notion de gène homéotique n'est pas nécessaire pour traiter ce point du programme. En revanche la notion de gène du développement est indispensable. L'article paru dans *La Recherche* (n° 296, mars 1997 pp.66-69) permet de faire une mise au point sur le rôle de *Hox D13* dans la constitution des doigts (**doc. 4**). L'homologie des protéines *Hox D13* (du poisson zèbre et de la souris est plus élevé sur domaines fonctionnels des protéines (domaine se liant à l'ADN). Dans ce cas l'homologie s'élève à 93 %.

– La morphogénèse du bec des pinsons des Galápagos suite à des variations d'expression de *Bmp4* (**doc. 5 et 6**) peut être relié au polymorphisme intraspécifique (**chapitre 3, unité 1, p. 59**) de ces pinsons et aux variations du chant nuptial (donc à la spéciation) (**chapitre 3, unité 2, p. 60**). On montre ainsi que la diversification du vivant par variation d'expression de gène du développement peut conduire à une spéciation.

– **L'atelier Histoire des Sciences (p. 95)** permet aux élèves de faire une recherche documentaire sur les pinsons Galápagos et sur leur importance dans l'élaboration de la théorie de l'évolution.

Exploitation des documents par les activités

1 **DOC. 1 ET 2** Le gène *Hox D13* est un gène du développement il a donc un rôle clé dans la formation de la région où il s'exprime. Le document 2 montre qu'une mutation du gène *Hox D13* a pour conséquence une malformation des doigts. Donc le gène *Hox D13* semble jouer un rôle clé dans le développement des doigts chez l'Homme.

2 **DOC. 3 ET 4** La région du bourgeon du membre et la chronologie de l'expression de *Hox D13* n'est pas la même chez le poisson zèbre et chez la souris. Il s'exprime uniquement dans la partie basse du bourgeon chez le poisson zèbre, alors qu'il s'exprime dans la partie basse puis vers l'avant chez la souris.

3 DOC. 5 L'intensité de l'expression du gène *Bmp4* est plus élevée chez les pinsons à gros bec après 25h de développement et à la fois plus localisée et plus intense chez ces mêmes pinsons après 29h de développement. Cette région de l'embryon étant à l'origine du bec et ces deux espèces de pinsons possédant à l'âge adulte des becs de morphologie différente, on peut faire l'hypothèse que l'expression du gène *Bmp4* a des conséquences sur la taille du bec.

4 DOC. 6 Les résultats de sous expression et de surexpression artificielle du gène BMP4 chez des embryons de poulet montre clairement des conséquences au niveau de la taille du bec. Ceci confirme notre hypothèse : une plus forte expression du gène *Bmp4* chez l'embryon dans la future région du bec est à l'origine de la formation d'un bec de plus grande taille.

5 EN CONCLUSION Le gène *Hox D13* est présent chez les poissons zèbre et chez les mammifères et va dans tous les cas contribuer à la formation du membre antérieur. Néanmoins, la région précise et la chronologie d'expression varie, contribuant ainsi à la formation de deux membres antérieurs différents (nageoire et membre chirodien). Le gène *Bmp4* est présent chez les deux espèces de pinsons étudiées. Néanmoins il est davantage exprimé chez l'embryon du pinson à gros bec ce qui a pour conséquence un développement plus important du bec chez cette espèce. Dans ces deux exemples, on constate que les mêmes gènes (ou de gènes très proches) peuvent avoir des conséquences différentes sur le développement du fait d'une chronologie ou d'une intensité d'expression différente.

UNITÉ 2 Transferts de gènes entre espèce et diversification du vivant [pp. 42-43 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « D'autres mécanismes de diversification des génomes existent : [...] transfert par voie virale, ... »	• Étudier les modalités d'une modification du génome. • Voir aussi exercice 7 p.56

Conseils et suggestions

- Le rôle de la syncytine, produit d'un gène d'origine rétroviral, dans la formation du placenta est un caractère commun aux primates, mais pas aux mammifères placentaires. D'autres modalités sont à l'œuvre pour le développement du placenta chez les mammifères non primate.
- La comparaison de séquence entre la syncytine et la protéine d'enveloppe virale pourra être mise en œuvre par l'utilisation du logiciel Anagène (**doc. 3**). Les séquences n'étant pas forcément disponibles au format Anagène, il est possible de les créer à partir des données de la base de données UNIPROT (uniprot.org). Voir par exemple le protocole sur le site pedagogie.ac-nantes.fr « fabriquer un fichier de séquences pour Anagène avec Mega 4.1 ». Les fichiers Anagène des protéines ici présentées sont fournis sur le site compagnon du manuel.
- Les régions Fv et Fh des protéines sont les domaines d'interaction avec les protéines réceptrices. L'homologie est plus grande au niveau de ces domaines.
- Les transferts de gènes, s'ils sont fréquents chez les bactéries, sont relativement rares chez les eucaryotes. Malgré tout quelques transferts de gènes horizontaux ont une importance majeure du fait de leur conséquence sur l'écologie des groupes concernés (voir notamment les exemples **doc. 6**). Pour une mise au point, lire *Pour La Science* n° 400 pp.50-56, *L'Évolution par fusion* de M.-A. Selosse ou *Aux origines de la sexualité*, Chapitre 3, Pierre-Henri Gouyon,

Alexandrine Racinais *Édition Fayard*, 2009. Chez l'homme la plupart des gènes d'origine rétrovirale sont à l'origine de cancers. Ce qui n'est pas le cas de la syncytine.

Exploitation des documents par les activités

- 1 DOC. 1 ET 2** L'expression de la syncytine dans des cellules qui ne peuvent initialement pas fusionner entre elle permet leur fusion en grandes cellules à plusieurs noyaux (**doc. 2** à droite). Dans un contexte naturel, elle permet probablement la fusion des cellules en cellules géantes plurinucléées nécessaire à la formation du placenta.
- 2 DOC. 3 ET 4** La forte homologie entre les séquences d'acides aminés des deux protéines (**doc. 3**) et notamment entre les parties Fv et Fh plaide pour un apparentement (origine commune) de ces deux séquences. Par ailleurs, la structure spatiale identique et la fonction de fusion des membranes (virus - cellule pour la protéine d'enveloppe, cellule - cellule pour la syncytine) sont deux arguments qui vont dans sens de cette parenté.
- 3 DOC. 5 ET 6** Dans le cas des ascidies, elles ont acquis par transfert du gène de synthèse de la cellulose la capacité à synthétiser une tunique contenant de la cellulose, molécule que peu d'animaux prédateurs peuvent digérer. Pour les nématodes, se nourrissant

(...)

de végétaux en ayant acquis le gène de la cellulase, ils peuvent digérer la cellulose et par conséquent avoir accès à une nouvelle source alimentaire. Par ailleurs, la cellulase facilite leur pénétration dans les tissus végétaux. Enfin, les pucerons qui synthétisent des caroténoïdes ont un phénotype différent de par leur couleur. On peut imaginer que ces couleurs différentes ont des conséquences sur leur reconnaissance par les prédateurs.

4 EN CONCLUSION Les transferts des gènes permettent aux organismes qui les reçoivent d'acquérir de nouvelles fonctions. Il peut s'agir par exemple de la capacité à synthétiser une molécule (la cellulose), ou une enzyme digestive (la cellulase). Dans tous les cas, l'acquisition des gènes contribue à modifier les phénotypes des espèces qui les reçoivent. Il s'agit donc d'une diversification génétique du vivant par acquisition de nouveaux gènes.

UNITÉ 3 Association de génomes et diversification du vivant

[pp. 44-45 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « D'autres mécanismes de diversification des génomes existent : hybridations suivies de polyploïdisation (p.44, exercice 4 p. 68 et doc. 1 p. 244) » • « Une diversification des êtres vivants est aussi possible sans modification des génomes : associations (dont symbioses) par exemple. » (voir aussi unité 4)	• Étudier les modalités d'une modification du génome. • Voir aussi exercice 4 p. 54

Conseils et suggestions

- En plus de l'exemple de la spartine, des exemples de spéciations par hybridation sont détaillés dans **l'exercice 4 p. 68** (Galeopsis, exemple historique) et dans le **doc. 1 p. 244** (histoire des blés). On pourra insister sur la fréquence des hybridations chez les plantes et sur l'importance de ce mécanisme dans l'histoire évolutive des angiospermes.
- Cet exemple d'hybridation suivi de polyploïdisation peut également être utilisé comme exemple de spéciation dans le **chapitre 3, unité 2, p. 60**
- L'exemple de l'endosymbiose du chloroplaste peut être élargi à l'exemple de la mitochondrie ou celui des cryptophytes (**exercice 4 p. 54**), montrant ainsi que ce phénomène n'est pas unique. Un lien pourra être fait avec le programme de spécialité, partie « Énergie et cellule vivante ».
- Un arbre du vivant permettra de remplacer différents événements d'endosymbiose dans l'histoire du vivant et permettra de montrer la récurrence de ce phénomène (voir par exemple *De Revier, Biologie et phylogénie des Algues, Tome 1, Belin Sup*).
- On pourra citer le cas des xanthelles chez les coraux (**doc. 5 p. 47**) ou des Rhizobium chez les légumineuses (**exercice 6 p. 55**) comme exemple d'une symbiose intracellulaire actuelle. Dans ces deux cas, les symbiotes peuvent néanmoins vivre libres hors de leur hôte, contrairement au chloroplaste non indépendant génétiquement.

Exploitation des documents par les activités

- 1 DOC. 1 ET 2** D'après les nombres de chromosomes des différentes spartines et compte tenu de l'ordre d'apparition de ces différentes espèces en Europe, nous pouvons faire le scénario suivant : *Spartina alterniflora* ($2n=62$) et *Spartina anglica* ($2n=60$) sont les espèces parentales, l'introduction de *S. alterniflora* en Europe a permis leur croisement. L'hybride obtenu est *S. x townsendi* ($2n=61$), stérile. Ensuite accidentellement est survenu chez des individus de *S. x townsendi* un doublement accidentel des chromosomes à l'origine de la formation d'une nouvelle espèce *S. anglica* ($2n=122$).
- 2 DOC. 3 À 5** Le chloroplaste et les cyanobactéries présentent des caractéristiques communes (qui les différencient des caractéristiques des Eucaryotes) : présence de chlorophylle sur la membrane des thylakoïdes, l'ADN est circulaire, les ribosomes sont « légers ».
- 3. DOC. 3 A 5.** Un eucaryote ayant acquis une cyanobactérie (devenue par la suite chloroplaste) par endosymbiose acquiert également la capacité à effectuer la photosynthèse.
- 3 EN CONCLUSION** Dans le cas de l'hybridation, comme dans le cas de l'endosymbiose, deux génomes sont associés au sein d'un même organisme. Ce nouvel organisme a un phénotype différent des phénotypes parentaux, il peut être à l'origine d'une nouvelle espèce, il s'agit donc bien d'une diversification du vivant.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Une diversification des êtres vivants est aussi possible sans modification des génomes : associations (dont symbioses) par exemple. »	- Étudier un exemple de diversification du vivant sans modification du génome. - Voir aussi exercice 6 p.55 et Objectif Bac 4 p.93.

Conseils et suggestions

- Cette unité a pour objectifs, à travers des exemples de symbiose, de montrer que c'est un phénomène biologique fréquent avec une grande importance écologique et par ailleurs qu'une symbiose modifie les phénotypes (morphologique, physiologique et écologique) des deux partenaires, contribuant ainsi à la diversification du vivant.
- Pour une mise au point sur les symbioses, leur fonctionnement et leur importance écologique et évolutive, on pourra lire « *La symbiose* », M. A. Selosse, Vuibert, 2000.
- Les exemples choisis ici sont des exemples très courants de symbiose, on trouvera un autre exemple classique dans l'exercice 6 p. 55 (symbiose *Rhizobium* / légumineuse).
- Il est tout à fait envisageable dans une séquence introductive de faire observer des organismes symbiotiques aux élèves : coloration au bleu coton lactique (spécifique des mycélium) d'une racine d'Ericacée par exemple (Bruyère ou Callune), coupe dans un lichen montrant les algues symbiotiques (préférer un lichen foliacée type *Xanthoria sp.* ou *Parmelia sp.*).
- L'exercice 7 p. 75 du manuel élève Belin de seconde peut également être utilisé pour illustrer les menaces qui pèsent sur le corail en tant qu'organisme symbiotique.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 À 3 Les filaments des mycorhizes permettent aux plantes d'explorer un plus grand volume de sol (**doc. 3**). En conséquence, l'accès aux éléments minéraux est facilité et ceci

explique probablement la plus forte biomasse observée chez les individus mycorhizés (**doc. 2**). Pour le champignon, les mycorhizes permettent le transfert des glucides d'origine photosynthétique provenant de la plante (**doc. 3**).

2 DOC. 3 Le phénotype de l'arbre est modifié car en accédant à davantage de substances nutritives du sol, sa biomasse est plus grande. Les avantages sont réciproques, puisque le champignon accède également à des substances nutritives en provenance de l'arbre. Il s'agit donc bien d'une relation à bénéfice réciproque ou symbiose.

3 DOC. 4 ET 5 Les coraux, par exemple, vivent dans des milieux pauvres en nutriments. Les polypes n'auraient pas assez de proies pour y vivre seul, les algues pas assez d'éléments minéraux dans l'eau. En s'associant dans une symbiose, l'algue utilise les déchets du polype comme source de minéraux et le polype reçoit un complément de nourriture sous forme de produits photosynthétiques fabriqués par l'algue. De la même façon, les lichens sont des champignons abritant une algue. Le champignon retient l'eau et les éléments minéraux et favorise la survie de l'algue, l'algue transmet là encore ses produits photosynthétiques. Les lichens peuvent se développer dans des milieux de vie difficile (comme les rochers ou les toits) ou aucun des deux partenaires n'aurait pu survivre.

4 EN CONCLUSION Les associations symbiotiques modifient le phénotype des deux partenaires. L'organisme symbiotique a ainsi des caractéristiques nouvelles qu'aucun des deux partenaires n'a seul. En ce sens les symbioses sont une source de diversification du vivant.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « En outre une diversification des êtres vivants n'est pas toujours liée à une diversification génétique. » • « Chez les vertébrés, le développement de comportements nouveaux, transmis d'une génération à l'autre par voie non génétique est aussi source de diversité : chants d'oiseaux, utilisation d'outils, etc. »	• Étudier un exemple de diversification du vivant sans modification du génome. • Voir aussi exercice 5 p. 55

Conseils et suggestions

- Cette unité vise à illustrer l'apparition d'un nouveau comportement et sa propagation par des modalités non génétiques (imitation et apprentissage).
- Un exemple de diversité des comportements au sein de différentes populations de chimpanzés est donné dans le **doc. 6 p. 79**. L'exemple des macaques japonais peut permettre de proposer des hypothèses à l'origine de cette diversité chez les chimpanzés.
- Un autre exemple d'apparition d'un nouveau comportement suivi d'une propagation par imitation est donné dans l'**exercice 5 p. 55**. Dans le cas du macaque comme dans le cas des mésanges, l'apparition du nouveau comportement a été induite volontairement (macaque) ou involontairement (mésange) par l'homme et a ainsi facilité son observation.
- Ces exemples témoignent également d'une modification comportementale en réponse à une modification de l'environnement.
- L'exemple du bruant à couronne blanche permet d'illustrer la transmission non génétique du comportement de chant. Il n'y pas ici à proprement parler d'apparition d'un nouveau comportement pour l'espèce bruant, en revanche, la capacité pour un bruant à apprendre un chant d'une autre population peut être à l'origine d'une diversification au sein de sa population.
- Les pratiques culturelles et les langues humaines sont également des manifestations de transmission non génétiques contribuant à une diversification du vivant.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 À partir de l'apparition du nouveau comportement de lavage de blé, on constate que la propagation est assez rapide et passe d'un individu ayant acquis ce comportement en 1956 à

vingt l'ayant acquis ou étant en cours d'acquisition 6 ans plus tard (**doc. 1**). D'après le document 2, on constate que les macaques japonais apprennent en s'imitant au contact les uns des autres. Or ces contacts s'effectuent majoritairement entre jeunes ou entre les jeunes et leur mère. Ceci explique probablement les résultats du document 1 dans lequel on observe une plus forte acquisition du nouveau comportement chez les femelles (graphique du haut et du bas) et chez les jeunes (graphique du bas). Les mâles plus solitaires apprennent ce comportement plus rarement et plutôt lorsqu'ils sont jeunes.

2 DOC. 3 ET 4 Les bruants à couronne blanche apprennent leur chant d'adulte entre l'âge de 10 à 50 jours. Les bruants qui n'entendent aucun chant à cette période ne peuvent pas faire de chant d'adulte clair. Le chant chez le bruant n'est donc pas inné. L'origine de l'œuf n'a pas d'influence sur le chant que le bruant peut apprendre et si le chant entendu entre 10 à 50 jours est différent de celui de sa population de naissance, son chant d'adulte sera celui du chant entendu. Ces expériences montrent qu'un comportement peut avoir une base génétique (la capacité à apprendre un chant) mais peut néanmoins présenter des variations (en fonction de l'origine géographique ou des chants entendus au cours de la vie).

3 EN CONCLUSION Dans l'exemple du nouveau comportement apparu chez les macaques japonais, on constate qu'une innovation comportementale peut se propager dans une population par imitation (une voie non génétique) contribuant ainsi à une diversification du vivant. La diversité des comportements (des chants en l'occurrence) que l'on observe chez les bruants à couronne blanche peut également être transmise à un individu d'une autre population par apprentissage et non pas par une transmission génétique (de parents à descendants).

UNITÉ 1

Les modifications des populations au cours du temps

[pp. 58-59 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « Sous l'effet de la pression du milieu, de la concurrence entre êtres vivants et du hasard, la diversité des populations changent au cours des générations. (doc. 4 à 7 p. 59) L'évolution est la transformation des populations qui résultent de ces différences de survie et du nombre de descendants. (Doc. 3 p. 58 et 7 p. 59) » • « On insistera sur l'existence d'une survie différentielle (doc. 4 à 7 p. 59) et sur la diversité de l'effectif des descendants des individus qui conduisent à une modification des populations. Sélection naturelle (doc. 4 à 7 p. 59) et dérive génétique (doc. 1 à 3 p. 58) sont replacées dans ce cadre global. »	• Analyser une situation concrète, à partir d'arguments variés : données génétiques (doc. 1 et 3 p. 58, exercices 4 p. 68 et 5 et 6 p. 69), paléontologiques (doc. 3 p. 62, exercice 9 p. 70), biologiques (doc. 4 à 7 p. 59), arbres phylogénétiques (exercice 9 p. 70).

Conseils et suggestions

– Cette unité a pour objectif d'illustrer les modifications de la diversité des populations au cours du temps, fondements de l'évolution biologique.

– Le document 1 correspond à une expérience historique de Dobzhansky mettant en évidence la dérive. Il s'agit ici d'un rappel de la classe de seconde.

– Au-delà de l'exemple de la porphyrie variegata en Afrique du Sud, l'effet de fondation a été plusieurs fois décrit dans les populations humaines. Un exemple de groupe fondateur composé de 7200 français migrant au Québec en 1620 a été décrit. Ils sont à l'origine d'une forte fréquence (1/1000) d'une maladie génétique, la dystrophie musculaire oculopharyngée (DMOP). Cette forte fréquence a d'ailleurs permis d'isoler plus facilement le gène concerné. La maladie ne se manifestant qu'après 50 ans, il n'y a pas d'effet sélectif. Pour plus d'information voir les travaux de Bernard Brais de l'Université Mc Gill.

– Pour faciliter la compréhension de l'effet de fondation (ou effet fondateur) et montrer ainsi le rôle du hasard dans l'évolution des populations, il peut être utile d'avoir recours à un ensemble de pions (ou de billes) de 2 ou 3 couleurs différentes (la population initiale ou population mère). Faire un tirage aléatoire (le « choix » des migrants) d'un petit nombre de pions qui représenteront la population migrante. Faire calculer la proportion d'une des couleurs dans la population mère et la proportion de la même couleur dans la population migrante. On constate que ces proportions varient aléatoirement et explique les modifications de fréquence allélique au moment d'un événement de fondation. On pourra rappeler que le petit effectif de la population fondatrice la soumet après fondation à une dérive importante pouvant à nouveau faire varier rapidement les fréquences alléliques.

– En ce qui concerne l'action de la sélection naturelle sur la population des pinsons des Galapagos, lors de la sécheresse de 1977, le document clé est le **document 5**. Il permet de montrer le polymorphisme du bec au sein de la population de pinsons. Ce polymorphisme diminue considérablement après la sécheresse, montrant ainsi qu'un processus de sélection est aussi une perte de diversité. Ce graphique montre également la baisse d'effectifs différentielle consécutive à la sécheresse et la modification de la taille moyenne du bec au sein de la population. Cet exemple permet notamment de s'affranchir du biais de la reproduction dans le raisonnement, puisque les individus présents en fin de sécheresse étaient présents au début. Néanmoins la reproduction intervient ensuite, puisque seuls les survivants pourront avoir une descendance !

Exploitation des documents par les activités

TÂCHE COMPLEXE L'ensemble de ces documents traite de la modification des caractéristiques des populations au cours du temps, c'est-à-dire de l'évolution des populations.

Dans le document 1, on observe qu'au cours des générations, les différentes populations (qui initialement avaient la même proportion de marqueur PP) se différencient les unes des autres par des proportions de marqueur PP très différentes. Il s'agit d'une situation de dérive génétique, au cours duquel les fréquences d'un élément génétique (ici le marqueur PP) varient dans le temps. Le document 3 montre qu'une petite population initiale de migrants en Afrique du Sud contenait une proportion inhabituelle de porteur de la porphyrie variegata (un couple sur 800 colons), cette forte proportion initiale se répercute toujours sur les populations descendantes de

(…)

ces migrants avec 1 personne sur 100 touchée par la maladie. On constate que cette proportion a même augmenté, probablement, à cause de la forte dérive génétique (plus importante dans les petites populations). En comparaison la population néerlandaise d'origine ne compte qu'une personne atteinte sur 100 000. C'est donc un cas d'effet fondateur dans lequel la fréquence des allèles portés par les migrants ne reflète pas celui de la population initiale (ce n'est pas un échantillon représentatif). La présence et le ratio des allèles dans la population migrante sont des effets du hasard.

Dans le cas des pinsons des Galápagos, il semble que les pinsons à bec moyen soient moins efficaces pour consommer les gros fruits que les pinsons à gros bec (**doc. 4**). Dans un contexte de sécheresse au cours duquel l'indice de dureté des graines augmente, alors que les graines deviennent plus rares (**doc. 6**), les pinsons à bec moyen vont entrer en compétition avec les pinsons à gros bec et risquent d'avoir des difficultés à se nourrir. Au sein des pinsons à bec moyen, certains ont des tailles de bec un peu plus grandes et

seront donc mieux adaptés pour se nourrir de graines dures en cas de sécheresse. Le document 5 montre que lors de la sécheresse de 1977, la survie des pinsons à bec moyen avec les becs les plus gros a été meilleure. De fait la taille moyenne du bec a augmenté, chez une population dont les effectifs ont considérablement diminué (**doc. 5 et 7**). Il s'agit d'un cas de sélection naturelle ou l'environnement (sécheresse) et la concurrence avec une autre espèce (pinson à gros bec) sont des pressions de sélection. Dans ce contexte, les individus présentant une petite variation individuelle (taille de bec plus gros) ont eu une meilleure survie (survie différentielle en fonction de la taille du bec). Ces individus pourront ainsi se reproduire et contribueront davantage à la génération suivante (reproduction différentielle). Dans cette génération suivante, les pinsons à bec moyen auront en moyenne des becs de plus grande taille. Il s'agit d'un cas de sélection naturelle conduisant à une évolution des populations.

UNITÉ 2

De l'évolution des populations à l'évolution des espèces

[pp. 60-61 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Une espèce peut être considérée comme un ensemble d'individus suffisamment isolés génétiquement des autres populations. (doc. 1 à 4 pp. 60-61) • Une population d'individus identifiée comme constituant une espèce n'est définie que durant un laps de temps fini. (doc. 4 p. 61)	• Analyser des exemples de spéciation dans des contextes et selon des mécanismes variés à partir de documents fournis (Doc. 1 à 3 p. 60, exercices 4, 5, 6 et 9 pp. 68-70).

Conseils et suggestions

- Cette unité a pour objectif de montrer des exemples de spéciations et d'expliquer le lien entre l'évolution des populations, l'isolement reproducteur et la spéciation.
- D'autres exemples ont été placés en exercices (**4, 5 et 9 pp. 68-70**)
- Dans le document 1, on utilise à nouveau l'exemple des pinsons des Galapagos, permettant ainsi de faire un lien direct entre la modification d'expression génétique (*Bmp4*) à l'origine du polymorphisme de la taille de bec (**Chapitre 2, Unité 1, p. 41**), la sélection naturelle qui peut s'exercer sur ce polymorphisme et contribuer à faire évoluer la taille du bec au sein des populations (**p. 59**) et la conséquence que cela peut avoir sur l'isolement reproducteur. Un résultat remarquable ici est la préférence des pinsons à bec moyen pour un partenaire ayant approximativement la même taille de bec que lui (graphique de droite). Ceci explique la possibilité de la mise en place d'un isolement reproducteur (ici assez marqué). Les époux Grant, auteurs de ces travaux, ont remarqué que les tailles de bec fluctuaient facilement selon le climat d'une saison donnée, il faut donc une succession de plusieurs années avec des climats

similaires pour qu'un isolement reproducteur complet puisse survenir. Pour une mise au point, on pourra lire *Pour la Science, HS L'évolution, 2007. La sélection naturelle et les pinsons de Darwin de Peter Grant*.

- **L'atelier Histoire des Sciences (p. 95)** permet aux élèves de faire une recherche documentaire sur les pinsons des Galápagos et sur leur importance dans l'élaboration de la théorie de l'évolution. Plus largement, ce travail documentaire pourra notamment montrer que la théorie de l'évolution est un travail de mise en cohérence de faits et n'est pas une démarche idéologique. On pourra par exemple se reporter au DVD édité par Arte Vidéo : *Le grand voyage de Darwin* et au site Sagascience du CNRS cité dans l'atelier.
- Les exemples de modification de caryotypes sans modification notable des génomes, observés ici chez les souris (**doc. 2**), sont assez fréquents. L'exemple des muntjacs (**exercice 5 p. 69**) en témoigne.
- Les trois exemples cités sur la page de droite correspondent à des degrés différents d'isolement reproducteur : un isolement entre deux sous populations dans le cas des pinsons (**doc. 1**) sans spéciation, un isolement reproducteur réel chez les souris, indiquant qu'il s'agit là d'espèces distinctes mais les accouplements sont

possibles et donnent des hybrides stériles (**doc. 2**) et enfin un isolement quasiment total entre deux espèces très proches, même en conditions artificielles (les accouplements sont difficiles à obtenir et sont sans effet).

– La disparition d’une espèce par disparition de son isolement reproducteur relève une ambiguïté (exemple du chat sauvage **doc. 5**). Si les individus de cette espèce peuvent se reproduire avec des individus d’une autre espèce, cela signifie que les espèces n’étaient pas distinctes. La probabilité de reproduction doit alors entrer en compte : ici les chats se reproduisent entre eux dans des milieux anthropisés, dans lesquels l’Homme a créé les conditions de leur rencontre, et malgré cela les accouplements sont rares (beaucoup plus rares qu’au sein des espèces). En toute rigueur, il faudrait parler d’un isolement reproducteur qui n’est pas total.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 À 4 En ce qui concerne les pinsons à bec moyen des îles Galápagos, le document 1 (à droite) montre que les tailles de bec jouent un rôle dans la constitution des couples. Les femelles à bec épais s’appariant avec les mâles à bec épais et inversement pour les becs peu épais. On peut donc supposer qu’il y a un début d’isolement reproducteur entre la population à bec peu épais et la population à bec épais de cette espèce. Néanmoins, sur le document 1 à gauche, on constate que s’il existe deux tailles de bec principales (2,2 u.a. environ et 4,5 u.a. environ), les tailles intermédiaires existent toujours : les populations « bec épais » et « bec peu épais » ne sont donc probablement pas complètement isolées et font toujours partie de la même espèce. En revanche chez les souris de Madère, si la reproduction est possible, la stérilité des hybrides stériles montre qu’il s’agit bien d’espèces distinctes. Chez les grenouilles léopard, la reproduction n’est pas possible malgré quelques accouplements : là encore ce sont deux espèces différentes.

Les isollements reproducteurs dans ces deux derniers exemples ont des causes différentes : les parades nuptiales, les accouplements et la gestation sont possibles chez les souris de Madère, en revanche, chez les grenouilles léopard, dès les parades nuptiales les deux espèces ne semblent pas se reconnaître.

2 DOC. 4 Voir document p. 65 du manuel élève

3 DOC. 5 Le chat sauvage est une espèce dont l’isolement reproducteur avec le chat domestique n’est pas total. Il est donc possible que cette espèce, par hybridations successives, se fonde dans les populations de chat domestique et qu’il n’existe plus de chat sauvage au sens strict mais simplement des hybrides. Le fait que les populations de chat domestique et de chat sauvage ne soient pas totalement isolées génétiquement (l’isolement reproducteur n’est pas total) montre qu’il est difficile de les considérer comme deux espèces distinctes.

4 DOC. 5 ET 6 Dans le cas du chat sauvage, la disparition possible résulte de la fin de l’isolement reproducteur suite à l’introduction par l’Homme du chat domestique (**doc. 5**), en revanche dans le cas du thylacine (**doc. 6**) c’est la disparition du dernier individu de l’espèce qui est à l’origine de la disparition de l’espèce.

5 EN CONCLUSION L’évolution d’une population modifie les phénotypes de ses individus. Cette modification des phénotypes peut déboucher sur un isolement reproducteur vis-à-vis des autres populations. Dans ce cas, les échanges génétiques ne sont plus possibles entre population, et chacune est devenue une nouvelle espèce. L’évolution des populations peut donc aboutir, en cas d’isolement reproducteur, à l’apparition de nouvelles espèces, augmentant ainsi la biodiversité spécifique. À l’inverse, au cours de l’évolution, une espèce peut disparaître par modification de son environnement (présence d’autres espèces comme l’Homme par exemple) : dans ce cas la biodiversité spécifique diminue.

UNITÉ 3 La définition de l’espèce

[pp. 62-63 du manuel de l’élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l’unité
• La définition de l’espèce est délicate et peut reposer sur des critères variés qui permettent d’apprécier le caractère plus ou moins distincts de deux populations : critères phénotypiques (doc. 2 et 3 p. 62), interfécondité (doc. 4 à 6 p. 63), etc... • Le concept d’espèce s’est modifié au cours de l’histoire de la biologie. (doc. 1 p. 62) • On dit qu’une espèce disparaît si l’ensemble des individus concernés disparaît ou cesse d’être isolé génétiquement. (doc 5 et 6 p. 61)	• Analyser des informations relatives à la définition des limites d’une espèce vivante. (doc.3, 5 et 6 p. 62-63, exercice 7 p. 69) • Analyser des exemples d’hybrides interspécifiques fertiles ou non. (doc. 6 p. 63)

(...)

Conseils et suggestions

- L'objectif de cette unité est de montrer que la définition de l'espèce est délicate.
- La difficulté de la définition de l'espèce tient au fait que l'Homme essaie d'attribuer au vivant des propriétés (délimitation, noms) qui vont permettre de l'appréhender (classer, décrire, comprendre ...). Une espèce n'est finalement qu'un groupe artificiel que l'Homme définit par commodité. Or, dans certains taxons, la notion d'espèce s'applique mal car il y a un continuum du vivant (chez certains végétaux, chez les microorganismes).
- Le critère de ressemblance est utilisé pour la définition typologique de l'espèce qui est celle utilisée scientifiquement en systématique. Mais c'est également le critère utilisé pour la définition morphologique de l'espèce. C'est la définition la plus immédiate : on appelle du même nom les individus qui se ressemblent entre eux plus qu'à d'autres animaux (voir la définition de Cuvier, **doc. 1**). Il n'est pas nécessaire pour cela de définir un individu de référence (le type). Cette définition peut être mise en pratique scientifiquement par l'utilisation de marqueurs moléculaires discriminant deux espèces.
- Il existe d'autres définitions : phylogénétique (une espèce est l'ensemble des individus situés entre deux nœuds d'un arbre phylogénétique, voir **bilan p. 65**) ou écologique (une espèce est l'ensemble des individus qui occupent la même niche écologique).
- La définition biologique et la définition phylogénétique de l'espèce se recouvrent. La première est une vision à un instant t et la deuxième une vision dans le temps d'un même groupe d'individus isolé génétiquement des autres.
- En ce qui concerne les espèces jumelles, surtout fréquentes chez les insectes, les isollements reproducteurs ont souvent pour origine (comme c'est le cas pour les drosophiles du document 5) de petites modifications difficilement perceptibles de l'appareil copulateur. On notera que ces espèces jumelles sont quasiment impossibles à identifier sans élevage.

Exploitation des documents par les activités

TÂCHE COMPLEXE Pour Buffon, la définition de l'espèce sur des critères de ressemblance pose problème : il cite le cas des chiens qui se ressemblent parfois peu. Au contraire, des animaux qui se ressemblent comme l'âne et le cheval ne donnent pas de descendance fertile, il en déduit qu'on ne peut les considérer de la même espèce, faisant ainsi référence au critère d'interfécondité. Buffon souligne donc les difficultés de la définition de l'espèce. La ressemblance est le critère le plus simple à utiliser au quotidien (**doc. 2**) et il peut être utilisé aussi pour des fossiles (**doc. 3**). Néanmoins il peut être trompeur dans les cas où des individus de la même espèce ne se ressemblent pas (cas des chiens) ou à l'inverse quand des individus se ressemblent mais ne sont pas de la même espèce (cas des espèces jumelles, **doc. 5**).

En ce qui concerne le critère d'interfécondité, il permet de ne pas tenir compte de la ressemblance ou de la non ressemblance des individus. Il stipule que deux individus sont de la même espèce s'ils peuvent avoir une descendance fertile entre eux. Il est cohérent avec la théorie de l'évolution, puisque les populations qui ne sont pas interfécondes sont isolées génétiquement et évoluent ainsi séparément. En revanche, l'isolement reproducteur n'est pas toujours total et peut donner lieu à des hybridations. Selon la fertilité des hybrides on peut considérer que l'isolement reproducteur est total (cas du jaguar et du lion, **doc. 6** donnant un hybride stérile) et donc les deux populations sont des espèces différentes. Au contraire, l'isolement reproducteur n'est pas total (cas du chien et du loup donnant un hybride fertile) et dans ce cas les deux populations appartiennent à la même espèce. Malheureusement ce critère n'est pas simple d'utilisation dans la pratique, il n'est pas possible de suivre la reproduction de certains organismes (espèces difficiles à observer, longueur des temps de reproduction), ni la reproduction des fossiles (**doc. 3**, entre l'espèce A et C par exemple).

UNITÉ 1

La diversité actuelle et passée des primates

[pp. 72-73 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Les premiers primates fossiles datent de -65 à -50 millions d'années. Ils sont variés et non sont identiques ni à l'Homme, ni aux grands singes actuels. La diversité des grands primates connue par les fossiles, qui a été grande, est aujourd'hui réduite. ».	- Recenser, extraire, organiser, mettre en relation des informations, manipuler et exploiter des données anatomiques à l'aide d'un logiciel, pour : - caractériser la diversité passée et actuelle des primates (doc. 1, 3 et 4) ; - placer l'Homme dans l'arbre de parenté des primates (doc. 2 et exercice 4 page 91)

Conseils et suggestions

– L'objectif de ce chapitre est de montrer que notre espèce, comme toutes les autres, a une histoire évolutive. Ce thème est l'occasion de réinvestir certains points du chapitre 2 du thème 1, en les appliquant à l'Homme.

– Lors de cette première unité, l'élève est amené à définir ce qu'est un primate, en utilisant des critères morphologiques. En effet, en 1^{re} S la parenté de l'Homme et des primates de l'ancien monde avait été abordée par le biais de critères moléculaires (à travers l'étude des pigments rétinien) qui ne sont pas ceux utilisés par les paléontologues et les systématiciens. L'autre objectif de cette unité est d'aborder l'histoire évolutive des primates et des grands primates, et de montrer que l'Homme et les primates ont une histoire évolutive commune qui débute il y a au moins 60 millions d'années (Ma), et se termine vers - 7 Ma, comme il sera montré dans l'unité 2.

– Le document 1 permet à l'élève de faire un rapide constat de la diversité de formes et de tailles des primates actuels. A partir de ce premier document il pourra dégager quelques unes des caractéristiques communes à ce groupe, comme les orbites orientées vers l'avant (assurant une vision stéréoscopique) et la présence d'un pouce opposable. La prédominance de l'habitat forestier chez ce groupe particulier de mammifères pourra également être relevée.

– Comme le suggère le doc. 2, une activité avec le logiciel Phylogène pourra avantageusement être proposée à l'élève afin de construire un arbre de parenté, et montrer l'appartenance de l'Homme au groupe des grands primates. L'élève n'a pas à connaître des termes comme catarhiniens, hominoïdes, hominidés, etc. L'exercice 4 page 91 pourra être utilisé afin de montrer que les données moléculaires confirment l'arbre phylogénétique des primates.

– Les doc. 3 et 4 permettent d'aborder l'origine et l'évolution des primates. Les horloges moléculaires datent la séparation des primates et de leur groupe frère, les scandentiens (Toupe) à 65-70 Ma environ. Cependant, les premiers fossiles indiscutablement primates sont datés de 55 millions d'années.

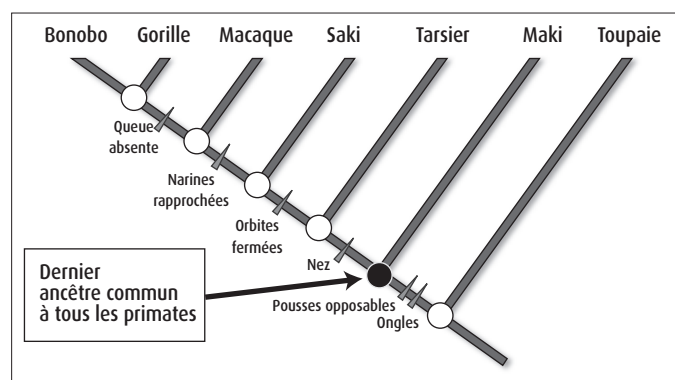
– Des informations complémentaires concernant la classification des primates et leur histoire évolutive pourront être trouvées dans « La classification phylogénétique du vivant » de Guillaume Lecointre et Hervé Le Guyader (Ed. Belin) et dans « La famille de l'homme » de Louis De Bonis (Ed. Belin/Pour La Science), respectivement.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*Extraire, manipuler et organiser des informations*).

Les caractéristiques du dernier ancêtre commun de tous les primates sont la possession d'ongles, de pouces opposables aux autres doigts, d'une truffe, d'orbites ouvertes, de narines écartées et d'une queue (doc. 2) et des orbites orientées vers l'avant (doc. 1).

Les caractères propres aux primates sont les caractères partagés par l'ensemble des espèces de ce groupe, c'est-à-dire : les pouces opposables, la présence d'ongles et les orbites orientées vers l'avant.



2 DOC. 2 (*Extraire et mettre en relation des informations*).

L'Homme possède des ongles et des pouces opposables, il est donc un primate. Il possède un nez avec des narines rapprochées, il fait donc partie des primates de l'ancien monde. L'absence de queue chez l'Homme permet de le classer parmi les Grands primates, au côté du Gorille et du Bonobo.

(...)

3 DOC. 3 ET 4 (*Recensez des informations, communiquer en rédigeant un texte*). Les premiers représentants du groupe des primates apparaissent vers - 60 Ma. A partir de 55 Ma et durant tout l'Éocène, ce groupe se diversifie de façon importante (**doc. 4**). Les primates de cette époque, comme Tétonius (**doc. 3**) ressemblent aux lémuriniens actuels. Par la suite, l'histoire évolutive des primates est marquée par la disparition et l'apparition de nouveaux genres (**doc. 4**). Vers - 20 Ma apparaissent les premiers représentants du groupe de Grands primates (**doc. 4**), dont le genre Proconsul (**doc. 3**). Les grands primates connaissent une importante diversification durant le Miocène. Mais, à partir de - 8 Ma ce groupe entre en déclin, et ne compte plus aujourd'hui que 8 genres (**doc. 4**).

4 DOC. 4 (*Extraire et mettre en relation des informations, formuler une hypothèse explicative*). L'évolution de la biodiversité des primates, et plus particulièrement celle des grands primates, mise en parallèle avec les variations des températures moyennes globales et le développement des calottes polaires arctique et antarctique, montre que leur déclin amorcé vers - 8 Ma, est concomitant d'un refroidissement climatique global, dont l'une des conséquences est la formation de calottes aux deux pôles.

On peut formuler l'hypothèse que le déclin des Grands primates a (au moins en partie*) une origine climatique : le refroidissement climatique global du pliocène a entraîné un resserrement de la zone intertropicale et, par voie de conséquence, de la surface des forêts tropicales humides auxquelles sont inféodés tous les Grands primates sauf l'Homme.

* Certains scientifiques, ajoute à l'hypothèse climatique et la réduction de l'habitat, une moindre compétitivité des grands primates par rapport aux singes Cercopithecoïdes.

5 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). L'Homme est un primate. Ces mammifères présentent actuellement une grande diversité de formes et de tailles, mais partagent un ensemble de caractères comme des pouces opposables et des ongles, hérités d'un même ancêtre commun. Apparus vers - 60 Ma, les primates se diversifient fortement par la suite. Parmi les primates, le groupe des grands primates, dont fait partie l'Homme, apparaît vers - 20 Ma. Autrefois très diversifiés, les grands primates subissent à partir de - 8 Ma une érosion de leur diversité. Celle-ci s'explique en partie par la réduction des forêts tropicales humides auxquelles ils sont inféodés (à l'exception de l'Homme), conséquence d'un refroidissement climatique global.

UNITÉ 2 La place de l'Homme parmi les grands primates

[pp. 74-75 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Homme et chimpanzé partage un ancêtre commun récent ».	- Extraire et exploiter des informations (texte, carte), manipuler des données moléculaires à l'aide d'un logiciel pour : - préciser le degré de parenté de l'Homme avec les autres grands primates (doc. 1 à 3); - estimer l'âge du dernier ancêtre commun de l'Homme et du chimpanzé (doc. 4).

Conseils et suggestions

- Cette unité vise à montrer que parmi les grands primates actuels, les chimpanzés sont les plus proches parents de l'Homme. Cette unité est également l'occasion de faire prendre conscience aux élèves que les activités humaines menacent la survie de toutes les espèces de grands primates non humains. Aux causes climatiques passées du déclin des grands primates abordées dans l'unité 1, s'ajoutent des causes actuelles anthropiques.
- Les critères anatomiques ne permettant pas de déterminer plus précisément la parenté de l'Homme avec l'un ou l'autre des grands primates, il faut avoir recours à des arguments moléculaires. Le **doc. 3** propose une comparaison de la séquence de l'enzyme cyclo-oxygénase 2 (COX2). Bien évidemment, la fiabilité des phylogénies moléculaires repose sur la comparaison de nombreux gènes. Ainsi,

d'autres protéines pourront être comparées à l'aide du logiciel Phylogène, afin de confirmer la proche parenté entre l'Homme et les chimpanzés.

- Le constat précédent implique que parmi les grands primates actuels, ce sont l'Homme et les chimpanzés qui ont l'ancêtre commun le plus récent. Le **doc. 4**, permet à l'élève de réaliser une estimation de l'âge du dernier ancêtre commun (DAC). Elle s'appuie d'une part sur l'utilisation des horloges moléculaires (dont il conviendra, peut être, d'expliquer rapidement le principe en classe) et d'autre part sur l'âge de fossiles qui servent à calibrer ces horloges moléculaires. L'utilisation de deux fossiles, le plus ancien catarrhinien (primate du nouveau monde) connu et le plus ancien grand primate connu, est nécessaire pour encadrer l'âge du dernier ancêtre de tous les grands primates.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*S'informer à partir d'un texte, de cartes*) Les grands primates actuels sont des mammifères de taille moyenne (Gibbons) à grande (Gorilles) (**doc.1**) qui, à l'exception de l'Homme, sont tous inféodés aux forêts équatoriales ou aux savanes arborées de l'Afrique de l'ouest et de l'Asie du sud-est (**doc. 2**). Leur structure sociale est très variable : solitaire, familiale, communauté restreinte ou nombreuse (**doc. 1**). D'un point de vue morphologique, notamment au niveau de la face, l'Homme se distingue des autres espèces de grands primates. Il faut souligner que tous les grands primates sauf l'Homme sont en grand danger d'extinction du fait de la destruction de leur habitat par l'Homme (**doc. 1**).

2 DOC. 3 (*Manipuler des données*) La comparaison des séquences de la protéine COX2 (enzyme cyclo-oxygénase 2) chez les primates, montre que c'est entre l'Homme et les chimpanzés que les différences sont les moins nombreuses (6 différences). On en déduit que, dans la nature actuelle, les chimpanzés sont nos plus proches parents. Inversement, les chimpanzés ont pour plus proche parent l'Homme. Cela signifie que l'Homme et les chimpanzés partagent un ancêtre commun plus récent qu'avec les gorilles, lesquels ont un ancêtre commun plus récent avec l'Homme et les chimpanzés qu'avec les orangs outans etc.

3 DOC. 4 (*Extraire et exploiter des informations*). On voit que la protéine COX2 diffère par 27 acides aminés entre le Macaque et le Bonobo (ou entre le Macaque et l'Homme). Donc en moyenne 13,5 mutations se sont accumulées dans les deux lignées depuis leur séparation. Cette séparation s'est produite entre 29 Ma, âge du plus ancien primate de l'ancien monde connu (Saadanius) et 24 Ma, âge (estimation basse) du plus ancien grand primate connu (Kamoyapithecus). On en déduit un taux de mutations ($u = m/t$) compris entre 0,46 et 0,56. Comme 3 mutations en moyenne se sont accumulées dans les lignées panine et humaine depuis leur séparation (en admettant que u a été constant) celle-ci a dû se produire entre 6,5 et 5,3 Ma (on arrondira à une fourchette de 7 à 5 Ma). Cet âge marque la fin de l'histoire évolutive commune de l'Homme et des primates.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). La phylogénie moléculaire basée sur la comparaison de séquences protéiques, montre que parmi les grands primates actuels, les plus proches parents de l'Homme sont les chimpanzés. C'est donc avec les chimpanzés que l'Homme partage l'ancêtre commun le plus récent. L'âge du dernier ancêtre commun de l'Homme et des chimpanzés est estimé entre 5 et 7 Ma.

UNITÉ 3

La comparaison génétique entre Homme et chimpanzés

[pp. 76-77 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « D'un point de vue génétique, l'Homme et le chimpanzé, très proches, se distinguent surtout par la position et la chronologie d'expression de certains gènes ».	• Extraire et exploiter des informations génétiques (textes, schémas, graphiques) pour : – montrer la proximité génétique de l'Homme et du chimpanzé (doc. 1 à 3) ; – montrer l'existence de différences d'expression de certains gènes chez l'Homme et le chimpanzé (doc. 4 à 6)

Conseils et suggestions

– Les deux unités précédentes ont permis de faire la démonstration de l'étroite parenté entre Homme et chimpanzés, et de l'existence d'un ancêtre commun récent. Néanmoins, on constate qu'après 5 à 7 millions d'années d'évolution séparée, le phénotype de l'Homme et des chimpanzés actuels est assez différent. Comment expliquer ces différences ? C'est cette question qui est abordée dans cette unité et la suivante.

– Les **documents de la page 76** permettent de montrer que l'Homme et les chimpanzés sont génétiquement très proches. La comparaison des caryotypes (données anciennes), met en évidence des intercalations et des inversions de portions de chro-

mosomes, dont la principale conséquence est la modification de la position des certains gènes. La comparaison du caryotype des deux espèces pourra éventuellement être réalisée en utilisant le site internet <http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/svt/program/fichacti/fichts/chromo/debut.htm>

Le séquençage complet du génome humain, achevé en 2003, puis de celui du chimpanzé en 2005, a permis leur comparaison sur la totalité de la séquence nucléotidique. Les **doc. 2 et 3** montrent quelques résultats concrets de cette comparaison. A titre de comparaison, le génome humain présente 93 % d'identité avec le macaque, 88 % avec la souris et 60 % avec le poulet. L'élève com-

(...)

prend alors que les différences génétiques constatées ne suffisent à expliquer les différences de phénotypes.

– Les **documents de la page 77** sont issus de publications scientifiques très récentes (voir liste de références sur le site compagnon du manuel). Ils permettent de faire le constat que l'Homme et les chimpanzés se distinguent surtout par le niveau d'expression et la chronologie d'expression de leurs gènes. On retrouve ici des notions abordées dans **l'unité 1 du chapitre 2** qui s'appliquent ici à l'évolution de l'Homme. Il est intéressant de constater dans le **doc. 4** que, contre toute attente, c'est au niveau du cerveau que les différences d'expression des gènes, entre l'Homme et le chimpanzé, sont les plus faibles. Le **doc. 5** permet de montrer qu'il existe cependant des différences de chronologie d'expression de quelques gènes dans le cerveau de l'Homme et du chimpanzé. Les gènes dont l'expression augmente moins vite au cours du développement post-natal, ont une expression qui est dite « retardée ». Cela signifie que ces gènes conservent un niveau d'expression juvénile plus longtemps. Les auteurs de cette étude ont qualifié ces gènes de « néoténiques ». La néoténie est un processus hétérochronique (expression de caractères juvéniles à l'état adulte), qui est souvent évoqué par certains scientifiques pour expliquer l'apparition de certains caractères au cours de l'évolution de la lignée humaine, comme la bipédie, la morphologie du crâne, l'absence de pilosité, etc. C'est un concept qu'il faut manipuler avec précaution, car il n'a reçu aucune démonstration scientifique.

– L'entretien avec le Pr. Morange (**doc. 6**), permet d'entamer une réflexion sur l'existence d'éventuels gènes « à l'origine de l'Homme ». Certains documentaires récents, consacrés à l'évolution de l'Homme, ont présenté des caractères propres à notre espèce, bipédie et langage par exemple, apparaissant spontanément (en l'espace d'une génération!), à la suite d'une ou de plusieurs mutations. Il s'agit bien entendu d'une vision caricaturale de l'évolution. Avec *FoxP2*, souvent qualifié de « gène du langage », on voit que la mutation d'un seul gène peut affecter l'activité de nombreux autres. Un gène seul ne peut donc être à l'origine d'un caractère aussi complexe que le langage, ou la bipédie. La question des différences génétiques entre l'Homme et le chimpanzé pourra être approfondie en visionnant une conférence en ligne du Pr. Morange (http://www.canal-u.tv/video/universite_de_tous_les_savoirs/l_homme_et_le_singe_michel_morange.3800).

Exploitation des documents par les activités

DOC. 1 À 5 (*Recenser, organiser, exploiter, mettre en relation des informations, interpréter des observations, communiquer en rédigeant une synthèse*).

– **Document 1** : La structure des chromosomes humains et simiens (mise en évidence par l'alternance des bandes sombres et claires) est pour l'essentiel identique. On observe néanmoins localement quelques différences de structure dues à des inversions ou des intercalations qui modifient la position des gènes. Deux différences importantes entre les caryotypes humain et simien sont cependant notables. Elles concernent le chromosome Y qui est plus long

chez le chimpanzé, et le nombre de chromosomes : 23 paires chez l'Homme contre 24 chez le chimpanzé. A cet égard, on peut remarquer que le chromosome de la paire n° 2 chez l'Homme possède la même structure que deux chromosomes simiens fusionnés.

– **Documents 2 et 3** : La comparaison de la séquence nucléotidique du chromosome n° 1 de l'Homme et du chimpanzé montre que le taux de divergence, mesuré sur des séquences de 10⁶ nucléotides, varie entre 0,01 % et 0,02 % (**doc. 2**). Ce qui signifie que les séquences des chromosomes n° 1 des deux espèces sont au minimum identiques à 99,98 % (en considérant les séquences alignables). Sur l'ensemble du génome, le taux d'identité est de 98,5 % entre les deux espèces (**doc. 3**).

Première conclusion : l'Homme et les chimpanzés sont génétiquement très proches (en accord avec l'existence d'un dernier ancêtre commun récent). Au cours de l'évolution, quelques remaniements chromosomiques sont intervenus et ont modifié la position des certains gènes.

– **Document 4** : Lorsque l'on compare le niveau d'expression des gènes (dédit de la quantité d'ARNm correspondant à chacun des 21 000 gènes), on constate qu'il existe des différences de niveau d'expression des gènes entre Homme et chimpanzés. C'est dans le cerveau que les différences sont les plus faibles (12 % des gènes concernés) et dans le testicule que les différences sont les plus significatives (35 % des gènes concernés).

– **Document 5** : Ce document montre qu'il existe chez l'Homme des gènes dont l'expression est retardée par rapport au chimpanzé (graphique en haut à gauche). Pour d'autres gènes, l'expression est au contraire accélérée par rapport au chimpanzé (graphique en haut à droite). Les deux graphiques du bas montrent des gènes ayant une chronologie d'expression identique chez l'Homme et le chimpanzé par rapport au macaque.

Deuxième conclusion : malgré une grande proximité génétique entre Homme et chimpanzés, on observe des différences de niveau d'expression des gènes entre les deux espèces et une différence de chronologie d'expression de certains gènes.

– **Document 6** (*s'informer à partir d'un texte*) Le gène *FoxP2* chez l'Homme a muté deux fois au cours de l'évolution de la lignée humaine, mais fait intéressant, il n'a pas muté au cours de l'évolution de la lignée panine. On sait par ailleurs que certains individus atteints du trouble du langage, possèdent une forme inactive du gène *FoxP2*. D'où l'hypothèse séduisante que l'acquisition du langage articulé chez l'Homme, serait due à ces deux mutations évoquées plus haut. Il faut rester prudent face à cette interprétation. En effet, *FoxP2* est un gène « maître » qui contrôle l'expression de nombreux autres gènes. Par ailleurs, le langage articulé nécessite une anatomie particulière du larynx, des aires cérébrales spécialisées, et un d'apprentissage (voir unité 4). Un seul gène, ou une mutation, ne peut être à l'origine d'un caractère aussi complexe. Ainsi, bien que l'on commence à connaître les différences génétiques entre l'Homme et les chimpanzés, elles ne permettent pas, à l'heure actuelle, d'expliquer les différences de phénotype entre les deux espèces.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« 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) ».	• Extraire, exploiter, mettre en relation des données anatomiques, génétiques, comportementales (photographies, textes, graphiques, tableau) pour : – mettre en évidence le rôle des gènes et de l'environnement dans la construction du phénotype pré et postnatal chez les grands primates (doc. 1 à 3); – montrer la part de l'environnement dans l'acquisition du phénotype comportemental chez les grands primates (doc. 4 à 6).

Conseils et suggestions

– Le but de cette unité est principalement d'aborder le rôle de l'environnement dans la construction du phénotype des grands primates, et de montrer que certains aspects du phénotype, comme des comportements, peuvent se transmettre indépendamment des gènes, et être une source de diversité à l'intérieur d'une espèce. Les notions abordées dans **l'unité 5 du chapitre 2** sur l'acquisition de nouveaux comportements chez les macaques trouvent ici un prolongement.

– L'étude comparée des génomes des chimpanzés et de l'Homme dans l'unité précédente laisse encore en suspens des questions sur l'origine des différences phénotypiques constatées entre ces deux espèces.

– La morphologie crânienne est un exemple incontournable de phénotype qui se construit progressivement au cours des phases de développement pré et postnatale, et qui sera réinvesti dans l'unité 5 consacrée à la définition du genre *Homo*. Le **doc. 2** n'a pour but que de présenter un exemple de gène qui, chez la souris, a une fonction dans la morphogenèse du crâne. Cependant, on ne peut en aucun cas en conclure que la réduction de la face chez l'Homme par rapport au chimpanzé, serait la conséquence de l'inactivation du même *Sox9*. Le **doc. 3** montre que le phénotype morphologique peut être altéré par l'environnement.

– Le cas des enfants « sauvages » proposé dans le **doc. 4** permet d'interpeller les élèves sur ce qui nous « rend humain », en prenant l'exemple du langage articulé. Certes, le langage articulé dépend de l'anatomie particulière du larynx, de l'existence d'aires cérébrales spécialisées, donc de l'expression d'un programme génétique « humain ». On pourrait ici faire allusion au gène *FoxP2* présenté dans **l'unité 3**. Néanmoins, sans apprentissage au contact des membres du groupe, le phénotype ne se construit pas

– Le **doc. 5** permet de découvrir le mode de transmission des comportements chez les grands primates non humains, qui se fait uniquement par l'imitation. Le **doc. 6** illustre la diversité des comportements rencontrés chez les chimpanzés. Il montre également que des comportements nouveaux peuvent apparaître en réponse à des contraintes écologiques différentes. (Pour le psychanalyste anglais John Bowlby (1907-1990) : « un individu n'hérite pas d'un

comportement mais d'une potentialité à développer un nombre fini de système comportementaux dans un contexte environnemental donné »). Le **doc. 6** permet enfin d'aborder l'aspect culturel des comportements chez les grands primates dont l'Homme.

Le tome 2 de « Aux origines de l'Humanité » (Ed Fayard, 2006) permettra approfondir les questions de comportement et de leur transmission chez les primates.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Extraire et comparer des informations*). Au stade fœtal, la morphologie du crâne de l'Homme et du chimpanzé est assez voisine. Par exemple, le trou occipital occupe la même position, et les différentes régions du crâne ont à peu près les mêmes proportions. La phase de développement post-natal modifie notablement les proportions des différentes parties du crâne. En effet, chez le chimpanzé s'opère un glissement du trou occipital vers l'arrière et un important développement de la face et des mâchoires (acquisition du prognathisme), la boîte crânienne quant à elle se développant proportionnellement peu par rapport à la face. Chez l'Homme, au cours du développement, la boîte crânienne conserve des proportions proches de celles observées chez le fœtus, et l'arrondissement de la partie occipitale du crâne permet au trou occipital de conserver une position avancée. Le développement des mâchoires et de la face augmente leur proportion mais n'engendre aucun prognathisme.

Le phénotype morphologique des grands primates se construit donc progressivement au cours des étapes du développement pré et post-natal.

2 DOC. 1 à 3 (*Recenser et mettre en relation des informations*). Des mutations peuvent affecter la morphologie du crâne chez la souris (**doc. 2**). On en déduit que les différences de morphologie observées entre Homme et chimpanzé (**doc. 1**), peuvent également être la conséquence de l'activité de leurs gènes. La construction du phénotype morphologique des grands primates est donc en partie sous contrôle génétique. Le **doc. 3** montre l'influence de l'environnement sur le phénotype chez l'Homme. Il montre

(...)

l'influence de l'alimentation sur la taille des individus de deux populations séparées, mais génétiquement identiques. L'ensemble de ces observations montre que chez les grands primates (comme chez les autres espèces), le phénotype morphologique dépend des interactions entre les gènes et l'environnement.

3 DOC. 4 À 6 (*Extraire et mettre en relation des informations*). Le cas des enfants sauvages (**doc. 4**) montre que chez l'homme, l'acquisition du langage articulé ne dépend pas seulement de l'expression des gènes, mais qu'elle requiert une phase d'apprentissage, donc une interaction avec un ou des membres du groupe. Outre le langage articulé, le même document fait état de l'asociabilité de Victor, c'est-à-dire de son incapacité à communiquer avec les membres du groupe de façon non verbale. Cette forme de langage est donc également acquise au cours de l'enfance par l'apprentissage. Privé d'interaction avec le groupe, le phénotype comportemental «humain» de Victor ne s'est pas complètement construit. Chez les chimpanzés, le phénotype comportemental, également très complexe, s'exprime sous la forme de l'utilisation d'outils simples et d'un langage permettant la communication avec les membres du groupe (**doc. 5**). Comme chez l'Homme, le phénotype comportemental du chimpanzé s'acquiert pendant l'enfance par l'apprentissage au contact de la mère et des autres membres du groupe. Il faut de plus souligner l'importance de la durée de l'enfance (phase qui par définition va de la naissance à la puberté) chez les grands primates (10-11 ans chez les chimpanzés, plus chez l'Homme), ce qui permet l'apprentissage de tâches complexes. En outre, il pourra être porté à la connaissance de l'élève que le développement du cerveau se poursuit pendant les premières années de l'enfance. Bien que les étapes importantes du développement du cerveau, que sont la neurogenèse et la synaptogenèse, soient sous contrôle génétique et aient débuté pendant le développement embryonnaire et fœtal, elles se poursuivent après la naissance en interaction directe avec des stimuli de l'environnement. Ainsi l'environnement va-t-il contribuer à produire en fonction de chaque individu et de son expérience individuelle, une large palette de phénotypes comportementaux (à mettre en relation avec la

plasticité cérébrale abordée en 1^{re}). Le document suivant illustre parfaitement la variété des possibles en ce qui concerne le phénotype comportemental des grands primates. Placés dans des environnements différents et des contraintes écologiques différentes, les chimpanzés développent des phénotypes comportementaux différents (utilisation d'outils différents) (**doc. 6**). L'ensemble de ces observations montre que le phénotype comportemental des grands primates est le produit des interactions entre les gènes et l'environnement, dont notamment la relation avec les membres du groupe.

4 DOC. 5 ET 6 (*Extraire et exploiter des informations*). Nous avons vu que le phénotype comportemental des grands primates non humains est acquis par l'apprentissage (**doc. 5**) et qu'il varie d'une population à l'autre de chimpanzés (**doc. 6**). L'utilisation d'un outil particulier dans une population donnée de chimpanzés, est un comportement stable sur une longue période de temps. Il est transmis par apprentissage des jeunes (imitation) au contact de la génération précédente (**doc. 6**). Il existe donc bien des savoir-faire techniques propres à chaque population de chimpanzés (qui peuvent s'interpréter comme des adaptations locales à certaines contraintes écologiques), qui sont transmis d'une génération à l'autre par l'apprentissage. On peut donc conclure à l'existence d'une culture, et même de cultures, dans les populations actuelles de chimpanzés.

5 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Chez les grands primates, le phénotype morphologique, comme par exemple la morphologie du crâne, est le produit de l'expression des gènes. Cependant, l'environnement peut moduler l'expression des gènes et modifier le phénotype morphologique (exemple de la taille et de l'alimentation). L'existence de structures cérébrales complexes chez les grands primates est une condition nécessaire au développement de phénotypes comportementaux complexes comme le langage et l'utilisation d'outil. Mais elle est insuffisante. En effet, le phénotype comportemental n'est pas seulement dicté par les gènes: il nécessite l'apprentissage au contact des autres membres du groupe.

UNITÉ 5 La définition du genre *Homo*

[pp. 80-81 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Le genre <i>Homo</i> regroupe l'Homme actuel et quelques fossiles qui se caractérisent notamment par une face réduite, un dimorphisme sexuel peu marqué sur le squelette, un style de bipédie avec un trou occipital avancé et aptitude à la course à pied, une mandibule parabolique, etc. »	- Réaliser des observations, utiliser un logiciel de traitement d'images, exploiter des données notamment anatomiques pour définir le genre <i>Homo</i> en utilisant : - des caractéristiques du crâne (doc. 1 et 2) ; - des caractéristiques liées à la pratique d'une bipédie stricte (doc. 1, 3 et 4)

Conseils et suggestions

– L'objectif de cette unité est de montrer comment à partir de l'étude des fossiles, il est possible de dégager des particularités propres au genre *Homo* et d'en proposer une définition. Celle-ci repose sur des critères liés à la morphologie du crâne et à la bipédie, ainsi que sur des critères culturels, quant à eux abordés dans l'unité suivante. Il est important de montrer que cette définition repose sur une combinaison de caractères, et qu'un seul ne suffit pas à définir une appartenance au genre *Homo*.

– L'étude des caractères crâniens (**doc. 1**) est l'occasion d'utiliser la collection de moulages disponibles dans les établissements. Nous avons choisi d'inclure dans cette étude *Homo ergaster* plutôt qu'*Homo erectus*. Ce choix s'impose pour des raisons scientifiques, puisqu'*Homo ergaster* est considéré comme le premier primate appartenant indiscutablement au genre *Homo*. *Homo Ergaster*, fréquemment confondu avec *Homo erectus*, est malheureusement souvent absent des collections, de même qu'il n'est pas représenté dans les logiciels qui permettent une étude virtuelle des caractères crâniens comme « Crânes » (Ed. APBG) et « Lignée humaine » (Perez et Guchereau) disponible au téléchargement gratuit sur le site de l'académie de Toulouse (<http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/lycee/perez/evolution/ligsomm.htm>). Des moulages du crâne d'*Homo ergaster* sont disponibles chez les fournisseurs habituels de matériels destinés aux SVT. Le logiciel Mesurim permet de réaliser des mesures de craniométrie de bases (longueur, angle) à partir d'images numériques.

– Concernant la bipédie, il est important de rappeler qu'il n'existe pas une bipédie mais des bipédies, et que la bipédie fait partie du répertoire locomoteur de nombreux grands primates (gibbons, chimpanzés). La bipédie n'est donc pas un caractère propre au genre *Homo*. En revanche, le genre *Homo* se caractérise par une bipédie très dérivée par rapport aux autres primates actuels et fossiles (Australopithèques). Cela se traduit par un trou occipital très avancé et centré sous le crâne (point déjà abordé dans l'unité 4) et par une aptitude à la course à pied. De nombreuses informations sur la bipédie et sur ses origines sont accessibles sur le site de l'INRP (<http://www.inrp.fr/Acces/biotic/evol/homme/html/bipedie.htm>). Le **doc. 3** présente quelques unes des caractéristiques du squelette liées à la locomotion. Toutes les adaptations du squelette liées à la bipédie stricte n'ont pas à être connues (courbure en S de la colonne vertébrale, voûte plantaire). L'aptitude à la course à pied peut être déduite de l'anatomie du pied. L'empreinte de pas attribuée à *Homo ergaster* (**doc. 4**) pourra être éventuellement comparée à celles de Laetoli, attribuées à *Australopithecus afarensis*.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Réaliser et exploiter des observations*). Il est possible de rassembler les informations dans un tableau

	Pan troglodytes	Australo. afarensis	Homo ergaster	Homo sapiens
Trou occipital avancé	Non	Non	Oui	Oui
Mandibule parabolique	Non	Non	Oui	Oui
Volume cérébral > 600 cm ³	Non	Non	Oui	Oui
Réduction de la face ⁽¹⁾	Non	Non	Oui	Oui

(1): déduite du degré de prognathisme donné par l'angle facial.

On constate alors aisément qu'en ce qui concerne les caractères crâniens, le genre *Homo* est associé à une face réduite, une mâchoire parabolique, un trou occipital en position avancé (en relation avec la pratique de la bipédie) et à un accroissement du volume cérébral.

2 DOC. 1 ET 3 (*Mettre en relation des informations*).

L'Australopithèque se rapproche du chimpanzé par la position du trou occipital (reculée et sur un plan oblique) (**doc. 1**) et par ses proportions corporelles (bras plus longs que les jambes). Il se rapproche en revanche d'*Homo sapiens* par la forme du bassin (large et raccourci) et par l'obliquité de ses fémurs (**doc. 3**). On en déduit que cette Australopithèque pratiquait une bipédie plus dérivée et moins occasionnelle que celle du chimpanzé, tout en conservant de bonnes aptitudes à l'arboricolisme.

Homo ergaster possède un trou occipital dans un plan horizontal comme *H. sapiens*. Ses proportions corporelles, la forme de son bassin et l'obliquité de ses fémurs sont comparables à celles d'*H. sapiens*. On en déduit qu'*Homo ergaster* pratiquait une bipédie très dérivée et exclusive, probablement comparable à celle de l'Homme moderne.

3 DOC. 4 (*S'informer à partir d'un texte et d'une image*).

L'empreinte de pas attribuée à *H. ergaster* montre que le gros orteil (hallux) est abducté aux autres doigts comme chez *H. sapiens*. A cela s'ajoute des études de biomécanique décelant chez *Homo ergaster* une capacité à courir sur de longues distances. Les arguments anatomiques et biomécaniques sont donc suffisamment probants pour conclure qu'*Homo ergaster* s'était définitivement affranchi du monde des arbres et pratiquait une bipédie exclusive, très comparable, si ce n'est identique, à celle d'*Homo sapiens*.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*).

Le genre *Homo* est donc associé à un ensemble de caractéristiques anatomiques liées d'une part à la morphologie du crâne (face réduite, mandibule parabolique, volume crânien important) et d'autre part à la pratique d'une bipédie dérivée avec aptitude à la course à pied (trou occipital en position avancée, bassin court et élargi, fémurs longs et obliques, hallux abducté).

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Le genre <i>Homo</i> regroupe l'Homme actuel et quelques fossiles. » « Production d'outils complexes et variété des pratiques culturelles sont associées au genre <i>Homo</i>, mais de façon non exclusive. »	- S'informer, exploiter des données (textes, cartes, schémas, photographies) pour montrer notamment que : - Plusieurs espèces du genre <i>Homo</i> se sont succédées et côtoyées au cours du temps depuis son émergence (doc. 1, 2 et 4 et exercice 5 page 91) ; - Le genre <i>Homo</i> se caractérise par certaines pratiques culturelles (doc. 3 et 5 et exercice 3 page 90)

Conseils et suggestions

– Cette unité vise à donner un aperçu de l'histoire évolutive du genre *Homo*. Celle-ci se caractérise d'abord par une succession et une coexistence de nombreuses espèces, ce que permettront de montrer les **doc. 1 et 4**. Le **doc. 1** pourra servir à compléter les informations obtenues dans l'unité 1 concernant la diversité passée des (grands) primates. Le site www.hominides.com constitue une source très abondante d'informations et de dossiers sur la diversité passée des primates de la lignée humaine. L'académie de Versailles propose au téléchargement un fichier KMZ utilisable avec Google Earth qui permet une approche spatiale et temporelle de l'évolution de la lignée humaine (<http://www.svt.ac-versailles.fr/spip.php?article304>).

– Le second aspect important de l'histoire évolutive du genre *Homo* traité dans cette unité, concerne les activités culturelles (**doc. 1, 3, 4 et 5**). Les informations obtenues dans l'unité 4, devront être mobilisées pour réaliser une comparaison des pratiques culturelles des chimpanzés et des Hommes. La définition du genre *Homo* peut alors être complétée en lui ajoutant une dimension culturelle.

– Cette unité est l'occasion d'aborder l'origine du genre *Homo*. Dans l'unité précédente, il a été vu que le genre *Homo* est défini par la possession d'un ensemble de caractères liés à la morphologie du crâne, et à la pratique d'une bipédie très dérivée. *Homo ergaster* est la première espèce de grand primate à réunir l'ensemble de ces caractères (le premier Homme vrai). Le **doc. 2**, avec *Homo habilis*, illustre les difficultés qu'on peut rencontrer pour dater l'émergence du genre *Homo*, si on s'en tient à une définition stricte du genre. Si par contre, on utilise une définition plus large du genre *Homo*, alors on peut parler de lignée humaine dont l'origine est bien antérieure à 2,5 Ma.

– Les doc. 4 et 5 présentent quelques aspects de l'histoire récente du genre *Homo*, laquelle est marquée par l'avènement des Hommes anatomiquement (*Homo sapiens*). L'exercice 5 page 91 permettra d'aborder la question de l'origine des populations humaines actuelles. Certains mécanismes à l'origine de l'éloignement génétique des populations, comme l'effet fondateur abordé en classe de seconde, pourront être remobilisés afin de montrer que les mêmes mécanismes s'appliquent à l'évolution de l'Homme.

– L'influence des pratiques culturelles sur l'évolution des popula-

tions humaines constitue un exemple fascinant de mécanismes à l'origine de la diversification du vivant (**chapitre 2**). L'exercice 3 page 90 procure un exemple de pratique culturelle ayant modifié la fréquence de certains allèles au sein des populations humaines. Ce simple exemple suggère que les pratiques culturelles développées par les Hommes, comme le langage, la fabrication d'outils, les pratiques agricoles, etc., ont agi en retour sur l'évolution de l'Homme en exerçant une pression de sélection. Ainsi l'Homme est-il le produit de ses gènes, de l'environnement et de sa culture

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 4 (S'informer à partir de textes, de cartes et de schémas). Les premiers représentants du genre *Homo*, *H. habilis* et *H. rudolfensis*, apparaissent en Afrique de l'est vers - 2,5 Ma et s'y cantonneront jusqu'à - 1,5 Ma environ, époque où ils disparaissent. *Homo ergaster* apparaît en Afrique vers - 1,8 Ma, cohabite avec *H. habilis* et *H. rudolfensis* en Afrique de l'est ainsi qu'avec d'autres primates bipèdes que sont les Paranthropes et des représentants tardifs du genre Australopithecus. *Homo ergaster*, du fait de sa grande mobilité, colonise de nouveaux territoires situés au nord de l'Afrique. Vers - 1,7 millions d'années, les Hommes commencent à sortir de leur berceau africain. Les premiers Hommes connus hors d'Afrique sont *H. georgicus* (dont certains auteurs pensent qu'il est un descendant d'*Homo habilis*) et surtout *Homo erectus* qui colonise le Moyen-Orient, le sud de l'Eurasie et l'Asie du Sud-Est. A partir de - 1 Ma, l'aire de répartition du genre *Homo* s'étend vers le nord de l'Eurasie. Toutes les espèces précédentes, à l'exception d'*Homo erectus*, ont disparu et ont été remplacées par de nouvelles comme *Homo antecessor* et *Homo heidelbergensis*. Vers - 200 000 ans, apparaît en Europe *Homo neanderthalensis*. C'est à peu près à la même époque qu'apparaissent en Afrique les premiers Hommes anatomiquement modernes. Les derniers *Homo erectus* s'éteignent il y a environ 100 000 ans. Alors que les néandertaliens restent cantonnés en Europe et au Moyen-Orient, *Homo sapiens* sort d'Afrique vers - 60 000 ans et va progressivement coloniser tous les continents dont l'Australie (- 50 000 ans) et l'Amérique (- 19 000 ans). En arrivant en Europe de l'ouest vers - 40 000 ans, il y rencontre les Hommes de Néandertal. Les deux espèces vont cohabiter en Europe pendant environ 10 000 ans, jusqu'à l'extinction de Néandertal vers

– 28 000 ans. Depuis cette époque, *H. sapiens* est l'unique espèce survivante du genre *Homo*.

2 DOC. 2 (*S'informer à partir d'un texte*). *Homo habilis* est considéré comme le premier représentant du genre *Homo*, mais son appartenance au genre fait débat. La première difficulté réside dans le fait qu'*Homo habilis* présente une mosaïque de caractères humains (une face réduite, volume cérébral plus important que celui des Australopithèques) et des caractères des Australopithèques (adaptations à l'arboricolisme). Il ne réunit donc pas tous les caractères liés au genre *Homo* (**voir unité 5**), contrairement à *Homo ergaster*. L'autre difficulté tient au manque d'informations précises sur le squelette post-crânien d'*Homo habilis*, lequel n'est connu que par des restes très fragmentaires.

3 DOC. 3 ET UNITÉ 4 (*Extraire et mettre en relations des informations*). Il a été vu dans l'unité 4 que les chimpanzés utilisent une grande variété d'outils et qu'il s'agissait d'un comportement acquis, transmis par l'apprentissage. Les chimpanzés utilisent souvent des pierres dont ils sélectionnent soigneusement la taille et la forme, afin de s'en servir comme d'un marteau et d'une enclume pour casser des noix, par exemple. Les outils retrouvés en Tanzanie (**doc. 3**), dont les plus anciens sont datés de 2,6 Ma, sont des galets aménagés : quelques éclats enlevés d'un nucléus de roche dure, dans le but de fabriquer un outil pointu ou tranchant. Ces premiers outils (industrie oldowayenne) ont pu être fabriqués par un représentant du genre *Homo*. Mais, pour certains scientifiques, les paranthropes, contemporains des premiers représentants du genre *Homo*, en seraient les auteurs. Il ressort donc que les pratiques culturelles et l'utilisation d'outils variés ne sont pas exclusives au genre *Homo*.

4 DOC. 5 (*Mobiliser des connaissances, mettre en relation des informations*). L'expansion mondiale d'*Homo sapiens* à partir de -60 000 ans, s'accompagne d'une importante diversification de ses pratiques culturelles. En effet, *Homo sapiens* est la première et la seule espèce du genre *Homo* à s'exprimer sous la forme d'activités artistiques (statuettes, art pariétal, etc.). Bien qu'*Homo neanderthalensis* pratiquât des rites funéraires, témoignage de son important développement psychique, aucune forme d'expression artistique n'a été retrouvée associée à lui.

5 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). L'histoire du genre *Homo*, qui débute en Afrique il y a 2,5 Ma est marquée par son expansion géographique, d'abord en Afrique puis dans toute l'Eurasie à partir de 1,7 Ma. Au cours de cette première expansion, plusieurs espèces d'Hommes vont se succéder et parfois se côtoyer. C'est encore en Afrique que les premiers Hommes anatomiquement modernes apparaissent, il y a environ 200 000 ans. A partir de - 60 000 ans, le genre *Homo* connaît sa deuxième expansion géographique : *Homo sapiens* sort d'Afrique et part d'abord coloniser le Moyen-Orient et l'Eurasie où il va progressivement remplacer les espèces du genre *Homo* qui s'y étaient précédemment installées. Il colonise ensuite l'Australie et le continent américain. Depuis 28 000 ans, *Homo sapiens* est la dernière espèce du genre *Homo* à occuper la planète. L'expansion du genre *Homo* a été accompagnée d'une importante évolution culturelle dans les domaines technique (fabrication d'outils de plus en plus complexes, domestication du feu) et artistique, cette dernière forme d'expression étant exclusive à *Homo sapiens*.

UNITÉ 7 Des relations de parenté débattues

[pp. 84-85 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« La construction précise de l'arbre phylogénétique du genre <i>Homo</i> est controversée dans le détail. » « Aucun fossile ne peut être à coup sûr considéré comme un ancêtre de l'Homme ou du chimpanzé. »	- S'informer, exploiter des données (textes, images), comprendre la nature provisoire, en devenir, du savoir scientifique, afin de : - faire le lien entre les difficultés liées à l'étude des fossiles et l'incertitude des relations de parentés au sein du genre <i>Homo</i> (doc. 1); - comprendre l'origine de quelques débats concernant des représentants du genre <i>Homo</i> (doc. 2 et 3)

Conseils et suggestions

– L'objectif de cette unité est de montrer qu'en raison des difficultés liées à l'étude des fossiles, la reconstitution précise des liens de parenté au sein du genre *Homo* (et de la lignée humaine en général), est impossible. Pour les mêmes raisons, il sera impossible de considérer qu'un fossile puisse être à coup sûr l'ancêtre d'un autre.
– Le texte du **doc. 1**, sous forme d'interview d'une spécialiste des questions de taxinomie, apporte des clés pour comprendre les dif-

ficultés rencontrées par les paléanthropologues lorsqu'ils tentent d'établir des relations de parenté au sein du genre *Homo*. Comme le montre l'encadré du document 1, l'attribution taxinomique d'un fossile incomplet (et pouvant avoir été déformé au cours du temps), varie en fonction des scientifiques et des caractères qu'ils prennent en compte pour interpréter les fossiles. A cela s'ajoute

(...)

la tentation d'attribuer à un nouveau fossile un nouveau nom d'espèce, sur la base d'un seul caractère anatomique. On pourrait alors éventuellement ici demander aux élèves de critiquer cette démarche, en utilisant les notions vues dans le **chapitre 3** sur la variabilité des caractères des individus au sein d'une espèce et de leur évolution au cours du temps.

– Depuis sa découverte en 2003, le cas de l'Homme de Flores (**doc. 2**) demeure problématique et a suscité des débats acharnés entre les spécialistes. La position d'*Homo floresiensis* sur l'arbre phylogénétique du genre *Homo* demeure à ce jour énigmatique, en raison de la mosaïque de caractères qu'il présente. En fonction des critères retenus, il s'apparente soit à *H. erectus*, soit à *H. habilis*, soit à *H. sapiens*. Le cas de l'Homme de Flores montre que les caractères peuvent évoluer selon une grande diversité de combinaisons.

– S'agissant de l'Homme de Néandertal (**doc. 3**), et de la signification de la présence de séquences néandertaliennes dans le génome de certaines populations humaines actuelles, il conviendra bien entendu de réutiliser la définition d'une espèce vue dans l'**unité 3 du chapitre 3. L'atelier Sciences et Actualité de la page 91 du manuel de l'élève** présente les conditions de la découverte récente de l'Homme de Denisova. Ces deux exemples montrent comment les progrès récents dans le domaine des techniques de séquençage des ADN fossiles peuvent aider les scientifiques à reconstituer des liens de parentés au sein du genre *Homo*. Cela permet également de développer une des compétences du programme de SVT qui est « Comprendre la nature provisoire, en devenir, du savoir scientifique ».

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*S'informer à partir d'un texte*). Déterminer les relations de parenté au sein du genre *Homo* devrait théoriquement permettre de reconstituer la filiation depuis les premiers représentants du genre *Homo* (*Homo habilis*?) jusqu'à *Homo sapiens*. Cela est-il possible? La réponse est non. La raison est double : 1) le registre fossile est forcément incomplet, car il comporte beaucoup de lacunes ; 2) les restes fossiles sont le plus souvent fragmentaires et les caractères morphologiques sont souvent ambigus (mâchoire en U ou parabolique?), ce qui rend difficile leur interprétation. L'**encadré du doc. 1** illustre les difficultés rencontrées par les paléoanthropologues et leurs errances dans l'attribution d'un fossile à une espèce et même un genre.

2 DOC. 2 (*Recenser des informations*). L'Homme de Florès appartient sans conteste au genre *Homo*. En effet, son squelette crânien et post-crânien présente tous les caractères propres au genre *Homo*, dont notamment ceux liés à la bipédie stricte. (Par ailleurs, l'Homme de Flores fabriquaient des outils). Le cas de l'Homme de Flores est problématique, car il rassemble des caractères que l'on retrouve chez trois autres espèces très distinctes : *Homo erectus* (forme du crâne), *Homo habilis* (forme des os du poignet) et *Homo sapiens* (nanisme).

3 DOC. 3 (*Recenser des informations, mobiliser des connaissances*). Sur la base de critères anatomiques, *H. sapiens* et *H. neanderthalensis* ont longtemps été considérées comme deux espèces distinctes. Leur morphologie crânienne présente en effet d'importantes différences (front bas, bourrelets sus orbitaires très prononcés, absence de menton chez les néandertaliens). Cette conclusion a été confortée lorsque l'on a obtenu des séquences d'ARN mitochondriales néandertaliennes et pu les comparer à celles des Hommes actuels. Très récemment, en 2010, le génome complet de l'Homme de Neandertal a été séquencé. On s'est alors aperçu que des séquences non codantes du génome de certaines populations humaines actuelles (français, chinois et mélanésien par exemple) avait une origine néandertalienne. Cela signifie, que les Hommes anatomiquement modernes et les Hommes de Neandertal se sont hybridés dans le passé. Or, s'il y a eu hybridation et qu'on en trouve la trace dans le génome des populations humaines actuelles, c'est que les deux étaient interféconds. *H. neanderthalensis* et *H. sapiens* ne seraient alors pas deux espèces distinctes, mais deux sous-espèces : *Homo sapiens neanderthalensis* et *Homo sapiens sapiens*. Si elles se confirment, les comparaisons génétiques réalisées récemment entre *H. sapiens* et *H. neanderthalensis* suggèrent que des différences anatomiques importantes peuvent exister entre deux sous-espèces.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). De nombreux fossiles appartenant au genre *Homo* ont été décrits et proviendraient d'une dizaine d'espèces différentes. Dans le détail, les relations de parentés au sein du genre *Homo* restent délicates à établir, et font l'objet d'intenses débats, comme par exemple ceux qui ont lieu autour de l'Homme de Florès ou de l'Homme de Néandertal. La raison de ces difficultés est inhérente aux restes fossiles. Ceux-ci sont rares, le plus souvent fragmentaires, et présentent parfois des caractères ambigus, voire une mosaïque de caractères, difficilement interprétable. De fait il est impossible de déterminer à coup sûr des liens de parenté.



EXERCICES DU THÈME 1

Les corrigés des exercices des rubriques « Évaluer ses connaissances » et « S'entraîner avec un exercice guidé » se trouvent à la fin du manuel (p. 366).

Chapitre 1

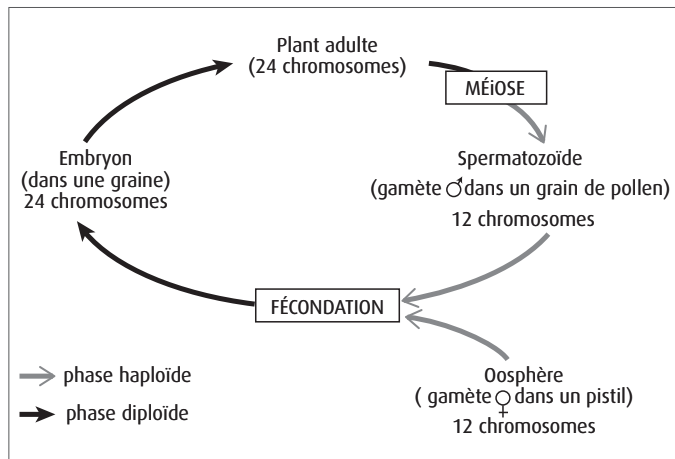
[pp. 37-38 du manuel]

④ LE BRASSAGE GÉNÉTIQUE CHEZ LES VÉGÉTAUX

Mobiliser ses connaissances et raisonner

Réponses attendues :

2. cf. schéma ci-dessous.



2. Si l'on émet l'hypothèse que les mécanismes de la reproduction sexuée sont similaires chez les végétaux et chez les animaux, alors les résultats des croisements réalisés chez la Tomate s'interprètent de la façon suivante. Tous les individus F1 ont des fruits entiers et des rameaux violets. Or, ils sont hétérozygotes pour les gènes « forme des fruits » et « couleur des rameaux » puisqu'ils ont reçu un allèle de chaque gène de chacun de leur parent homozygote. Les allèles « fruits entiers », E, et « rameau violet », Vi, sont donc dominants sur les allèles « fruits divisés », d, et « rameau vert », ve. Les résultats obtenus en F2 montrent l'apparition de 4 types de descendants : 38,5 % de chacun des 2 phénotypes parentaux [E Vi] et [d ve], et 11,5 % de chacun des 2 phénotypes recombinés [E ve] et [d Vi]. Or, si l'on se réfère à ce que l'on sait de la méiose chez les animaux, on peut dire que si les 2 gènes étudiés étaient situés sur des chromosomes différents, on devrait obtenir 4 phénotypes en proportions égales alors que s'ils sont situés sur le même chromosome, on doit obtenir 2 phénotypes parentaux majoritaires et 2 phénotypes recombinés minoritaires. Les résultats expérimentaux correspondent plutôt à la deuxième hypothèse : on peut donc dire que les résultats obtenus lors du croisement réalisé chez la Tomate s'expliquent par la présence des deux gènes étudiés sur le même chromosome. Des crossing-over lors de la méiose ont permis l'apparition de nouvelles combinaisons d'allèles, (E ve) et (d Vi), dans les gamètes impliqués dans la fécondation.

⑤ UNE ÉVALUATION DU RISQUE GÉNÉTIQUE

Raisonner

Piste : approche mathématique du risque génétique

Réponses attendues :

1. Laura et Georges sont atteints de la maladie alors que leurs parents respectifs ne le sont pas. L'allèle responsable de la phénylcétonurie dans cette famille est donc récessif.

2. On pose : S allèle sain, dominant, et m allèle conférant la maladie, récessif. Georges est atteint de phénylcétonurie, il a donc pour génotype : (m // m). Chloé, Tony et Aglaé sont tous les trois sains mais ont tous un enfant malade. Ils sont donc porteurs d'un allèle m, transmis à leur enfant malade, mais aussi d'un allèle S, responsable du fait qu'ils sont sains. Leur génotype est donc : (S // m).

3. Georges possédant deux allèles m, il ne peut transmettre à son enfant qu'un allèle m. Chloé étant hétérozygote, elle peut transmettre un allèle S ou un allèle m, chacun avec une probabilité de 50 %. L'enfant a donc 50 % de risque d'avoir pour génotype (m // m) et d'être malade.

4. Tony et Aglaé sont tous les deux hétérozygotes. Ils fournissent chacun 50 % de gamètes porteurs de S et 50 % de gamètes porteurs de m. La probabilité pour que leur enfant soit malade, i.e. de génotype (m // m), est donc de $1/2 \times 1/2 = 1/4$.

⑥ LA COULEUR DU PELAGE DES LABRADORS

Raisonner et adopter une démarche explicative

Réponses attendues :

1. Les chiens au pelage noir possèdent au moins un allèle B, dominant, responsable de la synthèse du pigment noir, et au moins un allèle E, dominant, nécessaire à la synthèse des pigments. Leur génotype est donc (B // x, E // y), x pouvant correspondre à B ou b, et y pouvant correspondre à E ou e. Les chiens au pelage chocolat possèdent obligatoirement deux allèles récessifs b, responsables de la synthèse de pigment brun, et au moins un allèle E. Leur génotype est donc (b // b, E // y). Les chiens au pelage sable ont obligatoirement deux allèles récessifs e, empêchant la synthèse de pigments. Ils peuvent par contre posséder n'importe quels allèles du gène TYRP1. Leur génotype est donc (x // x; e // e).

2. On sait d'après la question précédente que le mâle sable a pour génotype (x // x, e // e) et que la femelle chocolat a pour génotype (b // b, E // y). Les chiots obtenus ont donc obligatoirement reçu un allèle e de leur père et un allèle b de leur mère. Des chiots sable sont obtenus à l'issue du croisement, cela signifie que la mère a elle aussi transmis un allèle e à ces chiots. Le génotype de la mère est donc élucidé : (b // b, E // e). Des chiots noirs sont obtenus, cela signifie que le père a transmis un allèle B à ces chiots. Enfin, l'obtention de chiots chocolat montre que le père a aussi transmis un allèle b à certains de ses chiots. Le génotype du père

(...)

est donc (B // b , e // e). Un échiquier de croisement permet de vérifier nos conclusions :

Gamètes du père \ Gamètes de la mère	(<u>b</u> , <u>E</u>)	(<u>b</u> , <u>e</u>)
(<u>B</u> , <u>e</u>)	(B // b , E // e) [noir]	(B // b , e // e) [sable]
(<u>b</u> , <u>e</u>)	(b // b , E // e) [chocolat]	(b // b , e // e) [sable]

Les résultats théoriques obtenus avec de tels génotypes pour les parents sont : 50 % de chiots sable, 25 % de chiots noirs et 25 % de chiots chocolat, ce qui correspond bien aux résultats expérimentaux.

⑦ L'ORIGINE DES MUTANTS BAR ET ULTRA-BAR CHEZ LA DROSOPHILE

Raisonner

Aide à éventuellement fournir aux élèves :

Saisir des informations

Faites la relation entre phénotype de l'œil et nombre de copies du gène bar.

Montrez que la présence d'un phénotype nouveau chez les descendants (sauvage ou ultra-bar) est toujours associée à l'apparition d'une nouvelle combinaison des allèles des gènes forked et fused sur le chromosome.

Mobiliser ses connaissances

A l'aide de vos connaissances, nommez le mécanisme moléculaire conduisant à la présence de nouvelles combinaisons d'allèles sur un chromosome. Rappelez à quelles conditions ce mécanisme peut conduire à une modification du nombre de copies d'un gène.

Raisonner et conclure

Sous forme de schéma, montrez comment le mécanisme cité ci-dessus peut conduire aux combinaisons d'allèles observées chez les descendants du croisement.

Réponses attendues :

On observe un lien entre le phénotype de l'œil chez la drosophile mâle et le nombre de copies du gène bar sur son chromosome X : Les individus de phénotype sauvage portent 1 seule copie du gène. Les individus de phénotype [b] portent 2 copies du gène. Les individus de phénotype [Ub] portent 3 copies du gène. On observe que les descendants d'individus [b] présentant un phénotype nouveau dans la population (sauvage ou [Ub]) présentent soit une association f et Fu, soit une association F et fu, c'est-à-dire des allèles recombinés pour les gènes forked et fused. La présence de tels phénotypes nouveaux chez les descendants (sauvage et Ultra-bar) est donc toujours associée à la réalisation d'un crossing-over sur le chromosome X lors de la méiose des ovocytes de la mère. Or, on sait que la réalisation d'un crossing-over inégal peut conduire à des modifications de nombre de copies d'un gène. On peut donc émettre l'hypothèse que l'apparition de drosophiles sauvages et de mutants Ultra-bar dans les élevages d'individus bar est due à la réalisation de crossing-overs inégaux sur les chromosomes X lors de la méiose conduisant à la formation des ovocytes.

Remarque : Il n'y a pas d'individu [Fubfu] à l'issue de ce croisement. Les mutants portant l'allèle Ub sont plus fragiles que les sauvages. Il devrait y avoir autant d'individus [b] que de [Ub], c'est-à-dire 2+1 ; mais les embryons [Ub] sont défavorisés et meurent plus facilement. L'explication donnée dans l'article de Morgan :

« This hypothesis makes reverted round and double-bar complementary cross-overs, and they should accordingly be produced with equal frequency. ... round is far more frequent than double-bar, but such a result was to be expected for two reasons. Double-bar is not as viable as round, so that fewer of the double-bar mutant individuals would be expected to survive; and double-bar is not always clearly distinguishable from bar ».

Chapitre 2

[pp. 54-56 du manuel]

⑤ UN NOUVEAU COMPORTEMENT CHEZ LES MÉSANGES DE GRANDE-BRETAGNE

Mettre en relation les informations et formuler une hypothèse.

Réponses attendues :

1. D'après la carte, ce nouveau comportement est apparu pour la première fois dans deux régions distinctes de Grande-Bretagne, une au nord en 1921 et une au sud en 1926. Par la suite, les observations de ce comportement ont eu lieu dans des régions proches de ces deux premières observations. On peut donc faire l'hypothèse que ce nouveau comportement a été inventé séparément par deux individus puis qu'il s'est propagé par imitation de proche en proche. Le fait que d'autres espèces d'oiseaux (11) aient acquis le même comportement à la même période plaide pour une origine non génétique de ce nouveau comportement.
2. On constate dans cet exemple qu'un changement d'environnement (l'apparition d'une nouvelle source alimentaire potentielle, le lait) est à l'origine de l'apparition d'un nouveau comportement donc d'une diversification phénotypique individuelle. Cet apprentissage d'un nouveau comportement n'est pas lié à une modification génétique de l'individu. Néanmoins, il peut être transmis par imitation à d'autres individus et se propager dans une population, contribuant ainsi à une diversification non génétique du vivant.

⑥ UNE PARTICULARITÉ DES PLANTES LÉGUMINEUSES

Saisir des informations.

1. Il s'agit d'une relation symbiotique entre une légumineuse et des bactéries du genre Rhizobium. Une symbiose apporte des bénéfices à chacun de deux partenaires : les Rhizobium reçoivent des glucides formés par l'activité photosynthétique de la plante. La plante elle, reçoit de la part des Rhizobium des acides aminés dont l'azote provient de l'atmosphère.
2. L'association de la légumineuse avec Rhizobium modifie certains caractères de la plante comme la teneur en protéines des graines ou la capacité à vivre dans un sol pauvre en azote. Son phénotype est ainsi modifié.

⑦ LA TRANSMISSION DE LA RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES

Analyser des données et les mettre en relation avec ses connaissances.

1. L'expérience témoin montre que la résistance à la streptomycine

n'apparaît pas spontanément chez *Y. pestis*. En revanche, après la mise en contact au sein d'un intestin de puce entre des *E. coli* résistantes à la streptomycine et des *Y. pestis* non résistantes, on voit apparaître des *Y. pestis* résistantes, en d'autant plus grand nombre que l'infection a été longue. Nous pouvons donc faire l'hypothèse qu'un ou plusieurs gènes (*strA* et/ou *strB*), responsables de la résistance à la streptomycine chez *E. coli* ont été transférés par transfert horizontal à *Y. pestis*, lui conférant ainsi cette résistance.

2. Ce transfert de résistance à *Y. pestis* rend l'utilisation de la streptomycine inefficace sur ces bactéries. L'antibiotique a même un rôle d'agent de sélection naturelle qui favorisera les bactéries résistantes. En cas d'épidémie de peste, cet antibiotique sera donc inefficace dans la lutte contre la maladie, entraînant ainsi des conséquences lourdes en termes de santé publique.

⑧ LES PATTES DES SERPENTS

Analyser des données et raisonner.

1. Chez le poulet, l'expression d'*Hoxc-6* et *Hoxc-8* est limitée à la région du flanc durant l'embryogénèse, *Hoxc-6* ayant une zone d'expression légèrement antérieure à *Hoxc-8*. Chez le python en revanche les zones d'expression de ces deux gènes sont les mêmes et vont de l'avant des membres postérieurs jusqu'à la tête.

2. Les membres antérieurs se forment en avant d'une zone où seul *Hoxc-6* s'exprime. Une telle zone n'existe pas chez le python, ce qui empêche donc la formation d'un membre antérieur au cours du développement. Par ailleurs, l'expression simultanée d'*Hoxc-6* et *Hoxc-8*, que l'on observe sur la majorité de la longueur du corps du python, est à l'origine de la formation de vertèbres. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que la modification des zones d'expression des gènes *Hoxc-6* et *Hoxc-8* au cours du développement chez l'ancêtre des serpents a contribué à leur morphologie particulière.

Chapitre 3

[pp. 68-70 du manuel]

⑤ DEUX POPULATIONS DE MUNTJAC

Observer et raisonner

Réponses attendues :

1. Les caryotypes des deux espèces sont très différents, il n'est donc pas possible d'apparier les chromosomes au moment des divisions cellulaires. Si une fécondation a lieu elle ne peut se poursuivre par des divisions cellulaires.

2. D'après le critère de ressemblance les deux populations de Muntjac semblent relativement proches, néanmoins d'après le critère d'interfécondité, il est tout à fait certain que ces deux populations de Muntjac constituent des espèces différentes puisqu'elles ne peuvent s'hybrider.

⑥ LA PHALÈNE DU BOULEAU

Formuler une hypothèse

Réponses attendues :

1. Sachant que (fréquence de c + fréquence de C = 1), on constate que l'allèle C (rare en 1848) est devenu nettement majoritaire en 1948 dans les populations de phalènes de la région de Manchester. À l'inverse, l'allèle c, dominant en 1848 est devenu rare en 1948. La composition génétique des populations a changé en 100 ans.

2. L'allèle C étant responsable du phénotype sombre, on peut en déduire que les phalènes de la région de Manchester majoritairement blanches en 1848 sont devenues majoritairement sombres en 1948.

3. Avec le développement de la pollution fin du XIXe siècle en Angleterre, il est probable que les lichens clairs sont devenus rares sur les écorces. Ce changement d'environnement a sans doute eu un impact sur les phalènes blanches qui sont ainsi devenues très visibles pour leurs prédateurs. On peut donc faire l'hypothèse que les phalènes claires (porteuses de l'allèle c) ont été plus fréquemment capturées par les oiseaux, elles ont donc eu moins de descendants que les phalènes sombres (porteuses de l'allèle C, moins visibles sur les écorces sans lichen). C'est un cas de sélection naturelle, où les porteurs de l'allèle C (sombre) ont été favorisés et sont devenus plus nombreux dans la population.

⑦ LES CHIENS DOMESTIQUES

Formuler une hypothèse

Réponses attendues :

1. Certaines définitions de l'espèce comme la définition typologique sont basées sur le critère de ressemblance : deux individus sont de la même espèce s'ils se ressemblent.

Les définitions tenant compte de la théorie de l'évolution sont basées sur le critère d'interfécondité, comme la définition biologique de l'espèce. Dans ce cas deux individus sont de la même espèce s'ils peuvent se reproduire entre eux et avoir une descendance fertile.

2. Les chiens présentent de fortes différences morphologiques entre races (un teckel et un lévrier par exemple), le critère de ressemblance ne peut donc pas s'appliquer. Néanmoins les chiens peuvent théoriquement se reproduire entre eux et avoir une descendance fertile, le critère d'interfécondité permet donc de dire qu'il s'agit bien de la même espèce. Pratiquement, cette interfécondité a des limites : les accouplements et les gestations peuvent poser problèmes entre races trop dissemblables.

⑧ MIGRATION ET ÉVOLUTION DU ZOSTEROPS À DOS GRIS

Formuler une hypothèse

Réponses attendues :

1. La diversité allélique se réduit considérablement (de 12 u.a. à 6 u.a.) au fil des migrations du zosterops. Ceci signifie qu'il y a moins de diversité génétique dans les populations de zosterops après chaque migration. Il s'agit probablement d'un cas d'effet fondateur (cas particulier de dérive génétique) au cours duquel un petit nombre d'individus (dont le patrimoine génétique est aléatoire et ne représente pas toute la diversité de la population mère) migre et fonde une nouvelle population isolée de la population d'origine. Le nombre d'allèles présents dans cette nouvelle population est inférieur au nombre d'allèles présents dans la population initiale.

2. Les populations colonisatrices ont une plus faible diversité génétique mais on suppose d'après le texte qu'elles ont probablement

(...)

été fondées par un petit groupe d'individus. On peut donc faire l'hypothèse qu'aléatoirement, par dérive génétique, certains allèles risquent d'être fixés ou de disparaître réduisant encore la diversité génétique consécutive à la migration. Ce mécanisme sera d'autant plus rapide que la population est petite.

⑨ L'ORIGINE DES OISEAUX COUREURS

Formuler une hypothèse

Réponses attendues :

D'après l'arbre phylogénétique on constate que les ratites ont un ancêtre commun qui a vécu avant l'ouverture des océans Indien et Atlantique Sud. On peut donc faire l'hypothèse qu'une population ancestrale de ratites vivait initialement sur un grand continent. Cette population a été séparée en deux par l'ouverture de l'océan Indien donnant deux populations de ratites : la population ancestrale du groupe « nandou + autruche » et la population ancestrale du groupe « émeu + casoar + kiwi ». Chacune de ces deux populations a à son tour été fragmentée. Par exemple la population ancestrale du groupe « nandou + autruche » a été séparée par l'ouverture de l'océan Atlantique, chacune des populations (africaine et américaine) a ensuite évolué séparément (par dérive et par sélection) pour donner deux espèces différentes mais apparentées. Le même mécanisme peut sans doute être évoqué pour les espèces d'Océanie.

Chapitre 4

[p. 91 du manuel]

④ VITAMINE C ET ÉVOLUTION DES PRIMATES

Expliquer des résultats expérimentaux.

Réponses attendues :

1. Le doc. 1 montre que chez les 4 primates considérés, le gène de la GULO présente la même délétion du nucléotide (correspondant à la cytosine en position 30 du gène de la GULO du rat). Il s'agit d'une mutation partagée par l'ensemble de ces primates, on peut donc émettre l'hypothèse qu'il s'agit d'un caractère hérité d'un même ancêtre commun. Une délétion est une mutation décalante qui modifie le cadre de lecture du gène et provoque l'apparition d'un codon non-sens (codon stop) prématuré. La protéine produite est donc tronquée. On peut donc formuler l'hypothèse que tous ces primates possèdent une forme inactive de la GULO, les rendant incapables de synthétiser l'acide ascorbique.

2. On peut faire l'hypothèse que la sélection naturelle n'a pas éliminé les premiers primates porteurs de la forme inactive du gène de la GULO, parce que leur régime alimentaire (à base de végétaux et de fruits), apportait suffisamment d'acide ascorbique et palliait largement l'absence de GULO active. La dérive génétique permet d'expliquer comment cette mutation s'est ensuite maintenue et fixée au sein d'une petite population de primates à l'origine de tous les primates de l'ancien monde actuel.

⑤ ORIGINE DE L'HOMME MODERNE ET DU LANGAGE

Mettre en relation des informations

Exploitation du doc. 1. Les plus anciens *Homo sapiens* connus à ce jour sont africains (Éthiopie). Ce constat suggère que l'émergence des Hommes anatomiquement modernes a eu lieu uniquement en Afrique, il y a 0,2 Ma environ.

Exploitation du doc. 2. L'hétérozygotie est un indice permettant de mesurer la diversité allélique au sein d'une population. On constate qu'il existe une relation (linéaire) entre l'hétérozygotie des populations humaines actuelles, et leur éloignement géographique par rapport à Addis-Abeba : plus une population humaine est éloignée d'Addis-Abeba, moins son taux d'hétérozygotie est élevé. Un modèle de migrations de proche en proche, à partir d'une unique population ancestrale située en Afrique, permet d'expliquer cette diminution de la diversité allélique des populations humaines actuelles en fonction de leur éloignement par rapport à l'Afrique. En effet, dans ce modèle, une petite population d'êtres d'humains part fonder une colonie et s'isole génétiquement de la population mère d'origine, située en Afrique. La diversité allélique de cette première colonie présente alors, du fait de l'échantillonnage (effet fondateur), une diversité allélique plus faible que celle d'origine. Par la suite, le phénomène de colonisation se répétant, de nouveaux territoires de plus en plus éloignés sont progressivement colonisés par des populations d'humains dont la diversité allélique est de plus en plus faible.

Exploitation du doc. 3 : Ce document montre que les langues africaines sont celles qui contiennent la diversité de phonèmes la plus élevée. Cette diversité diminue progressivement hors d'Afrique, en allant vers l'est. Cette situation rappelle singulièrement celle observée précédemment pour l'hétérozygotie des populations humaines hors d'Afrique. Elle suggère une origine africaine du langage.

Synthèse : il existe un faisceau d'arguments paléontologiques (doc. 1), génétiques (doc. 2) et culturels (doc. 3) indiquant que toutes les populations humaines actuelles sont issues d'une population ancestrale unique d'Hommes anatomiquement modernes, dont les premiers représentants apparaissent vers - 0,2 Ma.

Remarque : Les études de génétique montre que la population de Bushmen (répartie en Namibie, au Botswana, en Afrique du Sud et en Angola) possède la diversité allélique la plus élevée parmi toutes les populations humaines actuelles. La langue des Bushmen est l'une des rares à utiliser des « clics » comme phonème. Certains scientifiques considèrent que le peuple Bushmen est le plus proche de la population humaine ancestrale.

Objectif bac

[p. 92-93 du manuel]

① LES ANOMALIES AU COURS DE LA MÉIOSE

L'exposé construit peut comporter deux parties : l'une concernant les crossing-over inégaux et la duplication de gènes qu'ils impliquent (cf. doc 1 p 28 pour le schéma associé), l'autre sur les mouvements anormaux de chromosomes et les aneuploïdies qu'ils impliquent (cf. p 33 pour le schéma associé, un schéma similaire montrant une anomalie de répartition des chromatides en anaphase II pourrait aussi être proposé).

② L'ÉVOLUTION DES PRIMATES

1. b

2. d

③ ÉVOLUTION DES POPULATIONS DE MOINEAUX DOMESTIQUES AUX ÉTATS-UNIS

Le document 2 est une carte des écarts à la température moyenne sur le territoire des États-Unis en 2009. On constate que le centre

et le nord des États-Unis ont une température moyenne plus faible que les côtes océaniques ou les régions du sud. On constate sur le document 1 que les moineaux ont une taille qui suit globalement cette répartition des températures : les individus sont plus gros dans les régions les plus froides et plus petits dans les régions les plus chaudes. Il y a donc une corrélation entre la répartition des tailles de moineaux et la répartition des écarts à la température moyenne. Cette corrélation correspond-elle à un lien de causalité ? L'énoncé nous apprend que les moineaux sont issus d'une introduction depuis des populations de moineaux européens au milieu du XIX^e siècle. On peut donc faire l'hypothèse que les variations de taille observée aujourd'hui sont le résultat d'une modification des populations postérieure à l'introduction. D'après l'énoncé, les moineaux de taille plus importante résistent mieux aux basses températures. On peut donc faire l'hypothèse que par sélection naturelle les individus les plus gros ont été sélectionnés dans les régions froides. Cela nécessite que le caractère « taille » soit au moins partiellement d'origine génétique : au fil des générations les moineaux possédant le caractère grande taille ont eu une meilleure survie et par conséquent ont contribué davantage à la composition génétique de la génération suivante, augmentant ainsi la fréquence du caractère « grande taille » au fil des générations. Cet effet est peut-être renforcé par un avantage sélectif des moineaux à petites tailles dans les régions plus chaudes, mais aucune donnée ne permet ici de l'affirmer.

Les populations de moineaux ainsi isolées sur le plan géographique peuvent évoluer séparément : elles accumuleront alors des différences génétiques. Au bout d'un certain temps, on peut imaginer que les différences seront telles que les moineaux d'une région (la Californie par exemple) ne pourront plus se reproduire avec ceux d'une autre (le Kansas par exemple) : cet isolement reproducteur entraînera un isolement génétique et chaque population formera une nouvelle espèce (spéciation).

④ UNE ASSOCIATION ENTRE XANTHELLES ET ANÉMONES DE MER

Doc 1 : Les xanthelles fournissent des matières organiques aux anémones tandis que ces dernières fournissent des matières minérales aux xanthelles. Ainsi, l'association xanthelles-anémones est à bénéfice réciproque pour les deux partenaires : on peut donc parler de symbiose.

Doc 2 : La quantité de ¹⁴C fixé par les xanthelles est plus importante (presque d'un facteur 3 par rapport au milieu de culture témoin,

l'eau de mer) lorsque celles-ci sont mises en présence du broyat d'une anémone. On peut penser qu'il existe au sein de l'anémone une substance qui stimule la photosynthèse des xanthelles. La quantité de ¹⁴C fixé est encore plus importante (d'un facteur 8 par rapport au témoin) si l'anémone broyée était pourvue de xanthelles. Il semblerait donc qu'en présence de xanthelles, l'anémone libère une quantité encore plus importante de la substance stimulatrice de leur photosynthèse. D'autre part, la quantité de ¹⁴C exporté par les xanthelles est 2 fois plus importante lorsqu'elles sont en présence d'un broyat d'anémone pourvue de xanthelles (il n'y a pas de différence par rapport au témoin lorsque les xanthelles sont en présence d'un broyat d'anémone dépourvue de xanthelles). La présence de xanthelles favorise donc également la libération par l'anémone d'une substance qui stimule l'exportation de matières organiques par les xanthelles elles-mêmes.

Doc 3 : Au fil du temps, la répartition des anémones est inchangée lorsque celles-ci sont dépourvues de xanthelles. Par contre, le pourcentage d'anémones à la lumière augmente lorsqu'elles sont pourvues de xanthelles (il passe de 50 % à 95 % en 14 jours). La présence de xanthelles favorise donc le déplacement des anémones vers la lumière.

Conclusion : Chacun des partenaires de l'association modifie le comportement de l'autre : l'anémone favorise l'activité photosynthétique et l'exportation de matières organiques par les xanthelles alors que celles-ci favorisent le déplacement de l'anémone vers la lumière. Ces modifications réciproques de phénotype augmentent l'efficacité de la symbiose.

BIBLIOGRAPHIE

- « *Introduction à l'analyse génétique* » A. J. F. Griffiths et coll., De Boeck, 2006.
- « *Exercices et problèmes de génétique* » G. Broussal, Flammarion Médecine, 1998.
- « *Aux origines de la sexualité* » P.-H. Gouyon, A. Racinais, Fayard, 2009
- « *Biologie et phylogénie des Algues* » B. De Reviers, Tome 1, Belin Sup, 2002.
- « *La symbiose* », M. A. Selosse, Vuibert, 2000.
- « *La classification phylogénétique du vivant* » G. Lecointre et H. Le Guyader, Belin, 2006.
- « *La famille de l'homme* » de L. De Bonis, Belin/Pour La Science, 1999.
- « *Aux origines de l'Humanité* » Y. Coppens, P. Picq. Fayard, 2002.

THÈME 2 RELATION ENTRE ORGANISATION ET MODE DE VIE DES PLANTES A FLEURS

CHAPITRE 1

Organisation des plantes à fleurs et vie fixée

UNITÉ 1

Les plantes à fleurs dans leur environnement

[pp. 102-103 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Les caractéristiques de la plante sont en rapport avec la vie fixée à l'interface sol/air dans un milieu variable au cours du temps.	• Conduire une étude morphologique simple d'une plante commune. • Effectuer une estimation (ordre de grandeur) des surfaces d'échanges d'une plante par rapport à sa masse ou son volume. Comparer avec un mammifère par exemple. • Représenter schématiquement l'organisation d'une plante type et savoir en décrire un exemple.

Conseils et suggestions

- La **page d'ouverture du chapitre** permet d'introduire les difficultés pour une plante fixée, dans sa lutte contre un prédateur.
- L'objectif de ce chapitre est de montrer comment l'évolution a permis aux plantes à fleurs de développer des mécanismes permettant d'une part d'assurer, sans se déplacer, son alimentation et d'autre part, de lutter contre leurs prédateurs et les conditions de milieu défavorables.
- Dans cette première unité, on aborde les deux types de plantes à fleurs par le biais d'écosystèmes typiques, la prairie pour les plantes herbacées et la forêt pour les plantes ligneuses.
- Cela peut donner lieu à une sortie sur le terrain, au cours de laquelle les observations *in situ* seront complétées par la récolte (modérée) d'échantillons. Des mesures chiffrées pourront être effectuées sur place (taille et densité des plantes, âge des arbres...).
- La comparaison de l'anatomie des deux grands types de plantes à fleurs permettra de fournir un vocabulaire botanique précis.
- L'idée générale de cette unité est de montrer l'unité d'organisation des plantes à fleurs en liaison avec leur vie fixée.
- L'**atelier d'exploration « informatique »** (p. 137) complète cette étude, en permettant une évaluation de la surface d'échange foliaire d'une plante herbacée.
- L'exercice 3 p. 114 se réfère à cette unité.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1, 2 ET 5 (*Extraire et organiser des informations à partir de différents documents*). L'élève peut réaliser un tableau de comparaison des deux écosystèmes, en comparant le type de plantes présentes (plantes herbacées exclusives / plantes ligneuses domi-

nantes), l'organisation de la végétation (basse et dense / stratifiée et haute), la répartition de la biomasse (principalement souterraine / essentiellement aérienne)...

2 DOC. 1, 4 ET 6 (*Organiser des informations*). Les plantes à fleurs, qu'elles soient herbacées ou ligneuses, possèdent un appareil aérien, en contact avec l'atmosphère et la lumière (pour assurer la photosynthèse); rigidifié par la présence de lignine dans les cellules chez les arbres et arbustes, il reste beaucoup plus souple dans les plantes herbacées. Cette tige porte des feuilles, et est ramifiée; des bourgeons se trouvent classiquement à la base des feuilles et à l'extrémité des ramifications, assurant la croissance de la plante. Dans le sol, l'appareil racinaire, présent dans les deux types de plantes, assurent l'absorption minérale et l'ancrage de la plante.

3 DOC. 3, 4, 6 ET 7 (*Communiquer à l'aide d'un schéma*). Sur un schéma de même type que celui de la page 110, l'élève met en évidence les surfaces d'échange que constituent les feuilles et les racines. Les premières assurent les échanges nécessaires à la photosynthèse avec le milieu aérien (absorption de CO₂ et de lumière); les secondes permettent l'alimentation en eau et sels minéraux de la plante.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Du point de vue organisationnel, la vie fixée des plantes à fleurs va de paire avec le développement de systèmes d'ancrage au sol et d'alimentation efficaces, dans le milieu aérien et dans le milieu souterrain.

Ainsi les plantes à fleurs, herbacées ou ligneuses, présentent-elles une tige feuillée avec une vaste surface d'échange avec l'air et de capture d'énergie lumineuse pour permettre la photosynthèse; un système racinaire assurant la fixation au sol et un contact étendu avec celui-ci pour l'alimentation minérale de la plante.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Elle développe des surfaces d'échanges de grande dimension avec l'atmosphère (échanges de gaz, capture de la lumière) et avec le sol (échange d'eau et d'ions).	• Réaliser et observer une coupe anatomique dans une tige ou une racine. • Effectuer une estimation (ordre de grandeur) des surfaces d'échanges d'une plante par rapport à sa masse ou son volume. Comparer avec un mammifère par exemple.

Conseils et suggestions

- Cette unité permet de montrer l'organisation fonctionnelle des deux surfaces d'échanges.
- L'élève pourra faire des observations microscopiques, après quelques manipulations simples (doc. 1, 2 et 4).
- Au niveau foliaire, une coupe de limbe montre la stratification classique (doc. 1) : l'élève peut illustrer la relation structure-fonction au niveau d'une feuille.
- Après avoir observé la structure des stomates (doc. 2), l'élève pourra étudier leur comportement au cours d'une journée (doc. 3), afin de déduire leurs rôles pour la plante.
- Au niveau des racines, l'observation des poils absorbants (doc. 4) pourra être complétée par la mise en évidence expérimentale de leur rôle d'absorption (voir l'atelier d'exploration « Le coin du labo », p. 136) et des expériences dans des sols carencés en minéraux (doc. 5 et 6).
- Les exercices 4 p. 114 et 7 p. 116 se réfèrent à cette unité.

Exploitation des documents par les activités

- 1 DOC. 1** (*Communiquer avec un schéma*) Le schéma (voir p. 110) met en évidence la relation structure-fonction dans la feuille :
- richesse en cellules chlorophylliennes sur la face supérieure de la feuille (là où arrive la lumière).
 - disposition des stomates principalement sur la face inférieure de la feuille (à l'abri d'un échauffement direct par le soleil et évitant donc la déshydratation de la feuille).
 - présence d'une cuticule supérieure (protection contre la déshydratation).
- 2 DOC. 1 À 3** (*Extraire et organiser des informations à partir de différents documents*). Les stomates permettent des échanges gazeux avec l'atmosphère : CO₂ absorbé pour la photosynthèse (et rejeté par la respiration), O₂ rejeté par la photosynthèse (et

absorbé pour la respiration), vapeur d'eau perdue lors de la transpiration foliaire stomatique. Ils s'ouvrent à la lumière (de l'aube au crépuscule), permettant l'absorption de CO₂ et la synthèse de matières organiques. Mais ils se referment lorsque l'ensoleillement est maximal (forte chaleur en milieu de journée), ce qui limite la déshydratation de la plante par transpiration stomatique. La transpiration cuticulaire est limitée par la cuticule cireuse qui recouvre l'épiderme supérieur.

3 DOC. 4 (*Mettre en relation des informations et raisonner*) Les poils absorbants sont très nombreux dans la zone pilifère ; ce sont des cellules très allongées, dont la paroi fine permet l'entrée de solutions minérales : ils développent ainsi une vaste surface d'absorption minérale.

4 DOC. 5 ET 6 (*Réaliser une synthèse*) En cas de carence minérale du sol, une plante peut augmenter sa surface d'échange avec le sol, par multiplication des racines secondaires (doc. 6) ou multiplication et allongement des poils absorbants (doc. 5).

5 EN CONCLUSION

Les structures permettant les échanges avec l'atmosphère sont les stomates des feuilles. Ils assurent les échanges gazeux de la photosynthèse (absorption du CO₂ atmosphérique, rejet de O₂) et de la respiration (absorption du O₂ atmosphérique, rejet de CO₂). Mais ils sont aussi un site de perte d'eau et leur ouverture peut s'accompagner d'une déshydratation de la plante. Aussi, ces stomates sont-ils disposés essentiellement sur la face inférieure des feuilles, et ne s'ouvrent qu'à la lumière si la chaleur n'est pas excessive. Les structures permettant les échanges avec le sol sont les poils absorbants. Ils assurent l'entrée de la solution minérale du sol. Leur longueur et leur nombre, importants, sont modulables en fonction des caractéristiques de structure et de composition du sol, permettant ainsi de pallier à d'éventuelles variations des ressources nutritives du sol (eau, sels minéraux).

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
Des systèmes conducteurs permettent les circulations de matières dans la plante, notamment entre systèmes aérien et souterrain.	Réaliser et observer une coupe anatomique dans une tige ou une racine.

Conseils et suggestions

- Dans le prolongement de l'unité précédente, nous étudions maintenant le devenir des matières absorbées ou fabriquées par la plante : la mise en évidence de deux flux de matières précèdera l'étude des deux types de tissus conducteurs.
- L'existence de deux sèves sera montrée à partir d'observations qui peuvent se faire dans la nature. On donne en complément, la composition simplifiée des sèves brute et élaborée (doc. 1).
- Au sein de la plante, une expérience simple montre le flux ascendant (doc. 2), complétée par une expérience d'autoradiographie pour le flux descendant (doc. 3).
- Une manipulation suivie d'observations microscopiques permettra de visualiser les tissus conducteurs de la tige (doc. 4).
- Une expérience utilisant des marqueurs fluorescents (doc. 5) permet de mettre en évidence la correspondance entre les deux sèves et les deux types de tissus conducteurs. Un schéma (doc. 6) offre une vue synthétique de cette organisation complexe des systèmes conducteurs dans la plante.
- L'exercice 8 p. 116 se réfère à cette unité.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Extraire et mettre en relation des informations pour formuler une hypothèse explicative*). La sève brute est très diluée (99 % d'eau) et contient essentiellement des éléments minéraux. La sève élaborée, moins diluée (80 % d'eau), contient des molécules organiques (glucides, acides aminés) et quelques éléments

minéraux. Hypothèse : la sève brute proviendrait de la solution minérale prélevée dans le sol, au niveau des racines. La présence de molécules organiques dans la sève élaborée suggère qu'elle se forme dans les feuilles, là où se fait la photosynthèse.

2 DOC. 2 ET 3 (*Eprouvez une hypothèse*). Il y a un flux ascendant de matière (doc. 2) et un flux descendant (expérience par marqueurs fluorescents, doc. 3). Le flux ascendant correspondrait à la sève brute (ou « sève ascendante »), celle qui se forme au niveau des racines (avant de remonter dans la plante...). Le flux descendant correspondrait à la sève élaborée (ou « sève descendante »), qui se forme au niveau des feuilles (avant de redescendre dans la plante...).

3 DOC. 4 À 6 (*Mettre en relation des informations et raisonner*). Le doc. 4 met en évidence l'existence de deux types de tissus conducteurs : le xylème et le phloème. L'expérience présentée doc. 5 permet d'associer chacun des tissus à un flux de sève donné. Les vaisseaux du xylème, marqués en rouge, (par la substance fluorescente issue des racines) transportent la sève brute ascendante (doc. 4). Les tubes criblés du phloème, marqués en vert, (par la substance fluorescente issue des feuilles) transportent la sève élaborée descendante.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). L'eau et les sels minéraux, prélevés au niveau des racines, forment la sève brute, puis remontent et sont distribués dans la plante par les vaisseaux du xylème. Les matières organiques, synthétisées dans les feuilles lors de la photosynthèse, forment la sève élaborée, avant de migrer dans l'ensemble de la plante par le phloème.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
Elle possède des structures et des mécanismes de défense (contre les agressions du milieu, les prédateurs, les variations saisonnières).	- Recenser, extraire et exploiter des informations concernant des mécanismes protecteurs chez une plante (production de cuticules, de toxines, d'épines ...). - Analyser les modalités de résistance d'une plante aux variations saisonnières.

(...)

Conseils et suggestions

- Dans cette unité, nous abordons un autre aspect de la vie plantes fixées : la lutte contre les agressions du milieu.
- Les prédateurs et les pathogènes constituent une menace fréquente mais aléatoire sur les plantes fixées, à laquelle elles répondent par des adaptations particulières acquises au cours de leur évolution (doc. 1 et 2). Parmi tous les mécanismes existants, nous étudierons un exemple original de relations entre des acacias et des antilopes en Afrique du Sud.
- Des mécanismes acquis lors de l'évolution des plantes à fleurs leurs permettent aussi de résister aux variations des conditions de leur milieu de vie (doc. 3 à 6), quelles soient saisonnières ou exceptionnelles.
- Les exercices 5 et 6 p. 115, et 4 p. 133 se réfèrent à cette unité.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Extraire et mettre en relation des informations*). En cas de surpopulation (> 5 koudous / 100 ha) et au fur et à mesure des attaques par les différents koudous qui se succèdent pour consommer les feuilles d'un même arbre, les acacias surconsommés accumulent des tanins dans leurs feuilles. Cela rend celles-ci de plus en plus toxiques, jusqu'à en devenir mortelles pour les koudous : ainsi, en cas de surpopulation des koudous et donc de surconsommation des acacias, la mortalité des koudous augmente. En conséquence, la pression de consommation sur les acacias baisse. Les populations de koudous et d'acacias sont ainsi régulées, assurant la survie de l'écosystème.

2 DOC. 1 ET 2 (*S'informer à partir d'un tableau*). Les plantes à fleurs ont développé des défenses de type mécanique (poils, épines) ou chimique, qui peuvent être présentes dans l'organisation de la plante (tanins) ou déclenchées en réaction à l'agression (morphine, éthylène).

3 DOC. 3 ET 4 (*Extraire et mettre en relation des informations*)

À l'approche de la mauvaise saison (baisse de la durée du jour et de la température), les arbres cessent leur activité métabolique (au niveau aérien et souterrain) et perdent leurs feuilles. Les sèves ne circulent plus et les bourgeons entrent dormance. L'arbre entre donc en vie ralentie. Elle constitue une adaptation au passage de l'hiver (en zone tempérée), saison peu favorable à la production de matière et à la croissance.

4 DOC 3 A 6 (*Extraire des informations*).

Les plantes à fleurs ont développé diverses stratégies de passage de l'hiver (bourgeon des arbres, rhizome, bulbe ou plantes en rosette chez les herbacées) qui ont toutes en commun de mettre à l'abri des rigueurs de l'hiver, un bourgeon, à partir duquel la croissance de la plante repartira l'année suivante. Ce bourgeon est enveloppé par des écailles imperméables chez l'arbre, abrité dans le sol (dans le rhizome et le bulbe) ou au ras du sol (chez le crépide). Certains de ces organes de survie contiennent des parties charnues, remplies de réserves nutritionnelles, facilitant la reprise de végétation au printemps suivant.

5 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*).

- La lutte contre les herbivores implique des mécanismes de défense passifs (éléments présents comme les épines ou présence constitutive de tanins) ou actifs (en réaction à une attaque, par la surproduction de molécules par exemple). Elle mobilise des structures anatomiques adaptées (épines, poils) ou la synthèse de produits chimiques (tanins, éthylène).

- La lutte contre les variations des conditions du milieu (froid de l'hiver par exemple) implique l'ensemble de la plante, qui modifie sa morphologie (perte de feuilles, protection des bourgeons par des structures spécialisées), son rythme de vie (entrée en vie ralentie), en attendant le retour de conditions plus favorables (chaleur, lumière) au printemps suivant.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« L'organisation florale, contrôlée par des gènes de développement, et le fonctionnement de la fleur permettent le rapprochement des gamètes entre plantes fixées. »	- Réaliser la dissection d'une fleur simple et traduire les observations sous une forme schématique simple (diagramme floral). - Observer l'organisation de deux fleurs simples à l'œil nu, à la loupe et au microscope (doc. 1 et 2). - Comprendre l'organisation florale : réalisation de diagramme floral (doc. 3 et 4 + une partie de l'exercice 5 p. 131). - Comprendre le contrôle de l'organisation florale (doc. 3, 4 et 5)

Conseils et suggestions

- La **page d'ouverture du chapitre** met en scène une drosophile et l'arabette des dames, cette dernière étant parfois surnommée « la drosophile végétale ». C'est une photo en forme de clin d'œil, évoquant les liens entre fleurs et insectes, même si, dans ce cas précis, la drosophile n'intervient pas dans la pollinisation de l'arabette (figurant d'ailleurs parmi les quelques plantes autogames).
- L'objectif de ce chapitre est de comprendre les modalités mises en place par les plantes à fleurs (Angiospermes) pour se reproduire et être disséminées bien qu'elles mènent une vie fixée.
- Lors de cette première unité, l'élève est amené à comprendre l'organisation générale d'une fleur en se basant sur des modèles simples puis son contrôle par les gènes du développement.
- La dissection proposée (**doc. 1**) a été réalisée sur la fleur de lisianthus. Cette fleur est assez commune chez les fleuristes et offre l'avantage de présenter toutes les pièces florales (sépal, pétale, étamine et pistil). On propose, après préparation de la fleur (quelques pièces florales sont retirées et le pistil coupé en coupe longitudinale) des observations à l'œil nu (vue d'ensemble et vue en coupe longitudinale) et à la loupe (détails d'étamines à maturité et du pistil en coupe longitudinale). Ces observations peuvent être mises en œuvre sur d'autres fleurs (à se procurer auprès d'un fleuriste ou dans la nature : exemple de la fleur de cerisier du **doc. 2**).
- La compréhension du contrôle de l'organisation florale (**doc. 3 à 6**) se fait à partir du modèle d'étude *Arabidopsis Thaliana*. Cette brassicacée est utilisée depuis le début du XX^e siècle par les généticiens car son génome ne comporte que 5 chromosomes, son cycle de vie (de graine à graine) est très court (6 semaines), elle est de petite taille et très résistante.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (Manipuler, extraire des informations).

La préparation de la fleur de lisianthus montre les différents types de pièces florales. Sont impliquées directement dans la reproduction :

- les étamines, qui produisent les grains de pollen contenant les gamètes mâles.
- le pistil qui produit des ovules contenant les gamètes femelles.

REMARQUE : les pétales ont également un rôle mais indirect dans la reproduction (leurs couleurs sont des signaux attractifs pour les insectes pollinisateurs, voir p. 122).

2 DOC. 1 À 3 (Extraire des informations à partir de différents documents et réaliser des diagrammes floraux comparatifs).

La correction des diagrammes floraux des fleurs de lisianthus et de cerisier se trouve p. 126.

La comparaison montre une organisation commune en verticilles : calice, corolle, étamines et pistil. C'est le nombre et l'aspect des pièces florales qui varient d'une fleur à l'autre.

3 DOC. 3 ET 4 (S'informer à partir d'un texte et d'un schéma).

Les **documents 3 et 4** permettent de comparer une fleur sauvage d'arabette (la fleur se trouve en plus gros plan p. 117) et celle du mutant *pistillata*. Chez ce mutant, les pétales et les étamines sont absents. En revanche, on observe deux verticilles de sépal (V1 et V2) et le pistil, de grande taille, comprend les verticille V3 et V4. L'organisation florale de la fleur mutante *pistillata* est donc bousculée. En particulier l'identité des organes floraux associés aux verticilles V2 et V3 est perturbée. On peut donc en conclure que le gène muté (*pistillata*) participe à leur mise en place, en situation normale : la mise en place de la fleur est sous contrôle génétique.

4 DOC. 4 ET 5 (Raisonnement à partir d'un texte et d'un schéma).

Le **doc. 5** offre un cadre théorique à ce contrôle génétique, en le généralisant aux autres verticilles. Ce sont des gènes du développement qui permettent de déterminer l'identité de chaque verticille. Si un ou plusieurs de ces gènes est/sont muté(s), le/les verticille(s) concerné(s) ne se développe(nt) pas ou mal.

D'après le modèle ABC, les gènes du groupe B contrôlent la mise en place des organes des verticilles V2 (pétales) et V3 (étamines). Or, le mutant *pistillata* est caractérisé par l'absence de pétales (remplacés par des sépales surnuméraires) et d'étamines (remplacées par des carpelles surnuméraires). On peut donc en conclure que le mutant *pistillata* est un mutant du groupe B.

Des compléments, ainsi que la description d'autres mutants sont fournis par les sites suivant :

– site INRP :

<http://www.inrp.fr/Access/biotic/morpho/html/phmutarab.htm>

– site INRA :

http://www.versailles-grignon.inra.fr/serre_expo/expo_temporaire/expo/fiches_plantes/fiche_arabidopsis

– site ACCES :

<http://accres.ens-lyon.fr/accres/ressources/dyna/developpement/enseigner/morphogenese-vegetale/morphogenese-florale/le-modele-abc/>

REMARQUE : le doc. 5, tout comme le doc. 3 p. 120, peut servir de document d'appel pour la construction de fiche métier (voir encart METIER p. 136).

5 EN CONCLUSION (Communiquer en rédigeant une synthèse).

Une fleur est classiquement composée de 4 verticilles : de l'extérieur vers l'intérieur, sépales, pétales, étamines et pistil. Seuls les 2 derniers types de pièces florales interviennent directement dans la reproduction (le pistil car il produit les gamètes femelles et les étamines qui produisent les gamètes mâles). La mise en place de ces pièces florales est contrôlée par l'expression de gènes appelés gènes du développement. Ces derniers, regroupés en 3 groupes (A, B et C), déterminent l'identité des pièces florales portées par chacun des verticilles.

UNITÉ 2 De la fleur au fruit

[pp. 120-121 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « À l'issue de la fécondation, la fleur se transforme en fruits contenant des graines. »	• Comprendre les étapes qui suivent la fécondation – Observer la formation du tube pollinique (Doc.1 et 2) – Comprendre la notion de pollinisation croisée (Doc. 3 et 4) – Observer différents stades de la transformation d'une fleur en fruit (Doc.5)

Conseils et suggestions

– Cette unité présente les mécanismes permettant la rencontre des gamètes (pollinisation puis croissance du tube pollinique) (**doc. 1 à 4**) et ce qui en est la conséquence (la formation de la graine et du fruit, **doc. 5**).

– Cette unité s'appuie sur des observations à la loupe, au microscope et à l'œil nu montrant les différentes transformations menant de la fleur au fruit. Une interview de chercheur permet d'aborder la notion de pollinisation croisée et des vecteurs la permettant (insectes et vent). La diversité des ressources utilisées est l'occasion de proposer de résoudre le problème posé sous la forme d'une tâche complexe : il s'agit pour l'élève de mobiliser des connaissances, de mettre en œuvre des capacités et attitudes afin de répondre à une problématique globale. L'élève construit sa propre démarche, en utilisant les ressources dont il dispose. S'il le souhaite, il peut s'aider des conseils proposés qui constituent une aide procédurale.

– **L'exercice 5 p. 131** permet de compléter ce travail par l'étude d'un autre exemple : la pomme et **l'exercice 4 p. 130** permet

d'aborder la transformation de la fleur en fruit et son contrôle hormonal.

REMARQUES :

Une manipulation pour observer la germination des grains de pollen est proposée sur le site suivant : http://svt.ac-reunion.fr/ressources/regionales/site_apoi/apoi4/4ch5_seq1_act2/4ch5_seq1_act2.htm

D'autres cas de pollinisation croisée obligatoire peuvent être étudiés : cas des espèces dioïques, des espèces monoïques avec fleurs mâles et femelles.

Certains cas de développement de fruit sans fécondation peuvent être abordés (parthénocarpie). Exemple : banane, clémentine.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 À 3 (Établir les étapes menant à la fécondation).

1^{er} étape : La pollinisation (dépôt de pollen sur les stigmates réceptifs du pistil – **doc.1**) se fait grâce vent ou aux insectes ou par autopolinisation (**doc. 3**).

2^e étape : il y a un afflux d'eau dans les grains de pollen (**doc. 1**).
3^e étape : les grains de pollen germent : ils développent un tube pollinique (**doc. 1**) dans le style (**doc. 2**).
4^e étape : après germination, le tube pollinique libère les gamètes mâles à proximité des gamètes femelles contenus dans les ovules (**doc. 2**). Il y a alors fécondation.

② (Expliquer en quoi la pollinisation croisée est avantageuse pour l'espèce).

La pollinisation croisée réalisée grâce aux insectes pollinisateurs ou au vent est avantageuse pour l'espèce car elle permet le brassage des gènes entre individu de la même espèce (ce que ne permet pas l'autopollinisation – voir **Thème 1 Chapitre 1** et notamment **l'exercice 4 p. 37**).

③ DOC. 4 (Donner un exemple de mécanisme empêchant l'autopollinisation).

Ce document montre une fleur de Pélargonium à deux stades successifs de développement. Chez cette espèce, au sein d'une même fleur, les anthères (pièces florales mâles) sont mûres avant que les stigmates soient réceptifs, ce qui empêche l'autopollinisation. Ainsi, chez cette espèce, l'absence de synchronisation dans la maturité des pièces florales mâles et femelles impose une pollinisation croisée.

④ DOC. 5 (Illustrer par un schéma le devenir de chaque type de pièces florales et des ovules après la fécondation).

Une fois que la pollinisation et la fécondation ont eu lieu, chaque pièce florale se transforme :

- L'ovaire se transforme en fruit.
- Chaque ovule se transforme en graine.
- Les sépales, les pétales et les étamines sèchent et tombent (des restes de ces pièces florales peuvent être parfois visibles, associés au fruit).

⑤ EN CONCLUSION

Après le dépôt de grains de pollen sur les stigmates du pistil (pollinisation), ces derniers germent et forment un tube conduisant les gamètes mâles jusqu'aux gamètes femelles dans l'ovaire. Il y a alors fécondation. Chaque ovule fécondé se transforme en graine et le pistil se transforme en fruit.

Une autopollinisation peut avoir lieu mais le cas le plus fréquent est la pollinisation croisée (entre deux fleurs différentes d'une même espèce). Elle permet un brassage des gènes d'individus différents de la même espèce.

UNITÉ 3 La réalisation de la pollinisation croisée

[pp. 122-123 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « La pollinisation de nombreuses plantes repose sur une collaboration animal pollinisateur/plante produit d'une coévolution. »	• Mettre en évidence les relations entre une plante et un animal pollinisateur. – Observer différentes stratégies d'attraction des animaux pollinisateurs (Doc. 1 à 4) – Observer différentes stratégies de transport des grains de pollen (Doc. 4 et 5) – Analyser des résultats d'étude montrant des corrélations d'évolution (Doc.6)

Conseils et suggestions

– L'unité précédente a montré que la pollinisation était la première étape indispensable à la fécondation et à la reproduction sexuée chez les plantes. Seule la pollinisation croisée permet un brassage génétique. Il s'agit ici de mettre en évidence les stratégies mises en place par les fleurs pour permettre d'optimiser la pollinisation croisée. La notion de coévolution entre animal pollinisateur et fleur est alors abordée.

- Les **documents 1 à 3** présentent différents signaux attractifs pour les insectes pollinisateurs : la couleur des pétales dans le **doc. 1**, la présence de nectaires dans le **doc. 2** et l'odeur dans le **doc. 3**.
- Les **doc. 4 et 5** permettent de comparer l'aspect des grains de pollen de fleurs à pollinisation entomogame et anémogame (res-

pectivement la rose trémière et une poacée). Le **doc. 5** montre également l'aspect particulier d'une fleur anémogame.

- Le **doc.6** aborde la notion de coévolution à travers l'analyse d'une étude expérimentale qui a été réalisée en Afrique du Sud.
- **L'exercice 6 p. 131** (fleur, odeurs et pollinisation) et **l'atelier ENQUETE** (contraintes de la coévolution : l'exemple de la vanille) apportent des compléments intéressants à ce sujet.

REMARQUES :

- D'autres signaux attractifs peuvent être étudiés comme par exemple la forme des fleurs ou des inflorescences (mimant un partenaire chez l'Ophrys, inflorescence mimant une grosse fleur chez les Astéracées).

(...)

- l'exemple de la sauge proposée sur <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Pollinisation/sauge1.htm> est également un bon exemple de dispositif particulier favorisant la pollinisation.
- d'autres animaux que les insectes peuvent assurer la pollinisation : oiseaux et chauve-souris par exemple.

Exploitation des documents par les activités

1 **DOC. 1 À 4** (*S'informer à partir de photos et de textes*).

Le **doc. 1** présente une fleur de caltha des marais, observée à la lumière visible ou observée sous UV. Uniquement sous UV, cette fleur présente des dessins à la base des pétales, là où sont placées les étamines. Contrairement aux humains, les insectes perçoivent les radiations UV. Ainsi, les insectes pollinisateurs sont potentiellement attirés par ces marques qui les dirigent vers les étamines. Ils peuvent alors récupérer du pollen sur leur abdomen lorsqu'ils visitent la fleur.

Le **doc. 2** montre la présence de nectaires et d'écailles nectarifères situés à la base des étamines. Or le nectar s'avère être la principale source de nourriture pour de nombreux insectes. Quand ceux-ci viennent se nourrir de nectar, ils peuvent récupérer du pollen sur leur abdomen.

Le **doc. 3** présente une fleur dont le signal attractif est odorant : elle dégage une odeur nauséabonde qui attire les insectes se nourrissant de matières fécales. Quand ceux-ci viennent visiter la fleur, ils peuvent en repartir avec du pollen sur leur corps.

Le **doc. 4** nous apprend que les grains de pollen sont une source de nourriture protéique pour les abeilles. D'autre part, l'observation de grains de pollen de rose trémière au MEB nous montre que ceux-ci possèdent une enveloppe externe richement ornementée qui peut donc s'accrocher facilement sur l'abdomen des insectes qui viennent butiner la fleur.

L'émission de différents signaux attractifs (couleur, source de nourriture : nectar, grains de pollen, odeur) favorise la pollinisation croisée en attirant les insectes pollinisateurs. En outre, l'ornementation de la paroi des grains de pollen optimise le transport des grains de pollen par les insectes en en assurant une meilleure adhésion.

2 **DOC. 5** (*S'informer à partir de photos et de textes*).

Chez les fleurs anémogames, telles que celles des poacées, la présence de grandes étamines pendant dans l'air facilite la libération des grains de pollen.

D'autre part, leurs stigmates ramifiés (plumeux) bien visibles à l'extérieur de la fleur peuvent ainsi capter le maximum de grains de

pollen se trouvant dans l'air. Les autres pièces florales sont réduites. Le texte nous apprend que les grains de pollen sont produits dans des quantités très importantes (jusqu'à un million/jour chez le seigle). La photographie nous montre un grain de pollen de poacée observé au MEB qui apparaît petit (10 à 25 μm) et lisse (en comparaison avec celui du **doc. 4**). Ces grains de pollen sont donc facilement transportables dans l'air.

Remarque : il est possible à cette occasion d'aborder la notion de pollen allergisant.

3 **DOC. 6** (*Mettre en relation des informations et raisonner*).

Sur la photo, on observe une fleur d'orchidée en vue latérale présentant un long éperon nectarifère (= pétale modifié creux et allongé). Grâce à l'échelle on peut en calculer la taille : environ 6,5 cm. En parallèle, l'élève peut constater que le proboscis (organe de succion de la mouche) est de la même longueur que l'éperon nectarifère. Le proboscis permet à ces mouches d'aller récupérer le nectar au fond des éperons nectarifères. Seules les mouches présentant un proboscis suffisamment long pour atteindre le fond de l'éperon nectarifère, où se concentre le nectar, seront nourries par la fleur. Ceci suppose une correspondance entre la longueur de l'éperon de la fleur et celle du proboscis de l'insecte qui la visite et la pollinise. L'étude présentée offre d'étudier la profondeur des fleurs et la longueur du proboscis des mouches de différentes régions. Ces longueurs varient en fonction des régions. Mais, dans une région donnée, on observe que la profondeur des fleurs et la longueur du proboscis des mouches ont des valeurs proches : plus la fleur est profonde plus le proboscis est long.

Cette étude de terrain est un exemple de coévolution : ces deux espèces ont subi des transformations coordonnées (élongation de l'éperon et du proboscis) en interaction l'une avec l'autre.

4 **EN CONCLUSION** (*Communiquer en rédigeant une synthèse*).

La pollinisation croisée nécessite un transport du pollen d'une fleur vers une autre. Ce transport peut être réalisé par le vent (fleurs anémogames) ou par des animaux (insectes dans le cas des fleurs entomogames). On observe diverses adaptations à ces modes de transport :

- développement de signaux attractifs (couleur, odeur, ressources nutritives) chez les plantes entomogames
- dispositifs particuliers leur permettant d'optimiser la pollinisation (forme et taille des grains de pollen, forme des pièces florales fertiles) chez les plantes anémogames et entomogames.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« La dispersion des graines est nécessaire à la survie et à la dispersion de la descendance. Elle repose souvent sur une collaboration animal disséminateur/plante produit d'une coévolution. »	- Mettre en évidence les relations entre une plante et un animal assurant sa dissémination. - Analyser des données de terrain (Doc. 1 et 5 à 7). - S'informer à partir de photos et mettre en relation des informations pour comprendre les stratégies de dissémination (doc. 2 à 4). - Réinvestir la notion de coévolution à propos de la dissémination des graines (doc.8).

Conseils et suggestions

– L'unité 2 a permis d'établir que la fécondation induit la transformation de l'ovaire en fruit et des ovules en graines (contenant l'embryon donc la génération suivante). Dans cette unité, il s'agira d'amener les élèves à étudier la dissémination des graines et ses principaux agents. Dans ce cadre, ils aborderont à nouveau la notion de coévolution.

– Les documents de la page 124 permettent d'aborder la diversité des modes de dispersion des graines. Le **doc.1** présente différents modes de dispersion observés dans une forêt malaisienne et leur efficacité en termes de distance. Les **doc. 2 à 4** illustrent ces différents modes.

Le terme de semence est utilisé car il regroupe les notions de fruit et de graine.

– Les documents de la page 125 permettent de revenir sur la notion de coévolution à travers l'étude d'un exemple: la dispersion des graines par les primates. Les **doc. 5 et 6** présentent les résultats d'une étude menée dans une forêt ougandaise. Ils montrent le rôle des primates dans la dispersion (**doc.5**) et la germination des graines (**doc. 6**). Le **doc. 7** étudie la préférence alimentaire des gibbons dans une forêt de Bornéo. Le **doc. 8** est extrait d'une revue où un scientifique présente les modalités de la coévolution primates/fruits.

REMARQUES :

D'autres stratégies de reproduction peuvent être abordés: la barochorie (les fruits et graines lourds tombent à proximité de la plante mère – ex: le châtaignier) ou encore l'hydrochorie (les fruits et graines sont disséminés par les courants d'eau – ex: la noix de coco).

– Un article de Pour la Science reprend la notion générale de coévolution:

http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/f/fiche-article-coevolution-pour-survivre-21182.php

– Un article de La Recherche, présente différentes stratégies de dissémination des graines ou fruits.

<http://www.larecherche.fr/content/recherche/article?id=8999>

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Comparer des données pour extraire des informations et raisonner*).

Parmi les différents modes de dispersion ou dissémination des semences répertoriés dans la forêt Malaisienne, les chercheurs ont distingué la balistique (sans l'intervention d'éléments extérieurs), le vent et les animaux. Ces derniers sont ceux qui concernent le plus d'espèces de plantes (483 contre respectivement 16 et 19). La distance de dissémination est fonction du mode utilisé, la plus efficace étant les animaux (d'autant plus que leur taille augmente) et la moins efficace étant la balistique.

Cette étude montre l'importance à la fois qualitative (variété des espèces disséminées) et quantitative (distance de dissémination) des animaux dans la dissémination des semences, donc la colonisation de nouveaux milieux.

2 DOC. 2 À 4 (*S'informer à partir de photos, mettre en relation des informations pour proposer une explication*).

Espèce	Mode de dispersion	Adaptation du fruit ou de la graine
Epilobe (Doc. 2)	Vent	La graine est légère, petite et son petit plumeau facilite sa portance dans l'air.
Cornouiller (Doc.3)	Animaux (le fruit est consommé et les graines rejetées avec les excréments)	Le fruit est rouge et charnu.
Aigremoine (Doc.4)	Animaux (le fruit s'accroche au pelage)	Le fruit possède des petits crochets qui peuvent s'accrocher au pelage (comme du velcro!).

3 DOC. 5 ET 6 (*Extraire des informations et raisonner*).

L'étude menée dans la forêt de Kibale en Ouganda (**doc. 5**) montre que les primates comptent parmi les principaux consommateurs de fruits (25 à 40 %) et que les fruits représentent 82 % de leur ration alimentaire. En les consommant, ils participent à leur dissémination

(...)

puisque 4 espèces de primates rejettent sur 1 km² les graines de 35 000 fruits par jour. Il y a donc bien une collaboration entre les primates et les plantes à fleurs : les primates se nourrissent de leurs fruits et les plantes sont disséminées.

Le **doc. 6** permet d'étudier l'impact de la consommation de 4 espèces de plantes sur la germination. Ces 4 exemples mènent à la même conclusion : des graines issues d'excréments germent plus facilement que des graines non issues d'excréments (pour 3 cas sur 4, la germination est même impossible si les graines n'ont pas fait un passage préalable par le tube digestif de ces primates). Il y a donc bien une collaboration entre les primates et les plantes à fleurs : les primates se nourrissent de leurs fruits et la germination des graines est facilitée voire rendue possible par le passage dans le tube digestif des primates.

4 DOC. 7 ET 8 (*Extraire et mettre en relation des informations*).

Le **doc. 7** montre une attirance des gibbons pour les fruits à pulpe douce et juteuse (85 % de la ration alimentaire) au détriment des autres fruits (à pulpe très réduite, à pulpe fibreuse et juteuse et les fruits secs). Ce classement ne correspond pas exactement à la proportion de ces fruits parmi les fruits de la forêt. On peut donc en déduire que les gibbons ont une préférence pour les fruits à pulpe douce et juteuse qu'ils vont donc rechercher préférentiellement. Le texte nous apprend par ailleurs que ces fruits plus sucrés sont plus riches en énergie et que les primates ont acquis au cours de l'évolution une capacité de plus en plus grande à détecter par le goût les fruits sucrés. Ce constat fait écho à la notion de coévolution vue dans l'unité précédente.

Le **doc. 8** apporte des éléments complémentaires montrant que la collaboration primates/plantes à fleurs est le résultat d'un processus de coévolution : « les plantes à fleurs et à fruits charnus se sont diversifiés en même temps que les primates » sur tous les continents. Il explique le mécanisme de sélection naturelle : les gènes des plantes à fruits sucrés sont favorisés par les choix préférentiels qu'ont fait et que font encore ces primates.

5 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*).

Les graines (libres ou enfermées dans des fruits) peuvent être disséminées de différentes façons et sont adaptées à leur mode de dispersion :

- Sans intervention d'éléments extérieurs : les fruits secs expulsent leurs graines par exemple. La dissémination se fait à très courte distance.

- Avec l'aide d'éléments extérieurs (les vecteurs) :

- Par des vecteurs abiotiques comme le vent : les fruits ou graines sont petits, légers et de forme à faciliter leur portance dans l'air – la dissémination se fait à plus longue distance.

- Par des vecteurs biotiques (animaux) : les fruits ou graines sont munis de crochets ou d'aiguillons s'accrochant au pelage ou plumage des animaux ou encore (dissémination passive). Certains fruits ou graines charnus, sucrés et riches en ressources alimentaires attirent les animaux qui les ingèrent (dissémination active). La dissémination peut se faire à très grande distance.

Ce dernier cas de collaboration animal/plante à fleurs (et donc à fruits) est le résultat d'une coévolution.



EXERCICES DU THÈME 2

Les corrigés des exercices des rubriques « **Évaluer ses connaissances** » et « **S'entraîner avec un exercice guidé** » se trouvent à la fin du manuel (p. 366).

Chapitre 1

[pp. 114-116 du manuel]

5 L'ÉTUDE D'UNE PLANTE D'ALTITUDE

Faire preuve d'un sens de l'observation

Réponses attendues :

La gentiane de Koch, dans son milieu montagnard, a développé des adaptations morphologiques et biochimiques pour faire face au froid et aux UV :

- Lutte contre le froid : un appareil aérien peu développé (forme en « rosette » : pas de tige, feuilles au ras du sol), donc moindres pertes d'énergie avec l'air froid et le vent (voire protection par la couverture neigeuse) ; un bourgeon terminal enfoncé dans le sol et donc

mis à l'abri des froids les plus intenses ; la racine met en réserve des quantités importantes de sucres (issus de la photosynthèse de l'appareil aérien), indispensables à la survie de la plante.

- Lutte contre les UV : les UV, plus intenses en altitude, altèrent l'ADN des cellules (10 UA d'ADN altéré dans tissus sans anthocyanes pour 1 200 J d'UV/m²) ; les fleurs de la gentiane de Koch sont riches en anthocyanes, pigments qui protègent les cellules de la dégradation de leur ADN par les UV (2,5 UA d'ADN altéré dans tissus avec anthocyanes pour 1 200 J d'UV/m²).

6 LES DÉFENSES CHIMIQUES ANTI-HERBIVORES DE LA TOMATE

Raisonner et construire un schéma

Réponse attendue :

On peut résumer sous forme schématique l'enchaînement des faits permettant à la tomate de se défendre contre une attaque d'herbivore : [Attaque de feuilles par un herbivore à production de systémine par les feuilles] → [libération de systémine dans la sève élaborée] → [distribution de systémine à l'ensemble de la plante]

→ [activation de gènes de défense dans les cellules des feuilles]
 → [synthèse de molécules de défense comme la PPO (augmentation sensible du taux de PPO dans les feuilles au bout de quelques heures)] → [consommation de PPO par les herbivores] → [dérèglement de leur fonction digestive (perturbation des enzymes digestives)] → [arrêt de l'attaque foliaire... dans le meilleur cas!]

⑦ L'ÉTUDE DU SYSTÈME RACINAIRE DE DEUX PLANTES

Observer et raisonner

Réponse attendue :

– L'armérie des sables présente un système racinaire qui s'enfonce verticalement dans le sol sableux sur plusieurs dizaines de cm : cela permet à la plante d'aller puiser en profondeur l'eau qui s'est infiltrée rapidement (le sol sableux est poreux).
 – L'orpin âcre a développé un système racinaire superficiel : les racines s'étalent en surface et sous une faible profondeur, de manière à intercepter l'eau qui s'écoule sur les pierres où il vit.

⑧ LE SIROP D'ÉRABLE ET L'HIVER CANADIEN

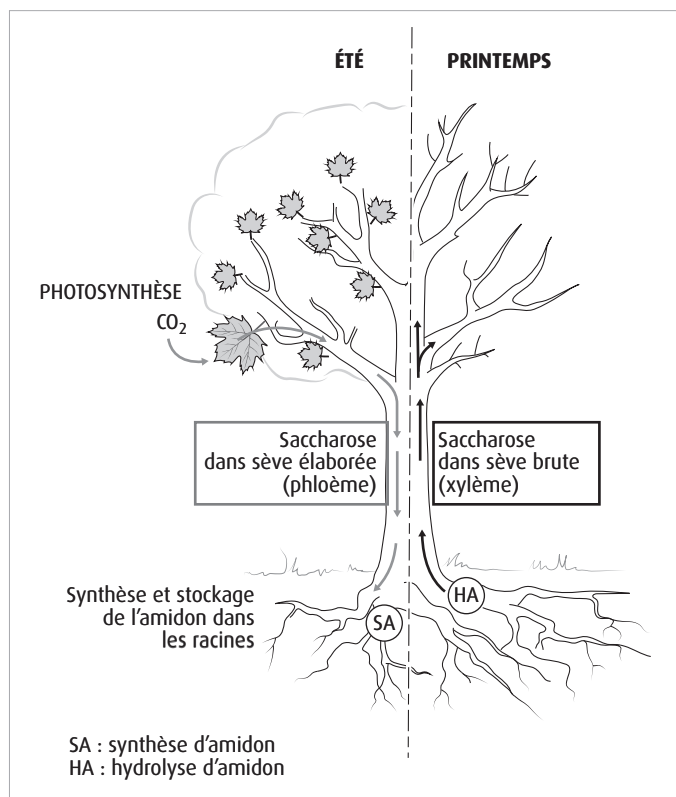
Exploiter des résultats et construire un schéma

Réponse attendue :

1°) Evolution de la teneur en amidon dans les racines et origine de cet amidon ?

– L'amidon, quasiment absent des racines avant l'été, va s'y accumuler pendant les quelques mois de la période végétative (augmentation progressive de la coloration noire des racines par l'eau iodée).
 – Ce glucide provient de la photosynthèse qui se déroule dans les feuilles, comme le prouve l'absence d'amidon dans les racines d'un érable ayant été défolié pendant l'été.

2°) Schéma de la circulation des sucres durant l'été et pendant l'hiver :



3°) Adaptation au passage de la mauvaise saison ?

L'amidon accumulé dans les racines au cours de l'été, constitue des réserves de glucides. À la fin de l'hiver, cet amidon va être hydrolysé pour former du saccharose, lors de la reprise de végétation printanière. Il est ensuite distribué par le flux ascendant de sève brute à l'ensemble de la plante, fournissant l'énergie nécessaire à la croissance, avant que les feuilles ne puissent prendre le relai (grâce à la photosynthèse).

Chapitre 2

[pp. 130-131 du manuel]

⑤ LA POMME

Traduire des informations par un schéma.

1. Schéma de la fleur de pommier en CL

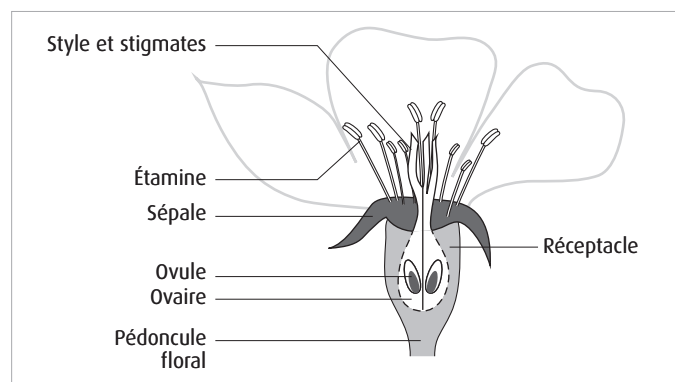


Schéma du stade intermédiaire

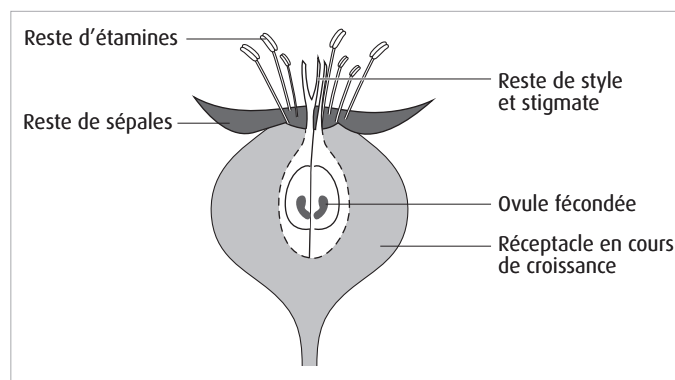
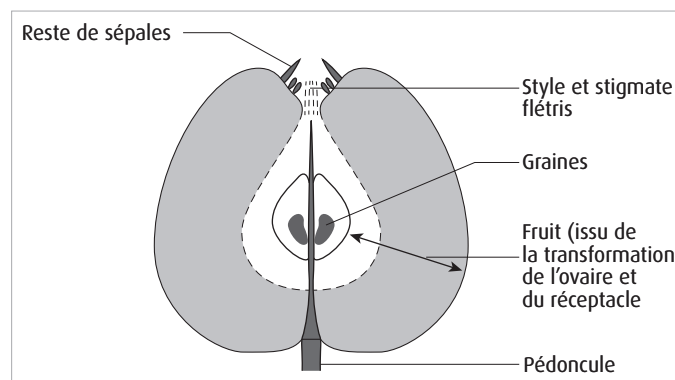


Schéma d'une pomme en CL



(...)

⑥ FLEURS, ODEURS ET POLLINISATION

S'informer et raisonner

Réponse attendue :

1. L'expérience 1 montre que les fleurs sont visitées par autant de guêpes que les fleurs visibles (17 guêpes). Par contre, quand les fleurs sont emballées dans un sac transparent (expérience 2), elles sont beaucoup moins visitées (4 guêpes) que les fleurs non emballées (23 guêpes). Le fait d'emballer les fleurs dans un sac transparent supprime l'émission d'odeurs dans l'environnement par les fleurs, tout en permettant aux guêpes de les voir.

On peut donc en déduire que le signal qui attire l'insecte pollinisateur est l'odeur dégagée par les fleurs d'*Eucomis*. En accord avec ce résultat, on remarque que la forme et la couleur des fleurs ne sont pas très contrastées (fleurs de couleur vert pâle peu identifiées), ce qui est peu propice à l'existence d'un signal visuel.

2. La plante *E. autumnalis* produit des molécules odorantes que seule la guêpe *Hemipepsis* est capable de reconnaître. Elle est donc la seule à bénéficier du nectar produit. Du fait de cette spécificité, la guêpe visitera essentiellement les fleurs de cette espèce et favorise ainsi leur pollinisation. Chacun des deux partenaires bénéficie ainsi de cette spécificité. On peut supposer que l'interaction *E. autumnalis* / *Hemipepsis* est le fruit d'une coévolution qui a mené à cette spécialisation.

Objectif bac

[p. 132-133 du manuel]

① QCM

Réponses exactes : 1d - 2a - 3b - 4b

② ORGANISATION DE LA FLEUR ET POLLINISATION PAR LES INSECTES

INTRODUCTION

La survie des espèces de plantes à fleurs passent souvent par leur reproduction sexuée. La fleur est un organe permettant d'assurer efficacement cette reproduction. + Schéma de l'organisation de base d'une fleur type (avec en particulier, sépales, pétales, organes reproducteurs mâles et femelles, sous forme d'un diagramme floral ou d'une coupe de fleur. Voir p. 119 et 129). Quelles adaptations trouve-t-on dans une fleur où la pollinisation se fait par les insectes ?

1 - QUAND UNE FLEUR ATTIRE LES INSECTES

1.1 - Des ressources nutritives

– Du nectar produit par des glandes spécialisées de la fleur (source de glucides pour les insectes).

– Du pollen, source de protéides (produit en quantité).

→ Les fleurs offrent une nourriture aux insectes.

1.2 - Des signaux visuels d'attraction

Pétales colorés, couleurs vives et/ou visibles en UV.

→ Les fleurs attirent et dirigent les insectes en leur centre.

2 - LA RENCONTRE DES GAMÈTES DANS LA FLEUR

2.1 - Le dépôt des grains de pollen

– Surface rugueuse des grains de pollen à accrochage sur l'insecte à transport du pollen d'une fleur à l'autre (pollinisation croisée).

– Dépôt des grains de pollen sur stigmate du pistil

2.2 - La fécondation au sein du pistil

– Germination du grain de pollen dans le pistil (+ schéma : avec tube pollinique).

– Fusion du gamète mâle avec un ovule dans l'ovaire.

CONCLUSION

– Une fleur aux pétales colorés, productrice de nectar et/ou de pollen, dont les grains sont rugueux.

→ pollinisation croisée grâce aux insectes

– Un pistil permettant le dépôt puis la germination des grains de pollen, avant la fusion des gamètes.

– Ouvertures possibles : notion de coévolution plante/insecte. Comparaison avec la pollinisation par le vent.

③ DES JARDINS DE FOURMIS

– **Bases de l'interaction :** Les graines de la plante *P. macrostachya* produisent une substance chimique reconnue par les fourmis *C. femoratus*. Cette molécule attire spécifiquement cette espèce. En effet, des graines de *P. laevigatum* (normalement non transportées par celle-ci) sont prises en charge par cette fourmi, lorsqu'elles sont imbibées de la substance chimique attractive, et ce d'autant plus efficacement que les doses sont élevées (23 % de graines transportées pour 1/10^e de dose, 83 % pour une dose appliquée, 100 % pour 10 fois cette dose).

– **Bénéfice pour *P. macrostachya* :** Les graines de *P. macrostachya* vont germer directement dans le terreau de ces jardins suspendus : elles se trouveront ainsi directement dans les arbres, là où elles se développent (ce sont des plantes épiphytes).

– **Exemple de coévolution :** Généralement, le transport des graines d'une plante adaptée à ce mode de dissémination, est réalisé par plusieurs espèces de fourmis. Ici, il y a une relation de stricte spécificité entre une plante et un animal, qui ont évolué de concert, pour *in fine*, tirer chacun, des bénéfices réciproques de cette association.

④ LES HORMONES VÉGÉTALES ET LE PASSAGE DE LA MAUVAISE SAISON

1 - ANALYSE DES DOCUMENTS

– **Doc.1 :** La plante « pomme de terre » fabrique des tubercules souterrains en été (où elle accumule des réserves nutritives). À l'approche de la mauvaise saison, les feuilles synthétisent plus d'ABA. La tige feuillée aérienne finit par mourir, ne laissant subsister en terre, à l'abri du gel, que ces tubercules.

– **Doc.2 :** Les bourgeons des tubercules ont passé l'hiver à l'état dormant, c'est-à-dire en vie ralentie, et dans le sol, ce qui les a protégés des mauvaises conditions climatiques. Au printemps, ils utilisent les réserves accumulées dans les tubercules et germent.

– **Doc.3 :** Dans les tubercules témoins, on trouve un taux élevé d'ABA (250 pmol/g) associé à un très faible pourcentage de germination des bourgeons (2 %). Inversement, en présence d'un inhibiteur d'ABA, les bourgeons vont germer (90 %) alors que le taux d'ABA dans les tubercules est très faible (10 pmol/g). L'ajout simultané d'ABA exogène et de l'inhibiteur montre un faible taux de germination (7 %) associé à un taux moyen d'ABA (100 pmol/g).

2 - SYNTHÈSE

a) Modalités de passage de la mauvaise saison par la pomme de terre ?

Durant l'été, la pomme de terre forme des tiges souterraines remplies de réserves (issues de la photosynthèse dans ses feuilles). Ces tubercules restent en terre, protégés du froid et à l'état dormant pendant tout l'hiver. Les bourgeons entrent en vie ralentie, passent ainsi la mauvaise saison, attendant le réchauffement du climat au printemps pour germer.

b) Rôle des hormones dans ce processus ?

Un taux d'ABA élevé est corrélé à une germination très faible (témoin). Ceci suggère que l'ABA empêche la germination. En absence d'ABA (inhibé ou dégradé), la germination se déclenche :

ceci valide donc l'hypothèse précédente. Nous pouvons donc proposer le modèle suivant : avant l'hiver, la plante fabrique de l'ABA, ce qui provoque l'entrée en dormance des bourgeons du tubercule de pomme de terre. Et inversement, la disparition de l'ABA contribue à la levée de la dormance au printemps.

BIBLIOGRAPHIE

Le génie des végétaux. Des conquérants fragiles. Marcel Bournérias, Christian Block. Ed. Belin. Pour la Science

Botanique Biologie et physiologie végétales - S. Meyer & al - Ed. MALOINE - 2008

Précis d'écologie - R. Dajoz - Ed. DUNOD

Physiologie végétale - R Heller & al. Ed. MASSON

THÈME 3 LE DOMAINE CONTINENTAL ET SA DYNAMIQUE

En classe de première S, l'attention s'est portée principalement sur les domaines océaniques. Leur étude a permis de construire le modèle de la tectonique de plaques. En terminale S, on aborde les continents. Il s'agit de dégager les caractéristiques de la lithosphère

continentale et d'en comprendre l'évolution à partir de données de terrain. Cela permettra de compléter la compréhension de la dynamique de la lithosphère dans le cadre du modèle de la tectonique des plaques.

CHAPITRE 1

Caractérisation du domaine continental

La **page d'ouverture du chapitre** peut être utilisée pour mobiliser les acquis de première S :

- la répartition bimodale des altitudes s'explique par des différences de lithologie entre croûte continentale et croûte océanique ;
- la croûte, et le manteau jusqu'à 100 km de profondeur environ, constituent la lithosphère, qui se distingue de l'asthénosphère sous-jacente par sa rigidité ;
- selon la nature de la croûte, on distingue une lithosphère océanique et une lithosphère continentale.

Un premier objectif du chapitre est de dégager les principales caractéristiques qui distinguent la lithosphère continentale de la lithosphère océanique : épaisseur et lithologie en relation avec le relief, âge.

Le second objectif est de montrer, à partir d'observations de terrain et / ou en laboratoire, que les chaînes de montagnes résultent d'un épaissement crustal.

UNITÉ 1 La lithosphère en équilibre sur l'asthénosphère

[pp. 144-145 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• La lithosphère est en équilibre (isostasie) sur l'asthénosphère.	• Extraire et organiser des informations pour formuler une hypothèse (doc. 1 à 4) • Réaliser et exploiter une modélisation analogique pour comprendre la notion d'isostasie (doc. 5 et 6) • Communiquer en rédigeant une synthèse

Conseils et suggestions

- Lors de cette première unité, l'élève est amené à comprendre que la lithosphère rigide repose en équilibre sur l'asthénosphère plus ductile : c'est l'isostasie.
- L'introduction de cette unité mentionne la connaissance de mouvements verticaux dès l'époque de Wegener. A partir de constats de mouvements verticaux passés et actuels, interprétés comme un rééquilibrage de la lithosphère, la notion d'équilibre isostatique est amenée.
- L'exemple de la remontée du bouclier scandinave a été choisi ici. Des données sur l'archipel de Kvarken (Finlande) et la Haute Côte (Suède), situés dans le golfe de Botnie et témoignant de ce phénomène, sont disponibles sur le site : <http://whc.unesco.org/fr/list/898>.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 À 3 (Extraire des informations). Le **doc. 1** présente une ligne de rivage actuelle, surmontée d'un plateau enherbé qui correspond à un paléorivage. Leur position relative permet de formuler deux hypothèses : un soulèvement de l'Ecosse, ou une baisse du niveau marin (seule la première peut être mise en relation avec des mouvements verticaux de la lithosphère). Le **doc. 2** permet de faire le même constat à l'échelle de la Scandinavie, où le paléorivage est parfois distant de plusieurs dizaines de km du rivage actuel, notamment dans le golfe de Bothnie. Les traces archéologiques permettent de dater précisément les paléorivages et de quantifier le soulèvement : sur les 5 000 dernières années,

(...)

on trouve 3 cm.an⁻¹. Le **doc. 3** nous informe sur les mouvements actuels : le soulèvement se poursuit encore aujourd’hui. Sa vitesse n’est pas homogène sur tout le bouclier. Elle est particulièrement élevée au niveau du golfe de Bothnie. Les données GPS de la station de Skellefteå permettent de calculer une vitesse de déplacement vertical d’environ 10 mm.an⁻¹.

Des données GPS des différentes stations peuvent être trouvées sur le site de la NASA : <http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>. Parmi les ressources scientifiques disponibles sur le site de l’Académie de Lyon se trouve une fiche qui explique comment traiter des données GPS avec Excel : <http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/biologie/spip.php?article179> »

2 DOC.4 (*Extraire et organiser des informations pour formuler une hypothèse*). Il y a 21 000 ans, la Scandinavie et l’Écosse étaient recouvertes d’une épaisse calotte glaciaire. Elle a disparu très rapidement (à l’échelle des temps géologiques) puisqu’il y a 10 000 ans, la calotte n’occupe plus qu’une petite région au nord-ouest du golfe de Bothnie, et a disparu depuis. Compte tenu de son épaisseur et de sa surface, cette calotte représentait initialement une surcharge considérable. Sa disparition s’accompagnant d’un soulèvement du bouclier scandinave et de l’Écosse, on peut supposer que la disparition de la surcharge est à l’origine du soulèvement.

3 DOC. 5 ET 6 (*Réaliser et exploiter une modélisation analogique*). Les deux éléments blancs représentent la calotte de glace.

Les blocs colorés représentent la lithosphère rigide, et le fluide visqueux (transparent) l’asthénosphère plus déformable et plus dense. Le modèle analogique présente plusieurs limites : les matériaux utilisés n’ont pas les mêmes propriétés physiques que les enveloppes terrestres (l’asthénosphère n’est pas liquide !), l’échelle et la durée diffèrent également. Lorsque les élèves mettent en œuvre le protocole proposé, ils constatent un mouvement de soulèvement des blocs colorés modélisant la lithosphère. Ce mouvement n’est pas instantané et se prolonge après avoir ôté les blocs blancs figurant la calotte. La suppression d’une surcharge entraîne bien un soulèvement d’un ensemble rigide, initialement en équilibre sur un milieu plus déformable et plus dense.

Il existe une modélisation numérique de l’isostasie, utilisable avec les élèves sur le site de l’université de Cornell :

<http://www.geo.cornell.edu/hawaii/220/PRI/isostasy.html>

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). L’observation de paléorivages met en évidence des mouvements passés, les données GPS renseignent sur les mouvements actuels. On constate l’existence de mouvements verticaux passés et actuels qui s’interprètent dans le cadre du modèle de l’isostasie : la disparition d’une surcharge entraîne un rééquilibrage isostatique de remontée, jusqu’à retour à l’équilibre de la lithosphère rigide sur l’asthénosphère plus ductile et plus dense.

UNITÉ 2 La dualité d’altitude entre océans et continents

[pp. 146-147 du manuel de l’élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l’unité
• Les différences d’altitude moyenne entre les continents et les océans s’expliquent par des différences crustales. • La croûte continentale, principalement formée de roches voisines du granite, est d’une épaisseur plus grande et d’une densité plus faible que la croûte océanique.	• Recenser, extraire et organiser des données de terrain, entre autres lors d’une sortie. • Extraire des informations (doc. 1 et 2) • Mettre en œuvre un protocole (doc. 3) • Exploiter des résultats (doc. 2 et 3) • Utiliser le modèle de l’isostasie pour calculer l’épaisseur de la croûte continentale (doc. 4) • Mettre en relation les données collectées pour rédiger une synthèse (doc. 1 à 4)

Conseils et suggestions

– Le point de départ de l’unité est le fort contraste entre l’altitude moyenne des continents et la profondeur moyenne des océans. On se propose d’expliquer ce contraste d’une part en étudiant des échantillons collectés sur le terrain afin d’établir certaines caractéristiques des roches de la croûte continentale, d’autre part en utilisant le modèle de l’isostasie pour calculer une épaisseur de cette croûte.

– Il est proposé ici d’organiser le travail sous forme de tâche complexe : les élèves ont à répondre à une question précise, et ils disposent d’outils et de données de diverse nature, de connaissances (notion d’équilibre isostatique) ; par groupes, ils mettent au point et/ou mettent à l’essai des stratégies de résolution différentes en autonomie. Nous proposons un ordre d’exploitation des documents, mais d’autres choix sont possibles.

La sortie de terrain peut permettre de collecter des informations utiles pour plusieurs points du programme et susceptibles d’être

exploitées à plusieurs moments de l'année. Des exemples locaux peuvent être pertinents. Cette sortie est également l'occasion de mettre en œuvre une approche trans-disciplinaire.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Recenser, extraire et organiser des données de terrain, entre autres lors d'une sortie*). Sur un exemple local, les photos présentent la diversité des roches que l'on peut échantillonner en domaine continental.

2 DOC. 2 (*Extraire des informations*). La généralisation à l'ensemble du domaine continental permet une quantification des différents types de roches de la croûte continentale. Les proportions indiquées pourront permettre de calculer une estimation de la densité de la croûte continentale supérieure en utilisant le **doc. 3**.

3 DOC. 3 (*Mettre en œuvre un protocole et exploiter des résultats*). Les calculs effectués avec les données fournies donnent : $d_{\text{granite}} = 2,47$; $d_{\text{gneiss}} = 2,59$; $d_{\text{calcaire}} = 2,29$.

En utilisant les proportions indiquées dans le **doc. 2**, on obtient :

$$d_{\text{croûte supérieure}} = 2,47 * 0,44 + 2,59 * 0,44 + 2,29 * 0,11 = 2,51$$

Cette valeur est inférieure à celle donnée habituellement pour la croûte continentale (2,7 à 2,8). Cette différence peut s'expliquer,

d'une part, par le faible nombre d'échantillons et les incertitudes de mesure et d'autre part par le fait que la croûte inférieure, non échantillonnée ici, est plus dense que la croûte supérieure.

4 DOC. 4 (*Utiliser le modèle de l'isostasie pour calculer l'épaisseur de la croûte continentale*). On cherche à déterminer x , épaisseur moyenne de la croûte continentale. Dans l'équation proposée, c'est la seule inconnue. Le calcul est le suivant :

$$(d_{\text{ML}} - d_{\text{CC}}) x = d_{\text{ML}} (h + E_0 + E_{\text{CO}}) - d_{\text{eau}} E_0 - d_{\text{CO}} E_{\text{CO}}$$

$$(3,3 - 2,8) x = 3,3 (0,87 + 3,73 + 7) - 1 * 3,73 - 2,9 * 7$$

$$x = 2 * (3,3 * 11,6 - 3,73 - 20,3)$$

$$x = 28,5 \text{ km}$$

Cette valeur est une bonne approximation de ce qui est proposé dans la littérature scientifique. Les différences s'expliquent par les valeurs que l'on retient pour les densités : 2,7 à 2,8 pour la croûte continentale, 2,85 ou 2,9 pour la croûte océanique, 3,25 à 3,3 pour le manteau lithosphérique.

5 MISE EN RELATION DES DONNÉES (*Mettre en relation les données collectées pour rédiger une synthèse*). La croûte continentale a une densité inférieure à celle de la croûte océanique. Elle est aussi environ 4 fois plus épaisse.

Ces deux caractéristiques expliquent, dans le cadre de la théorie de l'isostasie, la différence d'altitude entre continents et océans.

UNITÉ 3 L'âge de la croûte continentale

[pp. 148-149 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« L'âge de la croûte océanique n'excède pas 200 Ma, alors que la croûte continentale date par endroits de plus de 4 Ga. Cet âge est déterminé par radiochronologie »	- Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique (doc.1 et 2) - Utiliser un logiciel pour déterminer un âge grâce à la méthode de la droite isochrone (doc. 3) - Extraire et exploiter des informations pour caractériser l'âge de la croûte continentale (doc.1 à 4) - Communiquer en rédigeant une synthèse

Conseils et suggestions

– Cette unité poursuit la caractérisation de la croûte continentale : d'épaisseur et de densité différentes de la croûte océanique, elle diffère également de cette dernière par son âge beaucoup plus important. A la fin de cette unité, le professeur pourra établir un bilan sur les caractères distinctifs des deux croûtes. Les différences constatées permettent de suggérer une origine différente, cette origine sera étudiée dans le chapitre 3 de ce thème.

– La page de gauche présente une méthode de datation, la méthode de la droite isochrone dont le principe et l'utilisation sont définis à l'aide des deux documents. Seules les roches magmatiques considérées comme des systèmes clos, une fois le magma cristallisé, peuvent être datées par cette méthode. Les roches sédi-

mentaires considérées comme des systèmes ouverts ne peuvent être datées par radiochronologie.

– Une conférence en ligne sur le temps et sa mesure proposée par Loïc Labrousse est disponible sur le site Planet-terre à l'adresse suivante :

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-sgf-2004-Labrousse.xml>

D'autres méthodes de datation sont proposées et leurs limites d'application discutées.

– Des données sur les rapports isotopiques Rb/Sr de divers échantillons de granites du Massif Central sont disponibles également sur le site Planet-terre :

(...)

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-datations-massif-central.xml>

Elles peuvent donner lieu à des exercices supplémentaires.

Un ouvrage très complet pourra être consulté par les professeurs désireux d'aller plus loin :

«*La mesure du temps dans l'histoire de la Terre*», P. De Wever, L. Labrousse, D. Raymond, A. Schaaf, éditions Vuibert, 2005.

– Cette unité est enfin l'occasion pour les élèves de réinvestir des connaissances provenant d'autres champs disciplinaires (mathématiques : la fonction exponentielle, les fonctions affines, sciences physiques : la radioactivité).

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Extraire et mettre en relation des informations pour comprendre une méthode de datation*). Au cours du temps la quantité de ^{87}Rb , élément père, diminue alors que celle de ^{87}Sr , élément fils, augmente. Les deux évolutions sont anti-corrélées, et on constate que le nombre d'éléments père décroît au cours du temps de façon exponentielle. Dans l'équation (1) on peut mesurer la quantité de $^{87}\text{Rb}_t$ et de $^{87}\text{Sr}_t$: il s'agit de la quantité de ces éléments présents dans les échantillons récoltés. En revanche, on ne connaît pas $^{87}\text{Sr}_0$ et on ne connaît pas non plus t , qui est l'âge des échantillons. Il n'est donc pas possible à ce stade de résoudre l'équation (1).

2 DOC. 2 (*Pratiquer un langage mathématique*). Dans cette nouvelle équation le rapport initial $^{87}\text{Sr}_0/^{86}\text{Sr}_0$ est identique pour tous les minéraux des échantillons récoltés (puisqu'il est identique à celui du magma d'origine). L'équation (2) est donc du type $y = ax + b$ (équation d'une droite affine) avec $a = e^{\lambda t} - 1$ et $b = ^{87}\text{Sr}_0/^{86}\text{Sr}_0$. Il suffit de disposer de deux mesures de $^{87}\text{Sr}_t/^{86}\text{Sr}_t$ et $^{87}\text{Rb}_t/^{86}\text{Sr}_t$ provenant de deux minéraux de l'échantillon pour obtenir une droite dont la pente permet de déterminer l'âge. La relation entre l'âge

de la roche et la pente est : $t = \text{Ln}(\text{pente} + 1) / \lambda$

3 DOC. 3 (*Exploiter un graphique, utiliser un logiciel*). Chronorad est un logiciel gratuit téléchargeable ici : <http://www.labosvt.com/download-file-10.html>. Ce logiciel présente les méthodes de datation par radiochronologie utilisant différents couples, et permet de calculer l'âge d'échantillons de roche par la méthode de la droite isochrone à partir d'exemples proposés dans le logiciel ou en entrant ses propres données. On obtient alors le graphique $^{87}\text{Sr}_t/^{86}\text{Sr}_t = f(^{87}\text{Rb}_t/^{86}\text{Sr}_t)$ à partir duquel le logiciel propose de tracer la droite isochrone. La pente de la droite est alors indiquée. On peut ensuite faire faire le calcul aux élèves en utilisant les données du doc. 1 (T et λ), ou bien utiliser le logiciel pour le calcul. Le coefficient directeur de la droite obtenue est de $4,8 \cdot 10^{-3}$. Avec $T = 48,9 \cdot 10^9$ ans (cf. doc. 1) on obtient $\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11}$. On trouve alors un âge de 337 millions d'années environ. Les incertitudes sur les mesures expliquent que tous les points ne sont pas situés exactement sur la droite. Il est donc important d'obtenir plus de deux valeurs pour tracer la droite isochrone ; la plupart des données proposées dans la littérature fournissent au moins cinq mesures.

4 DOC. 4 (*Extraire des informations*). L'âge de la croûte continentale est très hétérogène. Certaines formations sont très anciennes et ont un âge qui excède 4 Ga, alors que l'âge de la Terre est de 4,55 Ga.

5 CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Les données radiochronologiques permettent d'affirmer que la croûte continentale est constituée de roches d'âge hétérogène ; les plus vieilles datant par endroit de plus de 4 milliards d'années. Elle est donc beaucoup plus âgée que la croûte océanique dont l'âge n'excède pas 200 millions d'années.

UNITÉ 4 Épaisseur de la croûte et reliefs continentaux

[pp. 150-151 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Au relief positif qu'est la chaîne de montagnes répond, en profondeur, une importante racine crustale ».	- Utiliser des données sismiques et leur traitement avec des logiciels pour évaluer la profondeur du Moho (doc. 1 et 2) - Extraire et exploiter des informations pour déterminer la relation entre altitude du relief et épaisseur de la croûte (doc.3, 4 et 5) - Communiquer en rédigeant une synthèse

Conseils et suggestions

– Les principaux caractères distinctifs de la croûte continentale ayant été présentés dans les trois unités précédentes, l'objectif de cette unité est d'expliquer l'altitude moyenne du domaine continental (870 m). L'étude s'appuie sur l'isostasie, dont le principe a

été montré dans l'unité 1. Les reliefs que constituent les chaînes de montagnes correspondent à des zones où la croûte est épaissie.

– La page de gauche montre comment les données sismiques permettent d'estimer la profondeur du Moho et donc l'épaisseur

de la croûte continentale. La page de droite permet de montrer la relation existant généralement entre altitude des reliefs et épaisseur de la croûte.

Ainsi, le plus souvent, il existe sous les reliefs une importante racine crustale.

Le modèle isostatique présenté dans le **doc. 4** est celui de Airy. Il s'accorde bien aux données fournies par les séismes qui montrent une croûte épaissie sous les chaînes de montagnes. Cependant, tout relief ne correspond pas obligatoirement à un épaississement crustal.

Pour aller plus loin, les professeurs pourront consulter des ouvrages fondamentaux de géologie qui présentent et illustrent les modèles isostatiques :

- « Comprendre et enseigner la planète Terre », J.-M. Caron et Coll. Ophrys éd., 2004.
- « Sciences de la Terre et de l'Univers », Brahic A. et coll., Vuibert éd., 2006.

Ces ouvrages proposent des exercices et leurs corrigés.

– Le **doc. 5** illustre le fait que la croûte continentale n'affleure pas seulement dans les régions émergées : les marges passives sont constituées de croûte continentale amincie. (Cf. BO « La croûte continentale affleure dans les régions émergées. L'examen de données géologiques permet à la fois d'expliquer cette situation et de nuancer cette vision rapide »).

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Utiliser un tableur*). Avec les données fournies, les profondeurs suivantes sont trouvées :

Stations	Profondeur du Moho (km)
OG02	32,1
OG03	34,1
OG21	37,9
RSL	44,3

Ces données sont issues des ressources scientifiques proposées par le site de l'Académie de Lyon. On y trouve également des données concernant d'autres séismes dans les Alpes, ainsi qu'un fichier excel téléchargeable permettant le calcul de la profondeur du Moho à partir de ces données :

<http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/biologie/spip.php?article176>

2 DOC. 2 ET 3. (*Extraire des informations pour établir une relation.*) Dans les Alpes, la profondeur du Moho est supérieure à 30 km d'après les données du **doc. 2**. Le **doc. 3** confirme ce constat et montre plus généralement qu'au niveau des massifs montagneux les plus importants (Alpes, Pyrénées), la croûte est épaissie. En revanche, au niveau des secteurs de basse altitude (bassin du sud ouest, bassin rhodanien, plaine d'Alsace) la profondeur du Moho est souvent inférieure à 30 km. Ainsi, on peut établir généralement la relation suivante : plus l'altitude du relief est élevée, plus grande est la profondeur du Moho (donc plus importante est l'épaisseur de la croûte).

3 DOC. 4 (*Utiliser un modèle pour démontrer une relation*). Il suffit d'établir l'égalité des masses des deux colonnes :

$$(d_{cc} E_{cc}) + (d_{ML} R) = (h + E_{cc} + R) d_{cc}$$

Après simplification :

$$R = (d_{cc} h) / (d_{ML} - d_{cc}) \text{ soit } R = 5,6h.$$

Sous une chaîne de montagnes de 3 000 m, $R = 16,8$ km soit une profondeur du Moho de $(30 + 16,8 + 3) = 49,8$ km en prenant une épaisseur moyenne de croûte continentale de 30 km.

4 DOC. 5 (*Extraire des informations d'une coupe interprétative*). Au niveau d'une marge passive, on constate que la croûte continentale est amincie (épaisseur inférieure à 30 puis à 20 km). La coupe montre que l'altitude est inférieure à 0. Ainsi une altitude faible correspond à une épaisseur faible.

5 CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Les différentes données recueillies indiquent qu'il existe bien une relation entre l'altitude du relief et l'épaisseur de la croûte continentale. Au relief positif qu'est une chaîne de montagnes, correspond, en profondeur, une racine crustale : la croûte est donc plus épaisse au niveau des chaînes de montagnes.

UNITÉ 5

Des structures témoignant d'un épaississement crustal

[pp. 152-153 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « L'épaisseur de la croûte [dans les chaînes de montagnes] résulte d'un épaississement lié à un raccourcissement et un empilement. On en trouve des indices tectoniques (plis, failles, nappes)... »	• Recenser, extraire et organiser des données de terrain entre autres lors d'une sortie (doc. 1, 2 et 3). • Exploiter des mesures à l'aide d'un logiciel (doc. 2) • Exploiter des données de terrain ou cartographiques pour mettre en évidence des éléments structuraux dans une chaîne de montagnes expliquant sa mise en place (doc. 3 et 4) • Communiquer en rédigeant une synthèse.

(...)

Conseils et suggestions

– Cette unité et l'unité suivante achèvent la caractérisation du domaine continental en se recentrant sur les chaînes de montagnes. L'objectif poursuivi est de trouver dans les chaînes de montagnes des indices d'épaississement de la croûte à différentes échelles et de fournir un premier élément d'explication à cet épaississement (raccourcissement, empilement).

Dans cette unité, les objets étudiés sont des structures géologiques à l'affleurement et/ou visibles dans le paysage. L'unité suivante, complémentaire, s'intéressera à des roches.

– La description et l'interprétation de structures peuvent être l'occasion de réinvestir des connaissances de première S sur les failles.

– Une sortie de terrain peut être l'occasion de collecter des roches utiles pour l'unité suivante, de prendre des photos ou de faire réaliser par les élèves des schémas d'interprétation de structures remarquables présentes dans les chaînes de montagnes (plis, failles, nappes). Il est possible également de travailler sur des images provenant des Alpes soit à l'aide de google Earth, soit en consultant le site [geol-alp](http://www.geol-alp.com/) : <http://www.geol-alp.com/>. Ce site présente un panorama très complet des Alpes, et peut être utile pour un travail en classe sur certaines images ou cartes (des extraits de cartes géologiques sont disponibles). Il peut également aider à la préparation d'une sortie géologique dans les Alpes.

– L'exemple choisi pour illustrer la notion de nappe de charriage est la nappe de Glaris. Situé en Suisse orientale, c'est le phénomène géologique le plus célèbre de la Suisse, inscrit en 2008 sur la liste du patrimoine mondial naturel de l'Unesco, sous le nom « Haut lieu tectonique suisse Sardona » <http://whc.unesco.org/fr/list/1179>. Son étude par les géologues depuis le XIX^e siècle a permis de mieux comprendre la formation des Alpes et d'établir le concept de nappe de charriage.

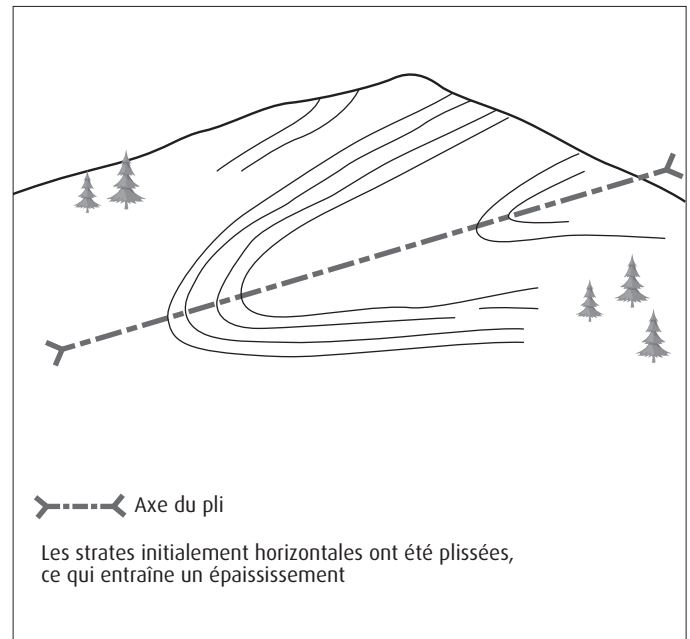
Des informations complémentaires sur cette nappe sont disponibles sur le site de l'Office fédéral de Topographie Swisstopo : http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/topics/geology/viageoalpina/VGA_Sardona.html

avec notamment des topos d'excursion illustrés de photos et de schémas commentés.

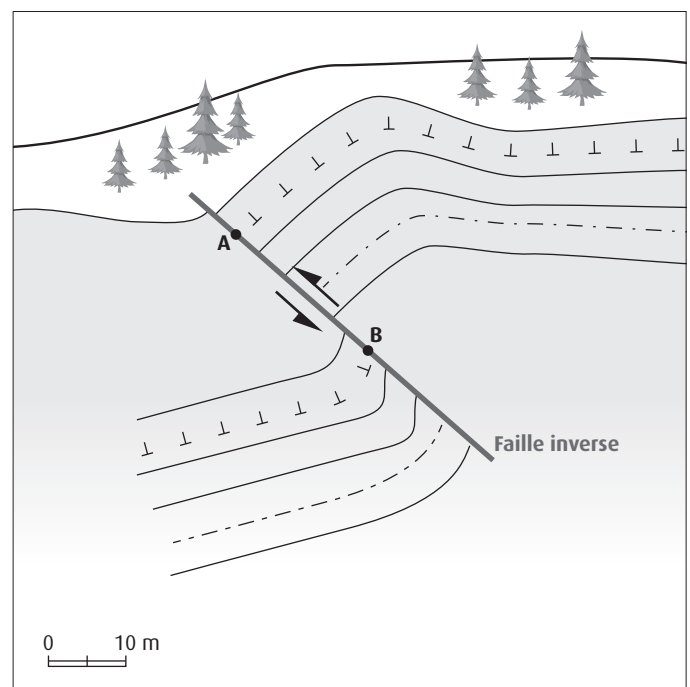
Des informations sur d'autres nappes et chevauchements dans les Alpes ou les Pyrénées, avec photos et schémas, sont disponibles sur le site : <http://cirquedebarroza.free.fr/formpyr1.htm>

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*Extraire des informations et réaliser des schémas d'interprétation*). Les formations sédimentaires étant initialement horizontales, leur structure actuelle suggère dans les deux cas une déformation : sur le **doc. 1** il s'agit d'un pli (pli couché, axe du pli subhorizontal), sur le **doc. 2** on observe une faille inverse. Ces déformations témoignent d'un phénomène de raccourcissement, déformation qui accompagne la convergence (cf. cours de première S).



Le pli de Saint-Clément



Pli-faille de Saint Rambert en Bugey

2 DOC. 2 (*Utiliser Mesurim*). En utilisant l'échelle indiquée sur le document, le logiciel Mesurim permet de déterminer l'ampleur du rejet horizontal : il s'agit d'un raccourcissement de 22 mètres environ. L'épaississement, lui, est de l'ordre d'une trentaine de mètres.

3 DOC. 3 ET 4 (*Exploiter des données de terrains, des données cartographiques pour mettre en évidence une nappe de charriage*). La photographie de paysage des Alpes helvétiques montre des formations datées du Permien, donc de l'ère Primaire, qui surmontent des formations de l'ère Tertiaire : cette disposition est anormale. L'interprétation est fournie par le texte et la coupe schématique qui

accompagnent le **doc. 4** : les roches de Glaris constituent une nappe de charriage qui recouvre des formations plus récentes. Le phénomène de charriage doit se comprendre comme un déplacement relatif de deux formations l'une par rapport à l'autre qui aboutit à la superposition partielle de ces deux formations. Il serait souhaitable de montrer aux élèves qu'il s'agit de déplacement relatif et que c'est davantage une unité qui passe sous une autre plutôt qu'une unité qui glisserait sur une autre supposée fixe.

Dans tous les cas, l'empilement de nappes, comme suggéré par la coupe schématique du **doc. 4**, contribue à épaissir la croûte au niveau des chaînes de montagnes.

4 CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Les plis, les failles inverses et les nappes de charriage sont des structures tectoniques montrant des phénomènes de raccourcissement et d'empilement qui contribuent à l'épaississement de la croûte continentale.

UNITÉ 6

Des roches témoignant d'un épaississement crustal

[pp. 154-155 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« L'épaisseur de la croûte [dans les chaînes de montagnes] résulte d'un épaississement lié à un raccourcissement et un empilement. On en trouve [...] des indices pétrographiques (métamorphisme, traces de fusion partielle). - Les résultats conjugués des études tectoniques et minéralogiques permettent de reconstituer un scénario de l'histoire de la chaîne.	- Observer à différentes échelles des roches ayant subi des transformations : échantillon macroscopique, lame mince (doc. 1 et 3) - Utiliser des diagrammes pression- température pour retrouver les conditions d'apparition des minéraux constitutifs, les conditions de fusion partielle des roches (doc 2, 3, 5 et 6) - Communiquer en rédigeant une synthèse

Conseils et suggestions

– Comme dans l'unité précédente, l'objectif poursuivi est de trouver dans les chaînes de montagnes des indices d'épaississement de la croûte mais ici les objets étudiés sont des roches (échantillons macroscopiques, lames minces).

– Les échantillons macroscopiques peuvent avoir été récoltés lors de la sortie de terrain, cette unité apparaît alors comme une exploitation en classe de cette sortie avec les outils d'investigation à disposition dans les salles de TP.

– Cette unité est l'occasion, pour la première fois en classe de terminale, d'observer des lames minces à l'aide du microscope polarisant pour identifier des structures et des minéraux. Des clés de détermination des principaux minéraux des roches sont disponibles sur divers sites (voir coin du labo p. 135 manuel de première S). Le site suivant fournit des conseils techniques pour l'utilisation du microscope polarisant :

<http://www.ac-grenoble.fr/svt/SITE/prof/outils/mineralo/menu-principal.htm>

– En guise de bilan à la fin de l'unité, et donc du chapitre, un rappel des différents objets géologiques observés dans les chaînes de montagnes à différentes échelles peut aboutir à l'élaboration d'un scénario de leur mise en place et de l'histoire de la chaîne. Ce scénario motivera l'étude du chapitre suivant qui précisera la formation des chaînes de montagnes dans le cadre de la tectonique des plaques.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*Extraire des informations pour argumenter*). À l'échelle macroscopique comme à l'échelle microscopique, on observe des minéraux qui semblent aplatis, disposés en lits. Ils sont distribués de façon non homogène et présentent des orientations préférentielles contrairement à ce que l'on observe dans un granite qui, d'après la légende, serait le protolithe (roche initiale avant déformation).

2 DOC. 1 A 3 (*Recenser et organiser des informations*). La déformation du gneiss est une réponse à l'augmentation de la pression et de la température, en lien avec l'épaississement de la croûte. De plus, le gneiss contient de la sillimanite, minéral absent dans le granite : l'apparition de ce minéral est un indice supplémentaire d'une modification de pression et/ou de température en lien avec l'épaississement de la croûte.

3 DOC. 4 A 6 (*Recenser et organiser des informations*). La migmatite provient de la fusion partielle d'un gneiss. Les zones R sont des zones qui n'ont pas fondu (R = restites), mais qui sont très déformées car proches de leur solidus. Les zones M. sont des zones qui ont fondu (M = magma), mais qui ont recristallisé « sur place » donnant une roche d'aspect granitique. D'où le mélange de ces deux zones dans la migmatite.

4 DOC. 6 (*Utiliser des diagrammes pression- température pour retrouver les conditions de fusion partielle des roches*). Lors de l'enfouissement associé à l'empilement de nappes, des roches

(...)

crustales hydratées peuvent franchir le solidus et subir une fusion partielle. Les traces de fusion partielle de roches crustales trouvées dans les migmatites sont des témoins d'un épaissement de la croûte.

5 CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Les roches métamorphiques comme les gneiss, trouvées dans les chaînes de montagnes, sont le résultat de transformations à l'état solide liées à une augmentation de la pression et de la tempéra-

ture d'une roche initiale. Certaines roches comme les migmatites témoignent d'une fusion partielle liée à une augmentation de pression et de température.

Enfouissement et empilement de nappes entraînent une augmentation de pression et de température, dans des conditions favorables à l'apparition de ces roches. Elles sont donc des témoins pétrologiques d'un épaissement de la croûte continentale.

CHAPITRE 2 La formation des chaînes de montagnes

La **page d'ouverture du chapitre** peut être utilisée pour susciter un questionnement sur la formation des chaînes de montagnes : L'image satellite met en évidence les reliefs du massif alpin qui attestent d'un épaissement crustal ;

On identifie facilement le lac Léman, la Corse, ce qui montre l'ampleur de la chaîne, et amène à l'idée que l'on change d'échelle par rapport au chapitre 1 : on se place à l'échelle des plaques lithosphériques, dans le cadre du modèle de la tectonique des plaques. En classe de première S, les contextes de divergence, convergence

et situations de coulissage ont été présentés. L'objectif est ici de montrer que les chaînes de montagnes se forment dans un contexte de convergence lithosphérique. Dans ce contexte intervient une subduction océanique puis continentale. L'affrontement de deux lithosphères continentales aboutit à la formation d'une chaîne de montagnes. C'est ce scénario que le chapitre propose de construire à partir du recueil d'indices de convergence. Enfin, la recherche du moteur de la subduction complète la compréhension de la tectonique des plaques.

UNITÉ 1 Des lambeaux de lithosphère océanique

[pp. 164-165 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
Les chaînes de montagnes présentent souvent les traces d'un domaine océanique disparu (ophiolites). La « suture » de matériaux océaniques résulte de l'affrontement de deux lithosphères continentales.	- Recenser, extraire et organiser des données de terrain, entre autres lors d'une sortie (doc. 1 et 2) - Extraire et organiser des informations pour formuler des hypothèses explicatives (doc. 3 et 4) - Mettre en relation des informations et raisonner (doc. 5) - Communiquer en rédigeant une synthèse

Conseils et suggestions

L'approche de terrain est à nouveau privilégiée, avec un objectif différent : il ne s'agit plus de trouver des indices d'épaissement, mais de recueillir des indices de convergence lithosphérique.

Dans un premier temps, il s'agit de repérer et identifier des lambeaux de lithosphère océanique dans une chaîne de montagnes, et dans un second temps, de relier la localisation des ophiolites dans les chaînes de montagnes à un contexte de convergence.

Des informations et documents complémentaires sont proposés sur les sites du Centre Briançonnais de Géologie Alpine <http://cbga.net>

et sur celui de Christian Nicollet (professeur à l'Université de Clermont Ferrand) <http://christian.nicollet.free.fr>, en particulier sur l'ophiolite d'Oman <http://christian.nicollet.free.fr/page/oman/oman.html>

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*Recenser, extraire et organiser des données de terrain*). Les roches identifiées au Chenaillet sont caractéristiques de la lithosphère océanique. De plus leur succession dans l'espace est cohérente avec celle observée dans la lithosphère océanique,

à cela près qu'elles sont basculées (basculement qui suggère une histoire complexe). Ce panorama est interprété dans le bilan de l'unité 1 p. 174.

2 DOC. 3 ET 4 (*Extraire et organiser des informations pour formuler des hypothèses explicatives*). Dans les Alpes comme dans l'Himalaya, les ophiolites sont localisées au cœur des chaînes de montagnes, à la frontière entre deux plaques lithosphériques continentales. Elles sont présentes sous forme de lambeaux le long de la suture entre plaques. On peut alors formuler l'hypothèse de l'existence passée d'un ou de plusieurs océans, qui ont disparu à la faveur du rapprochement des lithosphères continentales.

3 DOC. 5 (*Mettre en relation des informations et raisonner*). En Oman, la situation de l'ophiolite est associée à un contexte de convergence lithosphérique. Cette convergence entraîne le rapprochement de deux lithosphères continentales, qui finiront par s'affronter. Il restera alors des fragments d'ophiolite, comme on l'observe aujourd'hui dans les Alpes ou l'Himalaya.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). L'étude des ophiolites présentes dans les chaînes de montagnes permet de les interpréter comme des lambeaux de lithosphère océanique charriée sur les continents. Leur présence est interprétée comme un vestige d'un océan disparu et leur localisation au cœur des chaînes de montagnes témoigne d'un phénomène de convergence.

UNITÉ 2 Des vestiges de marges continentales

[pp. 166-167 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
Les chaînes de montagnes présentent souvent les traces d'anciennes marges continentales passives. La « suture » de matériaux océaniques résulte de l'affrontement de deux lithosphères continentales.	- Recenser, extraire et organiser des données de terrain, entre autres lors d'une sortie (doc. 1 à 3) - Extraire et mettre en relation des informations pour raisonner (doc. 4 et 5) - Communiquer en rédigeant une synthèse

Conseils et suggestions

– L'objectif de cette unité est d'identifier les caractéristiques des anciennes marges continentales passives, pour pouvoir ensuite les localiser dans une chaîne de montagnes, et réfléchir à la signification de cette localisation.

– La sortie de terrain est ici encore le point de départ de l'unité. Le site de l'Alpe d'Huez est propice au travail de terrain, mais si le déplacement ne peut pas être envisagé, le manuel propose des documents permettant de construire une démarche adaptée.

Sur le terrain, la démarche mise en œuvre peut être la suivante :

- Identification des roches à l'affleurement (une clé de détermination des roches est disponible sur le site de l'Académie de Strasbourg www.lithotheque.site.ac-strasbourg.fr)
- Cartographie de la répartition de ces roches autour des lacs Noir et Besson.
- Construction d'une coupe géologique simplifiée mettant en évidence la discontinuité dans les strates de grès et dolomie.
- Interprétation de cette discontinuité par la présence de failles normales.
- Analogie avec une structure de marge passive actuelle.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 À 3 (*Recenser, extraire et organiser des données de terrain*). La coupe complétée est présentée dans le bilan de l'unité 2 p. 174. La présence de roches sédimentaires au contact d'un socle

granitique donc continental, la présence de failles normales permettant d'expliquer les relations géométriques entre les strates de roches sédimentaires, sont des arguments suggérant que le paysage étudié est une ancienne marge continentale passive.

2 DOC. 4 (*Extraire et mettre en relation des informations pour raisonner*). Les Tre Cime du Lavaredo sont constituées de roches sédimentaires déposées en milieu océanique relativement peu profond, c'est-à-dire sur le plateau continental, comme l'atteste d'ailleurs la nature des fossiles qu'elles contiennent. Le plateau continental appartient à la marge continentale passive. On peut donc interpréter ces reliefs comme un vestige d'une ancienne marge continentale passive.

3 DOC. 5 (*Extraire et mettre en relation des informations pour raisonner*). Les marges continentales passives actuelles sont localisées de part et d'autre d'un océan. Or dans les Alpes, elles sont très proches et seulement séparées par des lambeaux d'ophiolites ou des sédiments océaniques. Cette disposition atteste d'un rapprochement de ces deux marges.

4 MISE EN RELATION DES DONNÉES (*Mettre en relation les données collectées pour rédiger une synthèse*). La présence de vestiges de marges continentales passives et leur localisation au cœur des chaînes de montagnes témoignent d'un phénomène de convergence lithosphérique associée à la disparition d'un domaine océanique. Leur déformation atteste de l'affrontement de deux lithosphères continentales.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
Les matériaux océaniques et continentaux montrent les traces d'une transformation minéralogique à grande profondeur au cours de la subduction.	- Extraire des informations (doc. 1 et 2) - Repérer à différentes échelles de l'échantillon macroscopique de roche à la lame mince, des minéraux témoignant de transformations liées à la subduction (doc.1 à 3) - Utiliser des diagrammes pression - température pour retrouver les conditions d'apparition des minéraux (doc. 4) - Extraire et mettre en relation des informations (doc. 4 et 5)

Conseils et suggestions

– Les unités précédentes ont permis de dégager des arguments en faveur d'un contexte de convergence associé à la formation des chaînes de montagnes. Celle-ci s'est accompagnée de la disparition d'un domaine océanique. L'objectif de cette unité est de montrer, à partir de l'étude des transformations minéralogiques, qu'une subduction est impliquée dans la disparition de ce domaine.

– Cette unité est à nouveau l'occasion d'observer des lames minces à l'aide du microscope polarisant, ici pour identifier des minéraux caractéristiques du métamorphisme. Des clés de détermination des principaux minéraux des roches sont disponibles sur divers sites (voir coin du labo p. 135, manuel de première S). Le site suivant propose une clé de détermination des minéraux observés au microscope polarisant : <http://www.ac-grenoble.fr/svt/SITE/prof/outils/mineralo/menuprincipal.htm>

Pour aller plus loin, le site du BRGM propose un atlas complet des minéraux :

<http://webmineral.brgm.fr:8003/mineraux/main.html>

– Un autre exemple, classique, de minéral attestant de la subduction de matériel d'origine continental est la coésite. Un exercice lui est consacré (ex. 5 p. 179). Des informations complémentaires sur la coésite de Dora Maira (Alpes) sont disponibles sur le site de Christian Nicollet : <http://christian.nicollet.free.fr> ; un article sur le site planet-terre aborde la coésite de l'Himalaya http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/objets/img_sem/XML/db/planet-terre/metadata/LOM-lmg41-2003-05-12.xml

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*Extraire des informations*). Les roches présentées sur le **doc. 1** ont la même composition chimique qu'un gabbro, roche typique de la croûte océanique. Par ailleurs, elles contiennent un minéral que l'on trouve aussi dans un gabbro : le plagioclase. Ces roches métamorphiques peuvent donc provenir de la transformation de gabbros (protolithe), les autres minéraux

qu'elles contiennent résultent de transformations métamorphiques. Le schiste à carpholite (**doc. 2**) contient du mica blanc, minéral typique de la croûte continentale. De plus, il résulte du métamorphisme de roches sédimentaires argileuses d'origine continentale. Il est issu de roches continentales.

2 DOC. 1 A 4 (*Repérer à différentes échelles, de l'échantillon macroscopique de roche à la lame mince, des minéraux témoignant de transformations liées à la subduction, utiliser des diagrammes de pression-température pour retrouver les conditions d'apparition des minéraux*). Dans l'échantillon de métagabbro, c'est le glaucophane qui témoigne du métamorphisme. Il caractérise le faciès schiste bleu. Il se forme dans des conditions de pression rencontrées au-delà de 15 km de profondeur environ. Dans l'échantillon d'éclogite, la jadéite et le grenat sont des minéraux résultant de transformations métamorphiques. Ils caractérisent le faciès éclogite. Ces minéraux se forment au-delà de 30 km de profondeur environ. Les conditions d'apparition de ces minéraux témoignent d'une subduction de matériel océanique. La carpholite du schiste est le minéral résultant du métamorphisme. Elle apparaît elle aussi dans des conditions de pression correspondant à une profondeur minimale de 15 km environ. Elle témoigne de la subduction de matériel sédimentaire d'origine continentale.

3 DOC. 4 ET 5. (*Extraire et mettre en relation des informations*). D'ouest en est, on rencontre d'abord des roches métamorphiques dans le faciès schiste vert, puis schiste bleu et enfin éclogite. Cela signifie que les unités les plus à l'est ont été soumises à des conditions de pression et de température correspondant à des profondeurs plus importantes : c'est donc la marge européenne qui est entrée en subduction sous la marge africaine.

4 CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Les minéraux résultant des transformations métamorphiques identifiés ici sont des témoins de conditions de haute pression rencontrées dans un contexte de subduction. Celle-ci explique la disparition du domaine océanique associée à la formation des Alpes.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Les résultats conjugués des études tectoniques et minéralogiques permettent de reconstituer un scénario de l'histoire de la chaîne. • Tandis que l'essentiel de la lithosphère continentale continue de subduire, la partie supérieure de la croûte s'épaissit par empilement de nappes dans la zone de contact entre les deux plaques.	• Extraire des informations et mobiliser des connaissances (doc. 1) • Extraire des informations et communiquer sous la forme d'un schéma (doc. 2) • Extraire et mettre en relation des informations pour raisonner (doc. 3) • Communiquer en rédigeant une synthèse

Conseils et suggestions

- Cette unité se présente comme une synthèse qui intègre l'ensemble des données obtenues dans les unités précédentes, mais aussi dans les unités 5 et 6 du chapitre 1. Elle propose un modèle cohérent, simplifié, de la formation d'une chaîne de montagnes.
- La page de gauche présente des résultats d'études géophysiques (sismique réflexion et tomographie sismique) qui complètent les données précédentes.
- La page de droite présente le scénario géodynamique de formation d'une chaîne de montagnes inspiré de celui des Alpes. Il s'agit d'un scénario type, jamais parfaitement réalisé dans la réalité, l'essentiel à retenir sont les trois grandes étapes de formation : subduction océanique, subduction continentale et collision.

L'ouvrage suivant propose des documents complémentaires nombreux (schémas, coupes et photos) sur les Alpes :

« *Visage des Alpes : structure et évolution géodynamique* », P. Agard et M. Lemoine Commission de la Carte Géologique du Monde éd., 2003.

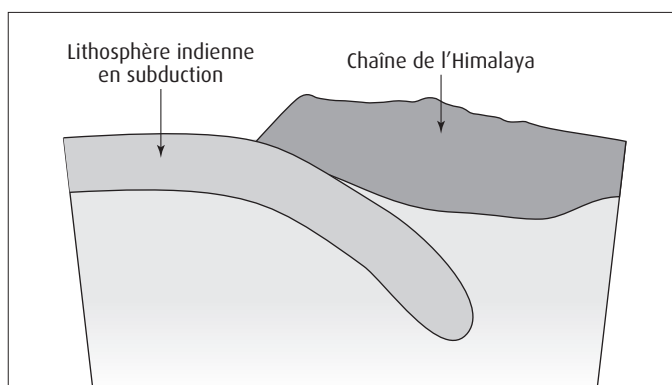
Un profil sismique interprété des Pyrénées est disponible sur le site de la lithothèque de l'Académie de Toulouse :

<http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/geoltheque/pages/lhers/plusloin6-1.htm>

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Extraire des informations et mobiliser des connaissances*). La zone de contact entre les deux plaques est localisée à peu près au niveau de la Dent Blanche (lambeau de croûte continentale africaine qui surmonte le profil interprété) : à cet endroit, l'épaisseur crustale est de l'ordre de 60 km. Cet épaississement est dû à un empilement de nappes de croûte continentale européenne, dans lequel s'intercale un lambeau de manteau (en gris).

2 DOC. 2 (*Extraire des informations et communiquer sous la forme d'un schéma*).



La zone bleue sur le **doc. 2** correspond à une zone de ralentissement des ondes sismiques. Cette anomalie de vitesse négative est liée à la présence d'un matériel anormalement froid à cette profondeur, que l'on peut interpréter comme une lithosphère froide en subduction. Il s'agit de lithosphère indienne, pour l'essentiel de nature continentale : la lithosphère continentale indienne est donc en subduction sous la chaîne himalayenne.

3 DOC. 3 (*Extraire et mettre en relation des informations*). Voir schéma-bilan de l'unité 4 p. 175.

4 CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). La présence d'ophiolites dans les chaînes de montagnes, et d'anciennes marges continentales passives, ainsi que leur localisation au cœur des chaînes de montagnes montre que la disparition d'un domaine océanique a accompagné la convergence de deux plaques lithosphériques, qui a abouti à l'affrontement de lithosphères continentales (unités 1 et 2).

La disparition d'un domaine océanique est liée à une subduction, qui concerne non seulement la lithosphère océanique, mais aussi la lithosphère continentale (unité 3).

Tandis que la lithosphère continentale continue de subduire, l'empilement d'unités de croûte édifie les reliefs (collision) (unité 4).

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
La différence de densité entre l'asthénosphère et la lithosphère océanique âgée est la principale cause de la subduction. En s'éloignant de la dorsale, la lithosphère océanique se refroidit et s'épaissit. L'augmentation de sa densité au-delà d'un seuil d'équilibre explique son plongement dans l'asthénosphère. En surface, son âge n'excède pas 200 Ma.	- Extraire et mettre en relation des informations pour expliquer (doc. 1 et 2 ; doc. 2 à 4). - Raisonnement à l'aide de calculs simples sur le lien entre âge de la lithosphère / densité / subduction (doc. 5) - Communiquer sous la forme d'un schéma – bilan (doc. 6) - Communiquer en rédigeant une synthèse.

Conseils et suggestions

– L'approche du moteur du mouvement des plaques n'était pas l'objet du programme de première S. Ici on le précise.

– Dans les années 70, on est parti du principe que « si de la lithosphère est produite au niveau des dorsales, il faut bien qu'elle disparaisse quelque part, puisque le volume de la Terre est constant ». Ce raisonnement a une origine historique : dans les années 1970, le mouvement au niveau des dorsales était démontré, celui au niveau des zones de subduction l'était moins bien, c'était un argument pour convaincre ! Mais il laisse croire à une relation de cause à effet entre accréation au niveau des dorsales et subduction, et suggère un rôle prédominant des dorsales dans le mouvement des plaques. Or c'est justement le contraire : la subduction est le principal moteur du mouvement des plaques, et non une conséquence de la mise en place de lithosphère au niveau des dorsales. Il est donc important ici de dégager le rôle moteur de la traction par la lithosphère océanique plongeante, qui permet de compléter la compréhension de la tectonique des plaques. Pour un complément d'information, voir les articles suivants sur le site planet-terre :

« La convection mantellique, moteur de la tectonique des plaques, si souvent évoquée, si souvent mal comprise » par Pierre Thomas <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-convection-mantellique-tectonique-plaques.xml>

« La tectonique des plaques de 1970 à 2011 : qu'est-ce qui a changé dans le modèle et n'a pas (assez) changé dans sa transmission depuis l'époque des pères fondateurs » par Pierre Thomas et Olivier Dequincey <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-tectonique-plaques-1970-2011.xml>

D'autre part l'exercice 6 en fin de chapitre permet de mettre en évidence la relation entre vitesse de déplacement des plaques et subduction.

– Le texte du programme indique qu'« en s'éloignant de la dorsale, la lithosphère océanique se refroidit... ». Il faut comprendre en fait que la lithosphère océanique perd de la chaleur (voir l'interview de Pierre Thomas, doc. 6). Avec cette dissipation de chaleur, c'est le sommet du manteau asthénosphérique qui se refroidit, et qui devient alors du manteau lithosphérique. C'est pourquoi le manteau lithosphérique, et avec lui, la lithosphère, s'épaissit. Mais la base de la lithosphère est toujours à une température de 1 300 °C – puisque c'est cette limite thermique qui définit la frontière entre

lithosphère et asthénosphère – on ne peut donc considérer à proprement parler que la lithosphère se refroidit. Ainsi, la subsidence thermique apparaît comme une conséquence d'une modification du profil thermique de la lithosphère et non de sa température (les températures du sommet et de la base sont toujours les mêmes, c'est l'épaisseur de la lithosphère qui augmente).

– Dans cette unité, la page de gauche vise à dégager les modifications des caractéristiques de la lithosphère océanique lorsqu'elle vieillit et s'éloigne de la dorsale.

– La page de droite permet de mettre en relation ces modifications pour montrer qu'elles entraînent une rupture de l'équilibre isostatique, ayant pour conséquence la plongée de la lithosphère dans l'asthénosphère.

Sur le site de l'Académie de Nantes, un formulaire interactif qui permet de suivre l'évolution de l'épaisseur, de la masse volumique (et de la composition minéralogique, à exploiter dans le chapitre suivant) en comparaison avec la masse volumique de l'asthénosphère peut être utilisé avec les élèves :

http://www.pedagogie.ac-nantes.fr/1213958243030/0/fiche_ressourcepedagogique/&RH=1160729734281

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*Extraire et mettre en relation des informations pour expliquer*). Lorsqu'elle vieillit, la lithosphère océanique s'éloigne de la dorsale. On constate sur le **doc. 2** qu'à mesure que la lithosphère s'éloigne de la dorsale elle épaissit par ajout d'une semelle de manteau lithosphérique, l'épaisseur de croûte restant constante. Or la base du manteau lithosphérique correspond à l'isotherme 1 300 °C, qui est de plus en plus profond à mesure qu'on s'éloigne de la dorsale. Cette évolution peut être mise en relation avec les données du **doc. 1** : le flux thermique, qui correspond à une dissipation de chaleur en surface, est très élevé au niveau de la dorsale, puis il diminue lorsqu'on s'en éloigne. Il traduit le refroidissement du sommet du manteau asthénosphérique, qui devient alors du manteau lithosphérique. La conséquence en est l'enfoncement de l'isotherme 1 300 °C qui caractérise la limite lithosphère – asthénosphère lorsqu'on s'éloigne de la dorsale.

2 DOC. 2 À 4 (*Extraire et mettre en relation des informations pour expliquer*). Sur le **doc. 4**, on constate que la profondeur des

fonds océaniques augmente avec leur âge. Cet enfoncement est qualifié de subsidence. Sur le **doc. 3**, on observe que la densité de la lithosphère océanique augmente avec son âge. Cette augmentation de densité peut expliquer la subsidence précédemment observée. L'augmentation de la densité peut être mise en relation avec l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère, puisqu'il s'ajoute du manteau lithosphérique, plus dense que la croûte (**doc. 2**). Comme l'enfoncement de la lithosphère est lié à son évolution thermique (évolution de la profondeur de l'isotherme 1 300 °C), on parle de subsidence thermique.

3 DOC. 5 (*Raisonner à l'aide de calculs simples sur le lien entre âge de la lithosphère / densité / subduction*). Pour déterminer l'épaisseur de la lithosphère au seuil de rupture de l'équilibre, on utilise l'équation fournie dans le **doc. 5** : l'équilibre est rompu lorsque la masse d'une colonne de lithosphère est supérieure à celle d'une colonne d'asthénosphère de même volume, donc le seuil de rupture correspond à l'égalité entre ces masses : $M_L = M_A$ alors $(h_{CO}d_{CO}) + (h - h_{CO}) d_{ML} = h d_A$
 $h = h_{CO} (d_{CO} - d_{ML}) / (d_A - d_{ML}) = 7 (2,9 - 3,3) / (3,25 - 3,3)$
 $h = 7 \times 0,4 / 0,05 = 56 \text{ km}$

On utilise alors la relation fournie par le **doc. 2** pour déterminer l'âge correspondant : $t = (h_L / 9,2)^2 = 37 \text{ Ma}$ (ce résultat est cohérent avec les données du **doc. 3** qui indiquent une densité d'environ 3,25 pour une lithosphère âgée de 37 Ma).

Pour aller plus loin, ce résultat peut être confronté à l'âge des fonds océaniques actuels : il existe en maints endroits des fonds plus âgés. Il y a donc un retard au déclenchement de la subduction une fois que le seuil de rupture de l'équilibre est franchi, qui peut s'expliquer par une résistance à l'enfoncement de la lithosphère dans l'asthénosphère (évoquée par Pierre Thomas dans son interview **doc. 6**).

4 DOC. 6 (*Communiquer sous la forme d'un schéma - bilan*). Voir le schéma - bilan de l'unité 5, p. 175.

5 CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Lorsqu'elle vieillit, la lithosphère s'épaissit, en conséquence sa densité augmente. Lorsque cette densité devient supérieure à celle de l'asthénosphère, l'équilibre est rompu, et la subduction devient possible. Celle-ci se déclenche avec un retard lié à une résistance mécanique à l'amorce de la subduction et à l'enfoncement de la lithosphère..

CHAPITRE 3 La production de nouveaux matériaux continentaux

La subduction a été envisagée en classe de 1^{re} S dans le cadre de la construction du modèle global de la tectonique des plaques. La distribution particulière des foyers des séismes a permis de distinguer la lithosphère de l'asthénosphère et de confirmer le retour de la lithosphère océanique dans le manteau. En terminale S, la subduction est appréhendée comme contexte de convergence lithosphérique et donc d'orogénèse (voir le chapitre précédent). L'objectif de ce chapitre est d'expliquer comment le contexte de

convergence lithosphérique dans les zones de subduction contribue à la production de nouveaux matériaux continentaux.

Dans un premier temps, les caractéristiques du volcanisme de subduction sont présentées (unité 1). Puis l'origine du magma est expliquée (unités 2 et 3). Enfin, il est montré comment ce magmatisme d'origine mantellique fabrique de la croûte continentale (unités 4 et 5).

UNITÉ 1 Le volcanisme des zones de subduction

[pp. 182-183 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
Dans les zones de subduction, des volcans émettent des laves souvent visqueuses associées à des gaz et leurs éruptions sont fréquemment explosives.	- Observer à différentes échelles, de l'échantillon macroscopique à la lame mince, les roches mises en place dans un cadre de subduction et comprendre les différences de structures et leurs particularités minéralogiques (abondance en minéraux hydroxylés). - Comparer les compositions minéralogiques d'un basalte et d'une andésite.

(...)

Conseils et suggestions

– L'éruption du Mérapî d'octobre et novembre 2010 a été choisie pour illustrer le volcanisme de subduction. La description de l'épisode éruptif est tirée du site http://www.lave.be/main/Merapi_2010.htm. Ce site présente de nombreuses informations scientifiques, cartes 3D, cartes du risque volcanique, vidéos, témoignages, images satellitaires, animations, sismogrammes... Il est possible de télécharger des fichiers kmz pour étudier avec Google Earth les coulées pyroclastiques.

– On pourra bien sûr exploiter l'actualité pour présenter une éruption en cours, les volcans actifs de contexte de subduction étant nombreux et les éruptions souvent bien documentées : Mont Saint Helens (EU), Pinatubo (Philippines), Soufrière Hills de Montserrat (Antilles), Krakatau (Indonésie), Lascar (Chili), Arenal (Costa Rica), Stromboli, pour n'en citer que quelques uns.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Saisir des informations*) La description de l'éruption du Mérapî évoque des détonations, des nuées ardentes avec une forte pression en gaz et des coulées pyroclastiques. Par ailleurs, l'éruption transforme l'édifice en détruisant le dôme existant et en le remplaçant par un cratère immense. Toutes ces données témoignent du caractère explosif de l'éruption du Mérapî.

La lave émise par ce type de volcan est visqueuse, la viscosité pouvant être définie comme la résistance à l'écoulement. La production d'un nouveau dôme de lave dans le cratère atteste de la viscosité de la lave produite.

2 DOC. 2 (*Traduire des informations par un schéma*)

Le schéma doit illustrer la structure microlithique de l'andésite avec les microlithes de plagioclase dans une matrice de verre non cristallisée et quelques phénocristaux d'amphibole de biotite et de plagioclase.

La structure microlithique témoigne d'un refroidissement rapide et donc d'une cristallisation de la lave en surface. L'andésite est une roche volcanique.

3 DOC. 2 ET DOC. 5 PAGE 189 (*Mettre en relation des informations*)

Le doc. 5 page 189 fournit les compositions minéralogiques des roches magmatiques des zones de subduction.

Les deux roches (basalte et andésite) ont une structure microlithique. Elles diffèrent par leur composition minéralogique :

– plagioclase, amphibole et biotite pour l'andésite (certaines andésites peuvent présenter des cristaux de quartz)

– plagioclase, pyroxène et olivine pour le basalte

Cette comparaison contribue à mettre en relief la richesse de l'andésite en minéraux hydroxylés par rapport au basalte. Cette abondance de minéraux hydroxylés est une caractéristique des roches magmatiques des zones de subduction.

4 DOC. 3 (*Adopter une démarche explicative*)

De nombreux articles scientifiques sont consacrés à la viscosité. Deux références :

« La viscosité des laves, de l'atome au volcan » : article de Pascal Richet dans PLS : Dossier avril juin 2010

« La viscosité, les silicates fondus, les verres et les magmas » : Daniel R Neuville CNRS IPGP, <http://www.ipgp.fr/~neuville/viscosit1.pdf>

Les laves andésitiques sont plus riches en silice et moins chaudes que les laves basaltiques. Or la viscosité augmente quand la teneur en silice augmente et quand la température de la lave diminue. Les laves andésitiques sont donc plus visqueuses que les laves basaltiques. Plus la lave est visqueuse et plus les gaz s'en échappent difficilement, entraînant une augmentation de la pression en gaz au fur et à mesure de la remontée du magma. Cette surpression est à l'origine du caractère explosif des éruptions.

5 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*).

Le volcanisme de subduction est explosif. Cette particularité est liée à la viscosité des magmas. Ce volcanisme produit une variété de roches microlithiques dont l'andésite est la plus caractéristique. C'est une roche plus riche en silice que le basalte avec des phénocristaux dont certains présentent des radicaux OH. La présence de ces minéraux hydroxylés suggère l'importance de l'eau dans le magmatisme de subduction. La forte viscosité du magma andésitique est surtout due à la teneur élevée en silice.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• La déshydratation des matériaux de la croûte océanique subduite libère de l'eau qu'elle a emmagasinée au cours de son histoire, ce qui provoque la fusion partielle des péridotites du manteau sus-jacent.	• Formuler des hypothèses • Utiliser des résultats expérimentaux pour éprouver une hypothèse • Calculer un taux • Effectuer une synthèse

Conseils et suggestions

– La démarche développée pour présenter l'origine du magma consiste à établir à partir de données expérimentales les conditions de fusion des roches impliquées dans une zone de subduction : celles de la lithosphère océanique subduite et celles du manteau chevauchant. Cela conduit à montrer que seule une péridotite placée dans les conditions de pression et de température du manteau chevauchant peut fondre, à condition qu'elle soit hydratée. Traditionnellement, le géotherme continental est fourni dans les diagrammes de fusion expérimentale. Le choix a été fait dans cette unité de faire placer quelques points de ce géotherme (points A, B et C) par les élèves. De la même façon, l'élève positionne sur le diagramme quelques points du géotherme de la lithosphère subduite. Cela donne du sens à la démarche de recherche de la roche qui entre en fusion.

– Le logiciel « Magma » présente le principe d'utilisation d'une cellule à enclume de diamant permettant de faire fondre une roche au laboratoire et de mesurer la pression et la température de fusion. Ce logiciel est essentiellement dédié à la cristallisation des magmas. Il peut être également utilisé pour montrer que la température de cristallisation varie avec la teneur en eau des magmas.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (Formuler une hypothèse).

Le magma se situe à l'aplomb du volcanisme. La roche susceptible de fondre pourrait être une roche de la croûte continentale, une péridotite du manteau chevauchant, un basalte, un gabbro ou une péridotite de la lithosphère subduite.

2 DOC. 1 ET 2 (Extraire des informations et éprouver une hypothèse).

Les données présentées permettent de tester la possibilité de fusion d'une péridotite ou d'une roche de la croûte océanique. En remplaçant les points A, B et C d'une part et E, F et G d'autre part,

l'élève trace une partie des géothermes, respectivement continental et de la lithosphère subduite (pour la correction, voir page 192, bilan de l'unité 2).

Les conditions de fusion des péridotites

Il constate que les conditions de fusion d'une péridotite anhydre (péridotite sèche) ne sont jamais atteintes. Par contre, une péridotite hydratée placée dans les conditions A, B ou C fond partiellement.

Les conditions de fusion des basaltes

La même démarche aboutit à la conclusion qu'un basalte qu'il soit « sec » ou « hydraté » ne peut fondre dans les conditions d'une lithosphère subduite.

On peut donc conclure que seule la péridotite du manteau chevauchant peut fondre, si elle est hydratée et à des profondeurs comprises entre 80 et 120 km pour des températures de 800 à 1 000 °C.

3 DOC. 3 (Calculer un taux)

Les compositions chimiques de la péridotite hydratée et du magma andésitique diffèrent notablement. On ne peut donc envisager une fusion totale de la péridotite qui donnerait dans pareil cas une roche volcanique de même composition chimique. La fusion est donc partielle et comme les éléments chimiques constitutifs des minéraux fondent à des températures différentes, le taux de fusion détermine la composition du magma.

En considérant que l'élément potassium passe intégralement en phase liquide, on obtient un taux de fusion de 13,6 %.

4 EN CONCLUSION (Mettre en relation les données collectées pour rédiger une synthèse).

Dans une zone de subduction, les péridotites du manteau chevauchant sont hydratées. Dans les conditions de pression et de température qui règnent au dessus de la lithosphère océanique subduite, cette hydratation entraîne la fusion partielle de la péridotite, à l'origine d'un magma de nature andésitique. L'unité suivante pose la question de l'origine de l'eau qui hydrate la péridotite.

UNITÉ 3 L'hydratation du manteau dans les zones de subduction [pp. 186-187 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• La déshydratation des matériaux de la croûte océanique subduite libère l'eau qu'elle a emmagasinée au cours de son histoire, ce qui provoque la fusion partielle des péridotites du manteau sus-jacent.	• Observer des lames minces de roches au microscope polarisant • Saisir des informations • Exploiter des données graphiques

Conseils et suggestions

– Cette unité a pour objectif de déterminer l'origine de l'eau qui hydrate le manteau chevauchant dans une zone de subduction et permet sa fusion partielle donc la production de magma. Elle est fondée sur l'étude de lames minces et fait appel aux connaissances acquises sur le métamorphisme envisagé dans l'unité 3 du chapitre

2. Dans ce chapitre, les roches métamorphiques qui présentent des minéraux de haute pression ont été étudiées comme marqueurs de la subduction. Il s'agit ici de montrer dans un premier temps que les roches de la croûte océanique sont hydratées lors de l'expansion

(...)

océanique puis, dans un deuxième temps, déshydratées, lors de la subduction. Les réactions minéralogiques correspondantes sont présentées dans le manuel mais elles ne sont pas exigibles.

– En ce qui concerne l'utilisation du microscope polarisant, éventuellement évaluée lors de l'ECE, les élèves n'ont pas à mémoriser les critères d'identification microscopiques des minéraux. Ils doivent être formés à utiliser le microscope et le dispositif de polarisation pour faire la mise au point sur un minéral dont on lui a précisé les caractéristiques en LPNA et LPA.

– Il est possible d'envisager un travail sous la forme d'une tâche complexe en fournissant les roches et les lames minces, un diagramme pression – température avec les domaines de stabilité des associations minéralogiques, les équilibres réactionnels et les compositions chimiques des minéraux du métamorphisme. Les élèves doivent alors élaborer une stratégie de résolution du problème formulé en introduction. On peut leur donner comme consignes d'intégrer dans leur réponse des schémas des roches métamorphiques et un trajet P-T-t (à partir du doc. 3).

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Observer des lames minces de roche et effectuer une comparaison*).

Le gabbro est constitué de plagioclase et de pyroxène. On observe dans le métagabbro de faciès schiste vert des minéraux du métamorphisme : la chlorite, l'actinote et la hornblende. Les différences de composition minéralogique entre les deux roches s'expliquent par les transformations subies par la croûte océanique lors de l'expansion océanique, laquelle modifie les conditions physico-chimiques subies par les roches : refroidissement et hydratation.

2 DOC. 2 ET 3 (*Saisir des informations*) Le gabbro se transforme d'abord en métagabbro à hornblende. Le plus souvent, dans les laboratoires de SVT des lycées, les gabbros présentent des auréoles d'hornblende autour des minéraux de pyroxène. Ces auréoles du métamorphisme sont facilement repérables sur les lames minces de roches.

Le métagabbro à hornblende se transforme ensuite en métagabbro

du faciès schiste vert, le plagioclase réagissant avec la hornblende pour donner chlorite et actinote. Tous ces minéraux du métamorphisme sont hydroxylés. Les transformations minéralogiques qui leur donnent naissance sont donc des réactions d'hydratation.

3 DOC. 2 ET 3 (*Saisir des informations*)

Le métagabbro du domaine schiste vert est ensuite impliqué dans la subduction. Il subit alors une augmentation de pression puis ultérieurement un réajustement thermique. Ces variations des conditions thermodynamiques déterminent l'apparition de nouveaux minéraux, le glaucophane (faciès schiste bleu) dans un premier temps puis des minéraux stables à des pressions plus élevées, la jadéite et le grenat (faciès éclogite). Les transformations minéralogiques s'accompagnent d'une libération d'eau qui déshydrate peu à peu les roches de la croûte océanique. L'éclogite est constituée de minéraux ne possédant plus de radicaux OH. A partir d'une certaine profondeur, la croûte océanique est donc anhydre.

De l'eau est libérée au cours de l'enfouissement de la lithosphère océanique. Cette libération d'eau contribue à hydrater le manteau chevauchant et à le faire fondre.

4 EN CONCLUSION (*Effectuer une synthèse*)

La croûte océanique mise en place au niveau de la dorsale s'hydrate au cours de l'expansion océanique. Cette hydratation s'accompagne de transformations minéralogiques donnant naissance à des minéraux hydroxylés comme la chlorite et l'actinote (constitutifs des métagabbros du faciès schiste vert).

Ceux-ci sont ensuite entraînés avec la croûte lors de la subduction. Ils subissent alors un métamorphisme en raison de l'augmentation de la pression. Les transformations minéralogiques qui accompagnent ce métamorphisme libèrent de l'eau qui est à l'origine de l'hydratation de la péridotite du manteau chevauchant. La péridotite ainsi hydratée entre en fusion.

Il est possible de reconstituer l'histoire d'un gabbro et le couplage entre métamorphisme et magmatisme sous la forme du trajet PTt comme présenté à la page 193.

UNITÉ 4 La production de roches plutoniques dans les zones de subduction

[pp. 188-189 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Si une fraction des magmas arrive en surface (volcanisme), la plus grande partie cristallise en profondeur et donne des roches à structure grenue de type granitoïde.	• Calculer un volume • Mettre en relation des informations pour : – établir un contexte de formation de roches – expliquer la structure d'une roche – comparer différentes roches d'un massif

Conseils et suggestions

– Cette unité a pour objectif de montrer la diversité des roches magmatiques produites au niveau des zones de subduction. Après avoir étudié les roches volcaniques, on s'intéresse maintenant aux roches mises en place en profondeur. Les élèves connaissent la distinction entre roches grenues et microlithiques : en 1^{re} S, ils ont étudié les roches de la croûte océanique. Ils connaissent également la structure et la minéralogie des granites. Ces acquis permettent d'aborder la diversité des granitoïdes produits au niveau des marges actives.

– De nombreux exemples de massifs de roches de type granitoïde peuvent être choisis. Le manuel propose le batholite de la Sierra Nevada, en Californie, comme sujet d'étude. L'intention est de montrer que la mise en place de ce massif est associée à un contexte de subduction.

On pourra trouver d'autres informations sur ce massif sur le site de C Nicollet :

<http://christian.nicollet.free.fr/page/enseignement/LicenceSN/SNevada.html>

Le site de l'ENS Lyon Planet Terre présente de nombreuses pages sur les granitoïdes :

http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/search_exist?SearchableText=granite&fuzzy=0

– Une étude des roches en lames minces peut être réalisée. Elle peut d'ailleurs être couplée avec l'étude des roches volcaniques des zones de subduction.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Calculer un volume*) On obtient un volume de 2,24 millions de km³ de roches cristallisées en profondeur. Par comparaison, l'éruption du Mérapî a produit environ 50 millions de m³ de matériaux éruptifs (Doc. 1 page 182).

Le batholite de la Sierra Nevada, mis en place pendant 40 Ma, représentait donc initialement un volume de roches, 45 millions de fois supérieur au volume de produits émis par l'éruption du Mérapî.

2 DOC. 1 ET 2. (*Mettre en relation des informations*). On observe que les limites continentales de l'Amérique du Nord ont évolué au cours du temps. Le document 2 montre en particulier une crois-

sance continentale sur la façade ouest du continent nord américain. Cette croissance peut-être liée à la présence d'une zone de subduction active durant le Crétacé. Le batholite de la Sierra Nevada, orienté nord-sud et parallèle à la marge active s'est formé au cours de cette subduction.

Informations complémentaires : la subduction concerne la plaque Farallon sous les Aléoutiennes et l'Amérique du Nord. Les plaques Juan de Fuca et Cocos sont les vestiges nord et sud de cette plaque Farallon.

3 DOC. 3 ET 4. (*Mettre en relation des informations pour expliquer la structure de différentes roches*).

L'étude de l'extrait simplifié de la carte géologique du parc Yosemite montre la diversité des roches de la Sierra Nevada : granodiorite, granite, diorite d'âge compris entre 116 et 86 Ma.

Le granite et la granodiorite ont une structure grenue. Les cristaux sont visibles à l'œil nu, ce qui témoigne d'un refroidissement lent et donc de la mise en place de ces roches en profondeur.

L'extrait de carte plus détaillé est disponible à l'adresse suivante : <http://virtual.yosemite.cc.ca.us/ghayes/geology.htm>

Un itinéraire géologique virtuel peut être consulté sur le site suivant : <http://virtual.yosemite.cc.ca.us/ghayes/roadside.htm>

4 DOC. 4 ET 5. (*Mettre en relation des informations pour comparer différentes roches d'un massif*)

Ces roches ont toutes une structure grenue témoignant de leur cristallisation en profondeur. Elles sont constituées de quartz, de feldspath, de biotite et d'amphibole. Elles diffèrent surtout par la nature des feldspaths, globalement riches en K (feldspaths alcalins) pour les granites et riches en Ca et Na (plagioclases) pour les diorites. Elles diffèrent également par la teneur en silice et donc la richesse en quartz. Au-delà de ces différences, ces roches ont globalement le même âge, la même localisation, la même structure et la même chimie. Cette unité de temps, d'espace et de chimie suggère une même origine magmatique pour l'ensemble de ces granitoïdes.

5 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*).

Les roches plutoniques des zones de subduction ont une structure grenue qui témoigne de leur mise en place en profondeur. Elles ont une composition globalement granitique qui permet de les classer dans le groupe des granitoïdes.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
Un magma, d'origine mantellique, aboutit ainsi à la création de nouveau matériau continental.	- Extraire des informations - Saisir des informations pour calculer une durée - Adopter une démarche explicative - Saisir des informations graphiques

Conseils et suggestions

- Quelques données bibliographiques :
- Un article d'Hervé Martin sur la formation et la destruction de la croûte continentale <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-croissance-continentale1.xml>
- L'écume de la Terre, Claude Allègre
- Magmatisme et roches magmatiques, Bonin et Moyen
- L'objectif de cette dernière unité du chapitre est de montrer comment le magmatisme plutonique des zones de subduction (étudié lors de l'unité précédente) contribue à la production de matériaux continentaux et donc de croûte continentale. Cette double page permet donc de relier la production de magma dans les zones de subduction à la croissance continentale mais également de quantifier cette production ainsi que la croissance des continents au cours des temps géologiques.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (Extraire des informations).

Les élèves ont appris dans l'unité précédente que les granites et les granitoïdes sont les roches produites par le magmatisme de subduction. Ce sont également les roches constitutives de la croûte continentale. Le schéma du doc. 1 rappelle ces données : il permet de relier ce magmatisme à la production de croûte continentale. C'est l'occasion de faire prendre conscience à l'élève que la croûte continentale a une origine mantellique. Le doc. 2 montre que l'essentiel des granitoïdes est produit par le contexte de subduction. Les zones de subduction sont donc les sites privilégiés de production de matériaux continentaux.

2 DOC. 2 (Saisir des informations pour calculer une durée).

En premier lieu, on constate que la contribution des zones de subduction au volume total de magma émis est relativement faible. Par contre, sa contribution à la production de matériaux continentaux est essentielle.

Les subductions produisent un volume annuel de granitoïdes compris entre 2,1 et 6,8 km³. La croûte continentale a un volume global de 7. 10⁹ km³. Le temps nécessaire pour produire le volume actuel de croûte continentale à la vitesse actuelle de production des granitoïdes dans les zones de subduction est donc compris entre 1,1 et 3,3 Ga.

Remarque : les volumes de roches produits au niveau de dorsales, en particulier les roches intrusives sont plus de deux fois supérieurs

aux volumes produits dans les zones de subduction. Le volume de croûte océanique devrait être plus du double du volume de la croûte continentale. Ce qui n'est pas le cas. Et c'est bien sûr lié au recyclage de la croûte océanique dans les zones de subduction, l'âge de la croûte océanique n'excédant pas 200 mA.

3 DOC. 3 À 5 (Adopter une démarche explicative).

La Terre primitive n'était recouverte que de croûte océanique. La production et la croissance de la croûte continentale débute sans doute vers 4 Ga, âge des roches continentales les plus anciennes (doc. 4). On constate en Amérique du Sud et Amérique du Nord que l'âge des roches continentales diminue globalement du centre vers la périphérie (doc. 5). Ce qui suggère que les continents croissent par leur périphérie. Ceci est cohérent avec la disposition actuelle des zones de subduction (doc. 3), majoritairement localisées sur le pourtour de l'océan Pacifique en bordure continentale et avec le fait que ces zones de subduction sont les contextes privilégiés de production de matériaux continentaux.

4 DOC. 4 ET 6 (Saisir des informations graphiques)

La formation des continents débute vers - 4 Ga. La croissance est modérée pendant tout l'Archéen. Puis la croissance accélère entre - 2,5 Ga et - 1,5 Ga. A partir de cette date, la croissance est à nouveau ralentie voire quasiment nulle. Le doc. 4 montre que la croissance de la croûte continentale résulte de la différence entre accréation continentale (l'expression figure en tant que mots clés dans le programme officiel) et sa destruction. Pour expliquer les variations de la vitesse de croissance, on peut donc évoquer les variations au cours du temps de la production de magma dans les zones de subduction ainsi que les variations de l'intensité de l'érosion à la surface du globe.

L'information que la source de magma a pu varier au cours des temps géologiques (doc. 6) n'est pas exigible. Elle est cependant à relier aux hypothèses formulées dans l'unité 2 et concernant les roches susceptibles de fondre dans une zone de subduction. Elle fait aussi l'objet d'un exercice (page 196).

5 EN CONCLUSION (Communiquer en rédigeant une synthèse).

Les continents ont une croissance centrifuge : ils se développent par leur périphérie où sont localisées les zones de subduction. Les zones de subduction sont donc les contextes privilégiés de formation de matériaux continentaux. En effet, la production de magma d'origine mantellique contribue à la formation de granite et de granitoïdes qui sont les roches constitutives de la croûte continentale. Celle-ci a donc une origine mantellique.

UNITÉ 1

L'évolution des caractéristiques des chaînes de montagnes

[pp. 200-201 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Les chaînes de montagnes anciennes ont des reliefs moins élevés que les plus récentes. On y observe à l'affleurement une plus forte proportion de matériaux transformés et / ou formés en profondeur. Les parties superficielles des reliefs tendent à disparaître. »	• Exploiter des données cartographiques. • Réaliser et exploiter une modélisation analogique.

Conseils et suggestions

– Le recyclage de la lithosphère océanique a été étudié pour partie en classe de première et pour partie dans les chapitres précédents de ce même thème. Il s'agit dans ce dernier chapitre de montrer que la chaîne de montagnes qui se forme par collision continentale n'est qu'une étape transitoire, qu'un objet géologique instable. Ainsi les processus impliqués dans la disparition des chaînes de montagnes sont considérés par le programme comme étant des processus de recyclage de la lithosphère continentale. Dans une première unité il s'agit de montrer que les caractéristiques des chaînes de montagnes évoluent avec la disparition du relief. Les unités 2 et 3 permettent l'étude des processus sédimentaires et tectoniques impliqués dans la disparition des reliefs et l'évolution des caractéristiques des chaînes de montagnes. La dernière unité permet de replacer l'ensemble de ces phénomènes dans un contexte plus général de recyclage lithosphérique.

– Les profils topographiques proposés en doc. 1 permettent d'aborder les reliefs actuels des chaînes de montagnes récentes et de montrer que les reliefs actuels des chaînes de montagnes anciennes dépendent de leur éloignement relatif aux zones de collision actives. Il serait caricatural de penser que le relief du Massif Central, par exemple, est typique d'une chaîne de montagnes anciennes alors même que ce relief est une conséquence de la formation des Alpes.

– De tels profils peuvent être facilement obtenus sur le site internet suivant : <http://www.cartes-topographiques.fr/France.html>

– La comparaison à l'affleurement de la proportion de roches formés et/ou transformées en profondeur est un passage délicat puisque dans une chaîne de montagnes actuelle ou ancienne la proportion de roches formés et/ou transformés en profondeur dépendra en premier lieu de la zone étudiée ; les zones interne ou externe n'étant pas caractérisées par les mêmes types de roches. Le doc. 2 permet de comparer la géologie de deux massifs de même superficie dans les zones internes d'une chaîne récente et d'une chaîne ancienne.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Extraire des informations*). Les Alpes franco-italiennes et l'Himalaya-Tibet sont des chaînes récentes (formation durant le cénozoïque). Les altitudes de ces chaînes sont élevées (> à 2000 m pour les Alpes, > à 5000 m pour Himalaya Tibet ; le point culminant atteignant 8000 m). Massif armoricain et Massif Central appartiennent à une chaîne de montagnes ancienne (chaîne hercynienne) mise en place il y a 300 Ma, les altitudes actuelles de ces massifs sont moins élevées que dans les chaînes récentes ; altitude < 500 m dans le Massif armoricain et < à 1500 m dans le Massif Central. La différence d'altitude que l'on note aujourd'hui entre le massif armoricain et le massif central est due à la chaîne alpine franco italienne. Les forces de collision ont modifié les reliefs situés aux abords de la chaîne alpine en formation. Le Massif Central plus proche des Alpes que le Massif armoricain a été le plus touché.

2 DOC. 2 (*Extraire des informations et exploiter des données cartographiques*). Dans le Massif Central, du granite, du gneiss et des migmatites affleurent. Dans le massif himalayen, granite et gneiss affleurent également mais dans des proportions moindres et l'on trouve majoritairement à l'affleurement des roches sédimentaires. Le granite est une roche magmatique plutonique qui se forme à partir du refroidissement lent et de la cristallisation d'un magma en profondeur. Le gneiss est une roche métamorphique de moyenne pression, cette roche se forme donc en profondeur par transformation à l'état solide de roches préexistantes. Les migmatites sont des roches métamorphiques qui se forment en profondeur par anatexie. Les roches sédimentaires se forment par accumulation de sédiments en surface.

3 DOC. 3 (*Réaliser et exploiter une modélisation analogique*). Enlever un bloc plastique modélise la disparition du relief dans le modèle analogique construit. On remarque que la disparition du relief est compensée en partie par une remontée des blocs plastiques correspondant à l'origine à la racine crustale. Ce modèle montre que la disparition des reliefs provoque la remontée de la racine crustale et donc sa disparition. Grâce à ce processus de ré-

(...)

quillage isostatique, les roches de la racine crustale formées et/ou transformées en profondeur vont être portées à l’affleurement au cours du démantèlement d’une chaîne de montagnes. Ceci explique la grande proportion de roches magmatiques plutoniques et de roches métamorphiques d’origine profonde dans le massif central.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Une chaîne de montagnes dont la formation a débutée il y a

quelques dizaines de millions d’années est considérée comme une chaîne récente. Elle se caractérise par la présence de reliefs élevés et par une proportion relativement importante de roches sédimentaires à l’affleurement. Les hauts reliefs sont compensés en profondeur par une racine crustale. Au cours des temps géologiques, ces reliefs sont voués à disparaître ce qui provoque la remontée et la disparition de la racine crustale. Les roches formées et ou transformées en profondeur sont portées à l’affleurement.

UNITÉ 2 Altération et érosion des reliefs

[pp. 202-203 du manuel de l’élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l’unité
« Altération et érosion contribuent à l’effacement des reliefs. Les produits du démantèlement sont transportés sous formes solide ou soluble, le plus souvent par l’eau, jusqu’en des lieux plus ou moins éloignés où ils se déposent (sédimentation). » « (...) ces phénomènes débute dès la naissance du relief (...) »	Utiliser des images et données satellites pour quantifier et qualifier l’érosion d’un massif actuel.

Conseils et suggestions

- Cette unité vise à présenter un des processus contribuant à la disparition des reliefs : le processus sédimentaire.
- Les images et les données satellites ainsi que les données cartographiques permettront de quantifier l’érosion à différentes échelles de temps. L’étude de l’érosion d’un massif actuel de l’Himalaya permet d’obtenir des vitesses d’érosion à l’échelle humaine (étude faite sur quelques années). L’étude des sédiments cénozoïques issus du démantèlement de l’Himalaya permet de calculer une vitesse d’érosion moyennée sur les 20 derniers millions d’années. La comparaison de ces deux estimations permet de montrer que les ordres de grandeurs trouvés sont les mêmes et de conclure sur une relative constance des processus sédimentaires impliqués dans la destruction des chaînes de montagnes à l’échelle des temps géologiques.
- L’**atelier Sciences actualité** (p. 218) constitue un travail complémentaire à cette unité puisqu’il présente l’altération à l’échelle des minéraux.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 À 3 (*Extraire des informations*)

- Glaciers à broient les roches (altération et érosion), doc. 1.
- Eau liquide à hydrolyse des minéraux (altération et érosion), doc. 1.
- Eaux de ruissèlement à dénudation des reliefs (quelques mm par an) à eau = facteur d’érosion, doc. 3.
- Les ions = produits de l’altération sont dissous dans l’eau à eau = facteur de transport (érosion), doc.1.

- Flux de sédiments dans rivière augmente avec le flux de la rivière en période de mousson à eau = vecteur de transport des sédiments (érosion), doc. 3.
- Fleuve transporte tous les ans des milliards de tonnes de sédiments issus du démantèlement des reliefs jusqu’à l’océan à eau = vecteur de transport (érosion), doc. 2.

2 DOC. 4 ET 5 (*Extraire des informations d’une image satellite*)

Les sédiments transportés par l’eau sous forme solide (sables et argiles) se déposent dans des bassins sédimentaires plus ou moins éloignés de la chaîne de montagnes érodée (bassins sédimentaires continentaux (ex. plaine du Gange) ou océaniques (ex. golfe du Bengale et océan indien). Les ions dissous dans l’eau précipitent sous forme de calcaire dans ces mêmes bassins sédimentaires. Les produits issus du démantèlement des reliefs himalayens sont conservés au cours du temps dans ces bassins et s’y accumulent.

Le graphique montre que le taux d’accumulation des sédiments augmente dès le début de la collision, le processus érosif débute donc en même temps que la collision et que la naissance des reliefs.

3 DOC. 5 (*quantifier l’érosion*) Étape 1: Estimation du volume global de sédiments accumulés sur cette période.

Taux moyen d’accumulation considéré = $1,2 \text{ km}^3.\text{an}^{-1}$

- 24 millions de km^3 de sédiments accumulés en 20 Ma

Étape 2: à Calcul de la vitesse moyenne d’érosion. Soit z l’épaisseur de croûte continentale érodée en 20 Ma.

$$5\,000\,000 \times z = 24 \times 10^6 \text{ à } z = 4,8$$

4,8 km ont été érodés en 20 Ma

- vitesse moyenne d’érosion estimée à $0,24 \text{ mm}.\text{an}^{-1}$ sur les derniers 20 Ma

Étape 3: à Critique du résultat.

L'ordre de grandeur est le même que celui de la vitesse d'érosion actuelle au Népal.

Cependant pour faire ce calcul nous avons fait des approximations successives.

- Considération d'un taux moyen d'accumulation de sédiments et non des taux instantanés.
- Approximation du taux moyen d'accumulation de sédiments sur les 20 derniers millions d'années.
- Utilisation d'une estimation de la superficie de l'Himalaya-Tibet.

4 EN CONCLUSION (Communiquer en rédigeant une synthèse).

Au sein d'une chaîne de montagnes, l'eau reste le principal agent d'altération et d'érosion des minéraux, des roches et des massifs

montagneux. Les produits de l'altération et de l'érosion sont des débris de roches de tailles variables, les sédiments, et des ions dissous dans l'eau. Ces formes solides ou solubles sont transportées par le réseau hydrographique dans des bassins sédimentaires continentaux ou marins plus ou moins éloignés de la chaîne de montagnes dont ils sont issus. Les produits du démantèlement s'y déposent par sédimentation. Ces processus sédimentaires à l'origine de la disparition des reliefs débutent dès la formation de la chaîne de montagnes, la vitesse d'érosion est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres par an.

UNITÉ 3

Des processus tectoniques participant à la disparition des reliefs

[pp. 204-205 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « Des phénomènes tectoniques participent aussi à la disparition des reliefs. » • « (...) ces phénomènes débute dès la naissance du relief (...) »	• Extraire et mettre en relation des informations pour : – expliquer les processus tectoniques de la disparition des reliefs (doc. 1 et 2) – identifier le stade d'évolution d'une chaîne de montagnes (doc. 1 à 4) • Extraire des informations et raisonner pour quantifier l'érosion (doc. 2)

Conseils et suggestions

- Cette unité aborde les processus à l'origine de l'effondrement gravitaire syn-orogénique et post-orogénique.
- Les **doc. 1 et 2** permettent d'identifier les indices d'une déformation extensive de la croûte continentale, dans la région de Basin and Range aux Etats-Unis. Le **doc. 3** illustre l'effondrement gravitaire syn-orogénique, par la coexistence de déformations extensives dans les zones internes des Alpes franco-italiennes et de déformations compressives dans les zones externes (la couleur verte correspond aux déformations cisaillantes, non mentionnées dans le document). Le **doc. 4** présente les différentes étapes de l'évolution d'une chaîne de montagnes et permet d'en déduire le stade d'évolution des deux régions étudiées.
- La revue *La recherche* datant de février 1996 (n° 284) traite des différents modèles d'évolution des chaînes de montagnes. L'ouvrage L. Jolivet, L., Nataf, H.C., 1998 *Géodynamique*, Dunod, aborde aussi ce sujet. La thèse de Sébastien Delacou traitant de la géodynamique actuelle de l'arc alpin (téléchargeable sur Internet <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00008598/en/>) présente des documents exploitables pour illustrer l'effondrement syn-orogénique. Un condensé de sa thèse se trouve sur son site http://www.delacou-bkd.net/Geol_Alpes_TectoActu.html.

Exploitation des documents par les activités

1 **DOC. 1 ET 2** (*Extraire et mettre en relation des informations*). Les vues satellites et aériennes (**doc 1**) montrent une topographie particulière alternant chaînons montagneux et bassins sédimentaires, orientés NE/SO. La formation de ces bassins, à la faveur de failles normales, a entraîné une diminution du relief et donc, un amincissement crustal. Cela s'est accompagné d'un étirement crustal, de plus de 100 %, au SE du Basin and Range (**doc 2**). Ces indices d'une extension globale de la croûte continentale témoignent de l'effondrement d'une ancienne chaîne de montagnes.

2 **DOC. 21** (*Raisonner*). Le volume de la croûte continentale est déterminé par l'épaisseur de la croûte «E», sa largeur «L», de direction NO/SE et sa longueur «L» de direction NE/SO (c'est une constante puisque le jeu des failles normales n'étire pas la croûte selon cette direction mais selon la direction NO/SE). De plus, on considère que le volume initial de la croûte est égal au volume final: $V_i = V_f$, soit $E_i \times l_i \times L_i = E_f \times l_f \times L_f$. Or, $L_i = L_f = \text{constante}$, donc $E_i \times l_i = E_f \times l_f$. Puisque le SE de la région s'est étirée de 100 % depuis 17 Ma dans la direction NO/SE et qu'elle s'étend sur 500 km aujourd'hui (=l_f), alors elle s'étendait sur 250 km avant le début de l'effondrement gravitaire (=l_i). Ce qui donne $E_i = 30 \times 500 / 250 =$

(...)

60. Il y a 17 Ma, la croûte continentale était épaisse de 60 km, soit deux fois plus qu'aujourd'hui.

③ DOC. 3 (*S'informer à partir d'une carte*) On constate la coexistence de déformations extensives au cœur des Alpes franco-italiennes et de déformations compressives à la périphérie. Cela signifie que le cœur de la chaîne est en extension, alors même que la périphérie est en compression (liée à la convergence des deux plaques lithosphériques).

④ DOC. 1 À 4 (*Mettre en relation des informations*). Au début d'une orogénèse, l'épaississement de la croûte continentale est encore faible : l'intensité des forces de volume (liées au poids des roches et à la poussée d'Archimède s'exerçant sur la racine crustale) est inférieure à l'intensité des forces aux limites, générées par la convergence des plaques. Tant que $F_v < F_l$, l'épaississement crustal se poursuit. Si F_v augmente et/ou si F_l diminue (*par un ralentissement de la convergence par exemple*), l'équilibre de ces forces peut être atteint ($F_v = F_l$). L'épaississement maximal de la croûte continentale est alors atteint : la périphérie de la chaîne, dont

l'épaisseur crustale n'est pas encore atteinte, continue à s'épaissir tandis que le cœur de la chaîne commence à s'effondrer (**doc. 4**). C'est le cas des Alpes franco-italiennes actuellement (**doc. 3**). Lorsque $F_v > F_l$, l'épaississement en périphérie de la chaîne de montagnes cesse : c'est toute la chaîne qui s'effondre alors. Ce stade est caractérisé par la présence de nombreux bassins sédimentaires, formés par des failles normales, comme on l'observe dans le Basin and Range aujourd'hui (**doc. 1 et 2**) (*notons qu'il existe d'autres modèles d'effondrement orogénique, notamment celui de la délamination convective, non traitée dans le manuel ; pour aller plus loin, voir l'ouvrage « Géodynamique » de Jolivet, L. et Nataf, H.-C.*).

⑤ EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). L'effondrement des chaînes de montagnes se manifeste entre autre, sur le terrain, par la présence de bassins sédimentaires formés par le jeu de failles normales. Une partie des sédiments issus du démantèlement des reliefs s'y dépose. Ces processus tectoniques participant à la disparition des reliefs peuvent débiter pendant la formation de ces reliefs.

UNITÉ 4 Le recyclage de la lithosphère continentale

[pp. 206-207 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« L'ensemble de ces phénomènes (...) constitue un vaste recyclage de la croûte continentale. »	- Extraire, exploiter et organiser des informations pour : - localiser et quantifier le recyclage de la lithosphère continentale (doc. 1 et 2) ; - expliquer les différences des mécanismes de recyclage des lithosphères océanique et continentale (doc. 2 à 4)

Conseils et suggestions

– Cette unité clôt l'étude du domaine continental. L'existence de roches d'âges variés et parfois très anciens sur la lithosphère continentale, contrairement à la lithosphère océanique (abordé dans l'unité 3 du chapitre 1), est expliquée à la lumière de leurs mécanismes de recyclage, très différents.

– Il convient de préciser ce que l'on entend par « recyclage ». Le recyclage correspond au devenir des matériaux de la lithosphère : ils sont soit transformés (et subsistent dans la lithosphère), soit incorporés au manteau asthénosphérique.

Alors que les matériaux de la lithosphère continentale sont essentiellement transformés par des processus tectoniques, magmatiques, métamorphiques et sédimentaires, au cours des orogénèses successives, la lithosphère océanique disparaît presque totalement au bout de 200 Ma dans le manteau asthénosphérique.

– Le **doc. 1** montre que c'est majoritairement au niveau des orogènes que la lithosphère continentale est recyclée par des processus sédimentaires. Le **doc. 4** illustre le recyclage de la lithosphère continentale par des processus magmatiques, métamorphiques et tectoniques ; ainsi que celui de la lithosphère océanique, essentiellement incorporée dans le manteau. Les différences de méca-

nismes de recyclage sont établies avec ces deux documents.

Le **doc. 2** permet de quantifier les volumes de lithosphères océaniques et continentales incorporés dans le manteau, au bout de 200 Ma, ce qui permet d'expliquer pourquoi on trouve des roches de plus de 200 Ma sur la lithosphère continentale uniquement (ex : gneiss d'Acasta, 4 milliards d'années, **doc. 3**).

Exploitation des documents par les activités

– Les matériaux de la croûte continentale sont recyclés par des processus sédimentaires (**doc 1**) et des processus tectoniques, magmatiques et métamorphiques au niveau des orogènes de subduction et de collision (**doc 4**).

– Dans les zones de subduction, 1,33% seulement du volume de lithosphère continentale est incorporé au manteau asthénosphérique au bout de 200 Ma ($2.10^8 \times (1,1+0,7) \times 100 / (27 \times 10^9)$), tandis que presque 100% du volume de la lithosphère océanique y est incorporé (**doc 2**). Cela explique pourquoi l'on trouve des roches d'âges supérieurs à 200 Ma sur la lithosphère continentale (**doc 3**), contrairement à la lithosphère océanique. Le schéma de la page 209 illustre les différences de mécanismes de recyclage.



EXERCICES DU THÈME 3

Les corrigés des exercices des rubriques « *Évaluer ses connaissances* » et « *S'entraîner avec un exercice guidé* » se trouvent à la fin du manuel (p. 366).

Chapitre 1

[pp. 161-162 du manuel]

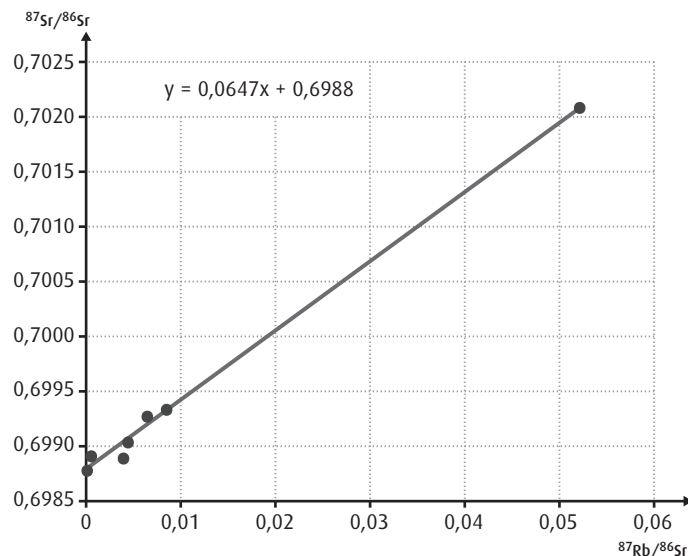
⑤ LA DATATION D'UNE MÉTÉORITE

(Utiliser des modes de représentation graphique)

Réponses attendues :

1. La datation par radiochronologie est fondée sur la décroissance radioactive naturelle de certains éléments chimiques contenus dans les minéraux des roches magmatiques. Le ^{87}Rb est un isotope instable du Rb : il se désintègre en ^{87}Sr . Ainsi, la quantité de ^{87}Rb contenu dans un minéral diminue au cours du temps, alors que celle de ^{87}Sr augmente anticorrélativement, en suivant une loi exponentielle liée au temps. La détermination de la quantité de ^{87}Rb et de ^{87}Sr dans plusieurs minéraux d'une roche permet alors de calculer un âge pour celle-ci.

2.



3. La pente de la droite isochrone est de 0,0647. On peut alors calculer l'âge de la météorite :

$$T = \ln(\text{pente} + 1) / \lambda = 4\,228\,573\,333 \text{ années.}$$

Il est « raisonnable » d'arrondir la valeur obtenue (la représentation graphique montre que tous les points ne sont pas strictement alignés sur la droite isochrone, il y a donc des erreurs de mesure, de plus il y a une imprécision dans la détermination de la pente), et de proposer un âge de 4,4 Ga.

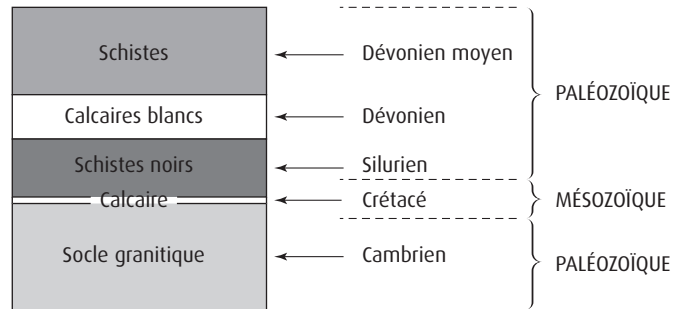
4. L'âge de cette météorite est très proche de celui proposé pour la Terre à partir de la datation d'autres météorites (4,56 Ga). Il est plus élevé que l'âge des plus anciennes roches de la croûte continentale (4,02 Ga).

⑥ LA NAPPE DE GAVARNIE

(Mettre en relation des informations avec ses connaissances)

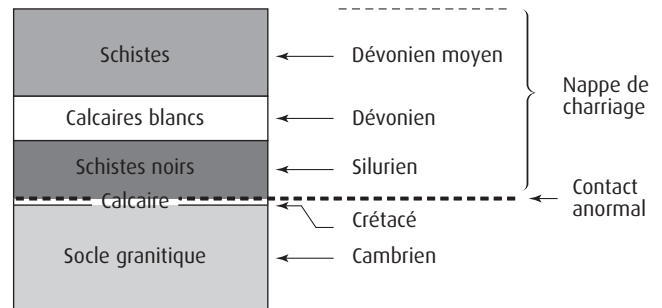
Réponses attendues :

1.



2. On observe sur la photo une disposition relative anormale des couches sédimentaires, puisque des formations du Mésozoïque sont surmontées par des formations du Paléozoïque. Cette disposition peut être interprétée comme résultant d'un déplacement. L'énoncé précise que l'ampleur de ce déplacement est estimée à environ 10 km. Ces caractéristiques suggèrent que la nappe de Gavarnie est une nappe de charriage.

3.



4. L'empilement de la nappe de Gavarnie sur le socle surmonté par les calcaires du Crétacé contribue à épaissir la croûte continentale au niveau des Pyrénées.

⑦ CROÛTE OCÉANIQUE ET CROÛTE CONTINENTALE

(Effectuer une synthèse des connaissances)

Réponse attendue :

Le développement des notions suivantes est attendu :

- Principales caractéristiques de la croûte continentale : Composition, densité, épaisseur, altitude moyenne, âge.
- Mise en relation de certaines caractéristiques crustales et différences d'altitude moyenne entre océans et continents : densité et épaisseur expliquent l'altitude moyenne des continents en lien avec le modèle d'équilibre isostatique.

(...)

⑧ LE REBOND POST-GLACIAIRE

(Adopter une démarche explicative)

Réponse attendue :

1. Les zones de soulèvement crustal actuel sont : l'Antarctique, la Scandinavie, l'Alaska, le Canada et le Groenland. Dans ces zones, la vitesse de soulèvement peut atteindre 18 mm.an^{-1} . Le **doc. 2** montre que les régions concernées de l'hémisphère nord étaient recouvertes par une calotte glaciaire il y a 21 000 ans, et que celle-ci ne subsiste aujourd'hui plus qu'au niveau du Groenland (en domaine continental). De même, on sait que la calotte antarctique diminue progressivement. La lithosphère reposant en équilibre isostatique sur l'asthénosphère, on peut proposer que la disparition d'une surcharge consécutive à la fonte des glaces rompt cet équilibre, ce qui entraîne un soulèvement. On peut alors qualifier ce mouvement vers le haut de « rebond post-glaciaire ».
2. Des zones d'enfoncement crustal sont localisées à la périphérie des zones de soulèvement. Dans le cadre du modèle de l'isostasie, le mouvement vers le bas pourrait être interprété comme résultant d'une surcharge. Celle-ci correspond à un transfert de charge : la fonte des calottes glaciaires nord-américaines et scandinaves transfère de l'eau au domaine océanique.

⑨ LES GNEISS DE BERGEN

(Saisir des informations)

Réponse attendue :

- Les gneiss sont des roches caractéristiques de la croûte continentale. Ce sont des roches métamorphiques, provenant de la transformation à l'état solide d'autres roches lorsque les conditions de pression et de température augmentent.
- Par ailleurs ces gneiss présentent des marques de déformation : développement d'orientation préférentielle des minéraux (alternance de lits clairs et de lits sombres), plis. La formation de plis indique ici un comportement ductile de la roche, qui, avec le litage, témoigne d'une augmentation des conditions de pression et de température.
- On peut mettre ces variations de pression et température en relation avec un épaississement crustal, qui accompagne la formation des chaînes de montagnes.

Chapitre 2

[pp. 179-180 du manuel]

⑤ DES INDICES MINÉRALOGIQUES DE L'HISTOIRE DE LA CROÛTE CONTINENTALE

(Raisonner)

Réponses attendues :

1. La coésite et le grenat sont des minéraux de haute pression : ils permettent d'estimer que les conditions rencontrées ont été : pression supérieure à 3 GPa et température supérieure à 400°C .
2. Les roches métamorphiques échantillonnées résultent de la transformation de sédiments d'origine continentale. De plus, la coésite résulte d'une transformation du quartz, minéral typique des roches de la croûte continentale.
3. Les conditions de pression et température mentionnées plus haut se rencontrent dans une zone de subduction, pour des profondeurs

de l'ordre de 100 km : cette unité de croûte continentale a donc été entraînée en subduction et enfouie à une profondeur de l'ordre de 100 km, avant d'être exhumée en surface, où l'on a échantillonné la roche étudiée (le quartz visible sur la lame mince résulte de la transformation d'une partie de la coésite en quartz lors de la remontée ; l'augmentation de volume associée explique que le grenat présente une fracturation radiale : c'est une rétromorphose).

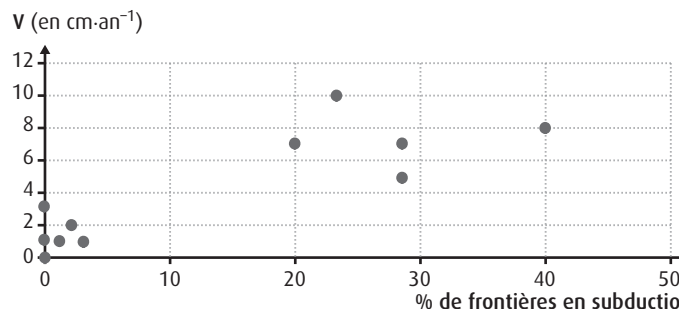
Remarque : C'est dans le Massif de Dora Maira que les roches de plus haute pression des Alpes ont été mises en évidence. La coésite en inclusion au cœur des grenats témoigne d'un enfouissement de l'ordre de 100 km : les roches continentales ont donc atteint la base de la lithosphère (en restant à des températures « basses »). La « couronne » de quartz autour de la coésite et les fentes radiales qui les entourent résultent, lors de l'exhumation, de la transformation inverse de la coésite en quartz, dont le volume molaire est plus important.

⑥ SUBDUCTION ET VITESSE DES PLAQUES LITHOSPHÉRIQUES

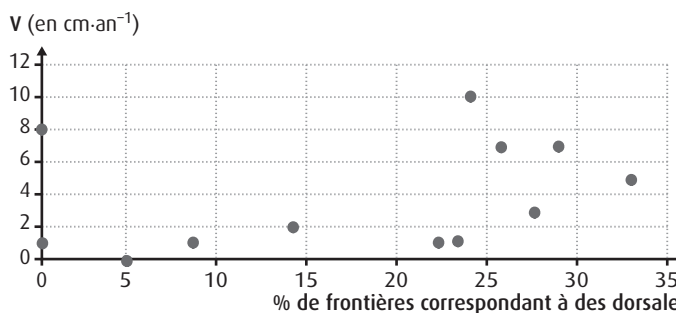
(Calculer et raisonner)

Réponses attendues :

1. Les plaques qui présentent un fort pourcentage de frontières en subduction sont des plaques à vitesse élevée de déplacement, alors que celles ayant peu de frontières en subduction ont une faible vitesse de déplacement. En revanche, le pourcentage de frontières correspondant à des dorsales n'a pas d'incidence sur cette vitesse.
- 2.



Vitesse de déplacement en fonction du pourcentage de frontières en subduction



Vitesse de déplacement en fonction du pourcentage de frontières correspondant à des dorsales

3. On distingue deux groupes de plaques sur le graphique des frontières de plaques en subduction : les plaques qui ont un pourcentage important de frontières en subduction ($> 20\%$) ont une vitesse de déplacement élevée ($> 5 \text{ cm/an}$), celles qui ont un faible pourcentage de frontières en subduction ($< 5\%$) ont une faible vitesse de déplacement ($< 3 \text{ cm/an}$).

En revanche, on n'observe aucune corrélation entre la proportion de frontières de plaque constituée de dorsales et la vitesse de déplacement.

L'hypothèse selon laquelle les zones de subduction ont un rôle largement prédominant dans le mouvement des plaques lithosphériques est donc étayée par ces observations.

⑦ LA CHAÎNE DES MONTS ZAGROS EN IRAN

(Mettre en relation des informations pour construire un raisonnement)

Réponse attendue :

La carte géologique simplifiée (**doc. 1**) et la coupe transversale de la chaîne des monts Zagros (**doc. 2**) permettent d'observer des sédiments mésozoïques et cénozoïques plissés, des failles inverses et le chevauchement principal des monts Zagros. Ce sont des indices d'épaississement.

Le Moho est situé entre 40 et 55 km sous la chaîne des monts Zagros, ce qui suppose un épaississement de la croûte. Puisque la valeur moyenne d'épaisseur de la croûte continentale est de l'ordre de 30 km, il existe donc une racine crustale de 10 à 15 km sous les monts Zagros.

Les ophiolites dispersées dans la chaîne sont des indices de la disparition d'un domaine océanique entre la plaque Arabie et la plaque Eurasie.

Des roches métamorphiques de faciès schistes bleus (**doc. 2**) sont des indices d'une subduction. La disposition des deux faciès schistes verts et schistes bleus suggère que la plaque Arabie est en subduction sous la plaque Eurasie.

De plus, la carte (**doc. 1**) et la coupe (**doc. 2**) mentionnent des roches magmatiques de subduction, c'est un indice supplémentaire.

En conclusion, les indices structuraux de raccourcissement et d'épaississement, la présence d'ophiolites et la présence de roches métamorphiques (et la présence de roches magmatiques de subduction) permettent de proposer que la chaîne des monts Zagros s'est formée à la suite de la collision entre la plaque Arabique et la plaque Eurasie; cette collision a été précédée d'une subduction d'un domaine océanique dont certains fragments subsistent encore sous la forme d'ophiolites.

Chapitre 3

[pp. 197-198 du manuel]

④ LES INFORMATIONS FOURNIES PAR UN MÉTAGABBRO

(Mettre en relation des informations)

Réponses attendues :

1. Le métagabbro présenté est un métagabbro à hornblende. Le domaine de stabilité de cette roche correspond au domaine de stabilité de l'association hornblende + plagioclase et pyroxène résiduel : en bleu foncé sur le graphique pression-température.

2. L'apparition de la hornblende au détriment du pyroxène (auréole

de métamorphisme) se fait par refroidissement et hydratation. Le métamorphisme, que subit la croûte océanique lors de l'expansion océanique s'accompagne donc de son hydratation, illustrée ici par l'apparition de la hornblende qui est un minéral hydroxylé. Lorsque la lithosphère océanique est subduite, la croûte océanique subit un autre métamorphisme lié à l'augmentation de la pression et de la température et entraînant sa déshydratation. L'eau ainsi libérée abaisse le point de fusion de la péridotite du manteau chevauchant qui fond. Cette fusion partielle produit du magma à l'origine du magmatisme des zones de subduction.

⑤ LES CONDITIONS DE FORMATION DES ADAKITES

(Mettre en relation des informations)

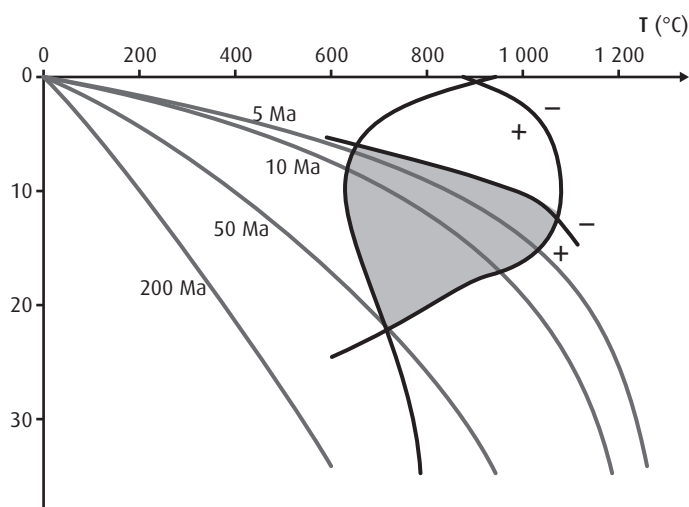
Réponses attendues :

1. A droite du solidus, les conditions de pression et de température permettent la fusion partielle d'un basalte hydraté. A gauche du solidus, les conditions de pression et de température ne permettent pas la fusion d'un basalte, même hydraté.

2. Pour obtenir un magma de composition adakitique, trois conditions doivent être réunies :

- la roche à l'origine du magma se trouve dans les conditions de pression et de température permettant sa fusion
- la roche à l'origine du magma contient de la hornblende
- la roche à l'origine du magma contient du grenat

La zone où ces trois conditions coexistent (zone colorée ci-dessous) se situe à droite du solidus (fusion du basalte hydraté), à gauche de la limite de stabilité de la hornblende (présence de hornblende) et sous la limite de stabilité du grenat (présence du grenat).



3. On constate que seuls les géothermes correspondants à des lithosphères âgées de 5 et 10 Ma traversent la zone de fusion du basalte hydraté à l'origine des adakites. Ce n'est pas le cas pour les géothermes des lithosphères âgées de 50 et 200 Ma. Donc seule la subduction d'une jeune croûte océanique permet la genèse d'adakites.

(...)

⑥ LA CROISSANCE DES CONTINENTS

(Analyser un graphique)

Réponses attendues :

1. Le contexte privilégié de formation de la croûte continentale est la subduction.

2. Le graphique montre que depuis 4 Ga la surface totale des continents croît avec le temps. Mais la croissance des continents n'a pas été constante au cours du temps, puisque la superficie de la croûte continentale par tranche d'âge de 500 000 d'années est variable. La genèse de croûte continentale est associée au phénomène de subduction. L'importance de cette subduction a pu varier au cours des temps géologiques. D'autre part, un processus de destruction de la croûte continentale peut également entrer en jeu : plus une surface continentale est âgée, plus elle a de chances d'être détruite. Ce processus de destruction sera étudié dans le chapitre 4.

Pour prolonger la discussion sur cette croissance continentale et les différents modèles proposés, voir :

– C.P. POITOU. «Le champ magnétique terrestre et la dérive des plaques continentales au Précambrien», thèse de doctorat, IPGP, 2009

http://charlespoitou.free.fr/download/these_poitou.pdf

– STEIN, M., AND BEN-AVRAHAM, Z. *Treatise on Geophysics, Earth Formation and Evolution*, vol. 9. Elsevier, New York, 2007, ch. Mechanisms of Continental Crust Growth.

⑦ LE VOLCAN LASCAR AU CHILI

(Mettre en relation des données et des connaissances)

Réponse attendue :

Le document 1 montre que le volcan Lascar est situé sur la plaque Sud-américaine laquelle est séparée de la plaque Nazca par une zone de subduction. Le document 2 qui est une description de l'éruption du 19 avril 1993 évoque l'aspect explosif de cette éruption et montre un panache éruptif impressionnant (quatre explosions sont évoquées ainsi que des panaches). Le document 3 indique que les cendres volcaniques possèdent une forte teneur en silice, proche de celle des andésites ainsi qu'un pourcentage relativement élevé en vapeur d'eau et CO₂.

Toutes ces caractéristiques sont celles d'une activité volcanique associée au fonctionnement d'une zone de subduction.

Ce volcanisme est dû à la production d'un magma andésitique à partir de la fusion partielle d'une péridotite mantellique. L'aspect explosif peut s'expliquer par la viscosité importante de ce magma qui est déterminée essentiellement par sa grande teneur en silice.

Chapitre 4

[pp. 212-213 du manuel]

⑤ LES CARACTÉRISTIQUES D'UNE CHAÎNE DE MONTAGNES ANCIENNE

(Extraire des données cartographiques)

Réponses attendues :

1. Les caractéristiques à relever sur les documents :

- formation il y a plusieurs centaines de millions d'années (doc 2)
- absence de reliefs élevés (doc 2)
- absence de racine crustale profonde (doc 1)

– proportion importante de roches formées en profondeur et/ ou transformées en profondeur (granite, gneiss, migmatite) à l'affleurement (doc 1)

2. Une collision continentale datant d'il y a plusieurs centaines de millions d'années est à l'origine de la formation d'une vaste chaîne de montagnes à laquelle appartient le massif armoricain. Les caractéristiques de cette chaîne sont celles de l'Himalaya actuel : hauts reliefs (altitude > 3 000 m), racine crustale profonde...

Les processus sédimentaires (altération et érosion) ainsi que des processus tectoniques (formation de failles normales) ont contribué au démantèlement de ces reliefs au cours des temps géologiques. Par réajustement isostatique, la racine crustale a également disparu, des roches formées et/ou transformées en profondeur présentes au sein de cette racine crustale ont été portées à l'affleurement.

3. Sur la carte géologique simplifiée on peut distinguer la présence de failles normales au sein du massif armoricain. Ces failles normales bordent un bassin sédimentaire (au NE de Nantes) dans lequel se sont accumulés des sédiments continentaux contemporains de l'orogénèse hercynienne. L'âge et l'origine des roches sédimentaires de ce bassin prouvent que les processus d'altération et d'érosion de la chaîne ont débuté dès la formation de la chaîne de montagnes. Les failles normales sont elles-mêmes contemporaines de ces processus sédimentaires. On en déduit que les processus tectoniques ayant contribué au démantèlement de la chaîne ont eux aussi débuté dès sa formation.

⑥ TECTONIQUE, ÉROSION ET CLIMAT

(Saisir et mettre en relation des informations)

Réponses attendues :

1. D'après l'énoncé, le rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr des roches de la croûte continentale est supérieur à celui des roches de la croûte océanique ou d'origine mantellique.

Entre 70 et 40 Ma, le rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr dans les sédiments océaniques est stable. A partir de 40 Ma, ce rapport augmente. Cela coïncide avec la croissance de l'Himalaya. L'augmentation de ce rapport résulte probablement d'une arrivée croissante de matériaux d'origine continentale, issus du démantèlement des reliefs himalayens.

2. L'altération chimique d'une mole d'anorthite consomme, entre autre, deux moles de CO₂. Cette réaction conduit notamment à la formation d'une mole de Ca²⁺ et deux moles de HCO₃⁻, dont la précipitation produit, entre autre, une mole de CO₂ et une mole de calcite.

Bilan : 1 mole de CO₂ consommé, par l'altération d'une mole d'anorthite, en considérant la formation de calcite.

3. Dès leur formation, les reliefs continentaux sont érodés. Or, l'altération de la croûte continentale consomme du CO₂ atmosphérique, gaz à effet de serre. On peut supposer que l'érosion de l'Himalaya a entraîné une diminution du CO₂ atmosphérique, responsable (au moins en partie) du refroidissement de 4 °C, depuis 40 Ma.

BIBLIOGRAPHIE

«La mesure du temps dans l'histoire de la Terre», P. De Wever, L. Labrousse, D. Raymond, A. Schaaf, éditions Vuibert, 2005.

« *Comprendre et enseigner la planète Terre* », J.-M. Caron et Coll. Ophrys éd., 2004.

« *Sciences de la Terre et de l'Univers* », Brahic A. et coll., Vuibert éd., 2006.

« *Visage des Alpes : structure et évolution géodynamique* », P. Agard et M. Lemoine. Commission de la Carte Géologique du Monde éd., 2003.

« *La viscosité des laves, de l'atome au volcan* » : article de Pascal Richet dans PLS : Dossier avril juin 2010

« *La viscosité, les silicates fondus, les verres et les magmas* » : Daniel R Neuville CNRS IPGP,

« *L'écume de la Terre* » Claude Allègre. Hachette. 1985.

« *Magmatisme et roches magmatiques* », Bonin et Moyen. Dunod. 2011.

« *Le champ magnétique terrestre et la dérive des plaques continentales au Précambrien* » Poitou C. P. thèse de doctorat, IPGP, 2009

« *Treatise on Geophysics, Earth Formation and Evolution* » Stein, M., et Ben-Avraham, Z., vol. 9. Elsevier, New York, 2007, ch. Mechanisms of Continental Crust Growth.

« *Géodynamique* » Jolivet, L. et Nataf, H. -C. Dunod, 1998.

CHAPITRE 1

Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

UNITÉ 1

L'exploitation de l'énergie géothermique en France

[pp. 226-227 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« La température croît avec la profondeur (gradient géothermique). » « Gradients [...] varient selon le contexte géodynamique. » « L'énergie géothermique utilisable par l'Homme est variable d'un endroit à l'autre. »	- Recenser, extraire et organiser des informations pour : - Citer quelques utilisations possibles de l'énergie géothermique (doc 1 et 2); - Exploiter des données sur les ressources géothermales en France, concernant la température des fluides extraits ou extractibles (doc 4 et ex. 4 p. 238); - Remplacer les exploitations actuelles dans le cadre structural : rift continental, magmatisme de subduction ou de point chauds (doc 1 à 5). - Estimer le potentiel géothermique en France (doc 4 et 6).

Conseils et suggestions

– L'objectif de ce chapitre est double : montrer que l'énergie géothermique constitue une ressource énergétique possible pour l'Homme et comprendre qu'elle est le moteur de la dynamique interne du globe (abordée 4^e, en 1^{re} S et en terminale, dans le thème précédent).

– Afin d'accentuer la dimension « enjeux planétaires contemporains », nous avons choisi d'aborder le chapitre en commençant par les différentes utilisations de l'énergie géothermique en France, en relation avec les contextes géodynamiques (**unité 1**). Puis l'élève est amené à rechercher l'origine de cette énergie et à localiser, à l'échelle de la planète, les zones à fort potentiel d'exploitation (**unité 2**). La mise en évidence d'une production d'énergie géothermique en profondeur amène à rechercher ses modes de transfert en surface (**unité 3**) et leurs conséquences sur la dynamique interne du globe (**unité 4**).

– Les contextes géodynamiques favorables à l'exploitation géothermique, cités dans le BO, sont les zones caractérisées par un magmatisme de subduction, de point chaud ou de rifting. Il s'agit donc de considérer les zones à fort flux thermique, permettant de produire de l'électricité géothermique. Cependant il existe, en France et dans le monde, de très nombreuses exploitations géothermiques situées dans les bassins sédimentaires de type intra-cratoniques, non magmatiques (ex : Bassin parisien, Bassin aquitain). Elles permettent de développer, entre autre, le chauffage collectif et de diminuer les émissions de CO₂ dans l'atmosphère (en France, les émissions de CO₂ sont ainsi réduites de 2,5 % grâce aux 65 installations dédiées au

chauffage urbain). Le développement de ces exploitations, amorcé depuis 30 ans en France, constitue aussi un enjeu planétaire : ce contexte géodynamique ne peut donc être passé sous silence.

D'autre part, il convient d'apporter une nuance au contexte dit de « magmatisme de rifting ». Le rift Est-africain en est la seule véritable illustration. Citer ce contexte, non répandu sur la planète, ne paraît pas justifié. Il convient mieux d'élargir ce contexte à tous les rifts continentaux (= bassins sédimentaires de type fossé d'effondrement : rifts Ouest-européens, rifts de la Chine du Nord, rift Baikal...) et quelle que soit l'abondance du magmatisme. En effet, ces zones présentent un fort potentiel d'exploitation géothermique, en raison de la remontée de l'isotherme 1300 °C. D'ailleurs, l'exploitation située à Soultz-sous-Forêts dans le fossé rhénan ne se trouve pas dans la zone volcanique du rift. Des prospections dans les fossés d'effondrement français, non magmatiques (ou très peu), ont montré qu'une exploitation géothermique est envisageable (**doc 4, unité 1**).

Enfin, dans les exemples choisis (magmatisme de subduction à Bouillante et rift continental à Soultz-sous-Forêts) le gradient et le flux géothermique sont élevés. Cependant, il serait abusif d'affirmer que tous les sites à fort potentiel d'exploitation géothermique sont caractérisés par un fort gradient. En effet, la température peut être parfois très élevée à quelques dizaines de mètres sous le sol (en raison de circulations hydrothermales qui chauffent les roches, par exemple). Dans ce cas, le gradient géothermique est forcément beaucoup plus faible.

(...)

– Dans les **doc 1, 2, 4 et 5 de l'unité 1**, nous traitons de tous ces contextes géodynamiques, présents en France : magmatisme de subduction (exemple de la centrale située à Bouillante, à la Guadeloupe), magmatisme de point chaud à la Réunion (potentiel non encore exploité), rifts continentaux (métropole) et bassins intra-cratoniques (exemple des bassins parisien et aquitain). Le **doc 3** montre que le gradient géothermique varie en fonction du contexte géodynamique. Les **doc 4 et 6** introduisent l'idée que l'utilisation de l'énergie géothermique est variable d'un endroit à l'autre et que la France présente un fort potentiel d'exploitation. Ces documents permettent aussi de relever les atouts et les inconvénients de cette ressource énergétique.

– L'**atelier « enquête » p 260** permet à l'élève de déterminer le potentiel d'exploitation géothermique dans sa ville.

– Le site <http://www.geothermie-soultz.fr/> sur la centrale pilote de Soultz est très complet et propose des supports pédagogiques.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*Extraire des informations*). L'Homme prélève l'énergie géothermique en extrayant les eaux chauffées en profondeur. L'utilisation de cette énergie dépend de la température de l'eau, qui contrôle, avec la pression, son état : sous forme liquide, l'eau chaude est utilisée pour le chauffage collectif urbain, comme dans le bassin parisien (**doc 1**), sous forme de vapeur elle permet de produire de l'électricité, comme à Bouillante (**doc 2**).

(Ces eaux sont des vecteurs de l'énergie thermique. Souvent impures, on emploie le terme de « fluides » caloporteurs)

2 DOC. 1 À 5 (*Extraire et organiser des informations à partir de différents documents*).

– Bassins sédimentaires hors rift : gradient géothermique égal au gradient moyen continental ($30\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$). Fluides prélevés de température $< 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, pour le chauffage collectif. Ex : bassins parisien et aquitain.

– Bassins sédimentaires de type rift : gradient géothermique supérieur au gradient moyen sous les continents ($120\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$) en

raison d'une remontée de l'isotherme $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fluides prélevés de température $> 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, pour la production d'électricité, le chauffage collectif est possible. Ex : rift rhénan.

– Zone magmatique en contexte de subduction : gradient géothermique supérieur au gradient moyen sous les continents ($250\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$). Fluides prélevés de température $> 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, pour la production d'électricité, le chauffage collectif possible. Ex : Bouillante en Guadeloupe.

– Zone magmatique en contexte de point chaud : fluides exploitables de température $> 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, envisageables pour la production d'électricité et le chauffage collectif. Ex : Réunion.

(Il n'est pas indispensable de prélever de l'eau d'une température $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, sous forme de vapeur, pour produire de l'électricité. Une température de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ est suffisante. Grâce à un échangeur thermique, l'eau chaude prélevée chauffe un fluide dont le point d'ébullition est $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$.)

3 DOC. 4 ET 6 (*Extraire des informations*).

– Points forts : Elle permet de réduire les émissions de CO_2 dans l'atmosphère (provenant des combustibles fossiles utilisés pour le chauffage urbain et l'électricité).

– Points faibles : Cette énergie est inégalement répartie. La production d'électricité géothermique n'est pas envisageable partout. De plus, elle ne peut satisfaire seule, les besoins mondiaux en électricité.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*).

Dans les bassins sédimentaires hors rift, comme le Bassin parisien ou aquitain, le gradient géothermique est égal à $30\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$. L'eau prélevée, de température $< 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, est utilisée pour le chauffage collectif (*entre autre*).

A l'aplomb des rifts continentaux et des zones de magmatisme de subduction et de point chaud, le gradient géothermique y est en général plus élevé. Les eaux prélevées sont de température $> 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ et permettent de produire de l'électricité.

UNITÉ 2 Origine et utilisation de l'énergie géothermique à l'échelle mondiale

[pp. 228-229 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Un flux thermique atteint la surface en provenance des profondeurs de la Terre (flux géothermique). (...) Le flux varie selon le contexte géodynamique. Le flux thermique a pour origine principale la désintégration des substances radioactives contenues dans les roches. » « À l'échelle globale, le flux fort dans les dorsales est associé à la production de lithosphère nouvelle ; au contraire, les zones de subduction présentent un flux faible associé au plongement de la lithosphère (...). » « L'énergie géothermique utilisable par l'Homme est variable d'un endroit à l'autre. Le prélèvement éventuel d'énergie par l'Homme ne représente qu'une infime partie de ce qui est dissipé. »	- Extraire et exploiter des informations pour : - Déterminer l'origine de l'énergie géothermique (doc. 1 et 2, exercice 9 p 240) ; - Replacer les exploitations actuelles dans le cadre structural : magmatisme de rifting, de subduction ou de points chauds. (doc. 3 à 6, exercice 8 p. 240 et exercice bac p 259) - Réaliser une carte des principales zones favorables à l'exploitation géothermique (doc 6).

Conseils et suggestions

– Cette unité vise à identifier l’origine de l’énergie géothermique (**doc. 1 et 2**) dissipée en surface (**doc. 3 et 4**), puis à déterminer les contextes géodynamiques favorables à la production d’électricité géothermique dans le monde (**doc 5 et 6**). Le **doc. 5** permet d’autre part de quantifier le prélèvement actuel de l’énergie géothermique.

– Il est proposé dans les capacités mises en œuvre, d’exploiter l’imagerie satellitale. Les images permettant de déterminer les contextes géodynamiques à fort potentiel géothermique sont celles du flux thermique « sensible » (quantité d’énergie thermique échangée par conduction entre la surface et l’atmosphère, par unité de surface et de temps) et non celles du flux thermique « latent » (quantité d’énergie thermique échangée par unité de surface et de temps, entre la surface et l’atmosphère, lors d’un changement de phase de l’eau - par évaporation ou condensation). La carte du flux thermique sensible obtenue par télédétection reflète assez bien les contextes géodynamiques exploitables pour la géothermie. Le site <http://uwacadweb.uwyo.edu/JSINKER/animations/global/> propose de telles images.

– En revanche, le fort flux au niveau des dorsales et le « faible » flux dans les zones de subduction (cités dans le BO) ne sont pas visibles. C’est pourquoi nous proposons à la place deux cartes du flux géothermique issues de mesures à la surface de la Terre (et s’opérant depuis les profondeurs de la Terre). Le **doc 4**, associé au **doc 6** met en évidence le flux fort au niveau des dorsales. Le **doc 3** montre que, globalement, le flux est faible au niveau de la fosse de subduction du Japon, mais localement fort, en raison du magmatisme. Sans cette précision, il peut paraître contradictoire pour l’élève, d’affirmer qu’il y a « un flux faible associé au plongement de la lithosphère » océanique (cf. BO), alors même que les zones de subduction présentent un fort potentiel d’exploitation géothermique.

– Notons que les frontières coulissantes dans le **doc 6** n’ont pas été figurées, afin de mettre l’accent sur les contextes géodynamiques caractérisés par un fort magmatisme.

Exploitation des documents par les activités

❶ DOC. 1 ET 2 (*Raisonner*).

– *Croûte continentale* :

$$1,38.10^{22} \times (1,6.10^{-6} \times 9,94.10^{-5} + 5,8.10^{-6} \times 2,69.10^{-5} + 2,38.10^{-6} \times 2,79.10^{-5}) = 5,26.10^{12} \text{ W}$$

– *Croûte océanique* :

$$6,90.10^{21} \times (9.10^{-1} \times 10^{-6} \times 9,94.10^{-5} + 2,7.10^{-6} \times 2,69.10^{-5} + 4,76.10^{-1} \times 10^{-6} \times 2,79.10^{-5}) = 1,21.10^{12} \text{ W}$$

– *Manteau* :

$$4.10^{24} \times (2,7.10^{-2} \times 10^{-6} \times 9,94.10^{-5} + 9,4.10^{-2} \times 10^{-6} \times 2,69.10^{-5} + 3,9.10^{-2} \times 10^{-6} \times 2,79.10^{-5}) = 2,52.10^{13} \text{ W}$$

– *Noyau* :

$$1,99.10^{24} \times (10^{-5}.10^{-6} \times 9,94.10^{-5} + 10^{-4} \times 10^{-6} \times 2,69.10^{-5} + 1,19.10^{-4} \times 10^{-6} \times 2,79.10^{-5}) = 1,39.10^{10} \text{ W}$$

Le manteau est donc le principal producteur de l’énergie géothermique.

❷ DOC. 3, 4 ET 6 (*Extraire des informations à partir de cartes*).

Les dorsales, lieu d’une intense activité volcanique, sont le lieu d’un fort flux géothermique. Dans les zones de subduction, le flux est localement fort, au niveau de l’arc volcanique.

❸ DOC. 4 ET 5 (*Raisonner*).

– $2,42.10^{17} \text{ J}$ d’électricité géothermique ont été produits en 2010. Or, il faut prélever 5J d’énergie géothermique pour produire 1J d’électricité. On a donc prélevé $1,21.10^{18} \text{ J}$ d’énergie en 2010 ($5 \times 2,42.10^{17}$).

– La Terre émet à sa surface $9,65.10^{20} \text{ J}$ d’énergie thermique ($60.10^{-3} \times 510.10^6 \times 10^6 \times 3600 \times 24 \times 365$).

– Énergie prélevée/énergie émise = $1,25.10^{-3}$. L’Homme prélève 1 millième de l’énergie dissipée en surface.

❹ **DOC. 5 ET 6** (*Réaliser une carte*). La carte doit présenter les zones de subduction, de point chaud et de rifting (rift Est-africain). Les dorsales ne sont pas des zones exploitables, bien qu’étant le lieu d’un fort flux géothermique, car elles sont immergées sous l’eau. La carte p. 234 correspond à la correction.

❺ EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*).

L’énergie géothermique provient de la désintégration des substances radioactives contenues dans les roches. Le manteau en est le principal producteur. Cette énergie est dissipée vers la surface. Le flux géothermique émis à la surface est très variable. Il est fort au niveau des dorsales, en raison de la production de lithosphère nouvelle. Cependant, ces zones ne sont pas exploitables. Dans les zones de subduction, le flux faible résulte du plongement de la lithosphère âgée, devenue froide. En revanche, localement, le flux est fort à l’aplomb de l’arc volcanique. L’énergie géothermique est essentiellement prélevée dans ce contexte géodynamique (Ouest et Nord-Est de la ceinture péripacifique, Italie). L’énergie dissipée dans les contextes de point chaud et de rifting est peu exploitée, à l’échelle mondiale.

L’Homme ne prélève qu’une petite partie de l’énergie dissipée. Bien qu’inégalement répartie, le potentiel d’exploitation de l’énergie géothermique reste fort.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Deux mécanismes de transfert thermique existent dans la Terre : la convection et la conduction. Le transfert par convection est beaucoup plus efficace. »	- Extraire et exploiter des informations pour : - Identifier les deux modes de transfert thermique sous la Terre (doc. 1 et 3) - Comprendre les modalités du transfert thermique par convection (doc. 2) - Réaliser des mesures de conduction et de convection à l'aide d'un dispositif ExAO et les traiter avec un tableur informatique (doc. 3).

Conseils et suggestions

– Après avoir établi que l'énergie géothermique, produite en profondeur, est dissipée à la surface de la Terre, on cherche dans cette unité à comprendre comment elle est transférée.

Le **doc 1** montre que le gradient de température est fort dans la lithosphère et faible dans le manteau sous-jacent.

Le texte du **doc 2** présente les deux modes de transfert thermique s'opérant dans les enveloppes internes ; la simulation numérique permet de comprendre les modalités de mise en œuvre de la convection.

Cela permet à l'élève d'identifier le mode de transfert thermique modélisé dans les deux montages (conduction ou convection) proposés dans le **doc 3**. Le calcul du gradient thermique établi dans chacun des deux montages est à mettre en relation avec le **doc 1** : il permet d'en déduire le mode de transfert s'opérant dans les enveloppes internes. Le calcul de la quantité d'énergie échangée par conduction et par convection permet de montrer que le transfert par convection est plus efficace que par conduction.

– Notons que l'énergie thermique est aussi transférée par conduction dans le montage modélisant la convection. Ce mode de transfert est mineur, comparé à la convection. Il en est de même dans le manteau sous-lithosphérique.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (Analyser un graphique). Le graphique présente l'évolution de la température en fonction de la profondeur.

La courbe décroît : la température augmente donc avec la profondeur.

La pente de la courbe au sein de la lithosphère est faible et semblable au niveau de la limite manteau-noyau (-2900 km). Cela signifie que la température y augmente fortement. Elle atteint environ 1300 °C à -150 km, base de la lithosphère. Elle est comprise entre 2800 °C et 4200 °C environ au sommet du noyau.

Au sein du manteau sous-lithosphérique et du noyau, la pente de la courbe est plus forte : cela signifie que la température augmente de façon moins importante. A la base du manteau, la température est comprise entre 2200 °C et 2600 °C. Elle est donc, au maximum, seulement deux fois plus élevée qu'à la base de la lithosphère.

Ces deux pentes laissent penser que l'énergie géothermique est transférée selon deux modalités différentes au sein du globe.

2 DOC. 2 ET 3 (Extraire et mettre en relation des informations). D'après le **doc 2**, la convection ne peut s'opérer si le compartiment est chauffé par le haut. On en déduit que le montage 1 modélise la convection et le montage 2, la conduction.

3 DOC. 3 (Raisonnement). Pour calculer le gradient thermique, il faut mesurer la distance entre les extrémités des deux thermosondes. Les résultats figurant dans le tableau ont été obtenus pour des thermosondes distantes de 10 cm et un volume d'eau de 1 litre.

– Gradient thermique dans le montage 1 (convection) : $0,53 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$ ($(83,9 - 78,6) / 10$)

Gradient thermique dans le montage 2 (conduction) : $8 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$ ($(100 - 20) / 10$)

– Quantité d'énergie transférée par convection : $2,49 \cdot 10^5 \text{ J}$ ($4180 \times 1 \times (78,6 - 19)$)

Quantité d'énergie transférée par conduction : $6,69 \cdot 10^3 \text{ J}$ ($4180 \times 1 \times (20 - 18,4)$)

– On en déduit que le transfert de l'énergie thermique par convection est plus efficace que par conduction. Plus le transfert thermique est efficace, plus le gradient thermique est faible.

4 DOC 1 ET 3 (Mettre en relation des informations).

Le gradient géothermique étant fort dans la lithosphère et faible dans le manteau sous-jacent, on peut supposer que l'énergie géothermique est transférée par conduction dans la lithosphère et par convection dans le manteau sous-jacent. (*Les limites asthénosphère-manteau inférieur et manteau – noyau constituent chacune une couche thermique limite où l'énergie thermique est dissipée par conduction*)

5 EN CONCLUSION (Communiquer en rédigeant une synthèse). L'énergie produite en profondeur est transférée vers la surface essentiellement par des mouvements de convection dans le manteau (mouvement macroscopique de matière) et par conduction dans la lithosphère (propagation de proche en proche de l'énergie thermique, sans mouvement macroscopique de matière).

Ce sont les mouvements de convection mantellique qui transfèrent le plus efficacement l'énergie géothermique en surface.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« La Terre est une machine thermique. »	- Exploiter les imageries de tomographies sismiques (doc 1 et 2, exercice 8 p. 240 et exercice bac p 259); - Réaliser et exploiter une modélisation analogique de la convection (doc 3); - Réaliser un schéma de la tectonique globale du globe (doc 1 à 4)

Conseils et suggestions

- Il s'agit ici de comprendre que la dissipation de l'énergie thermique est le moteur du mouvement des plaques et est à l'origine de l'inégale répartition du flux thermique mesuré en surface. Il clôt l'étude de la dynamique du globe, abordée dès la 4^e.
- Les **doc. 1 et 2** proposent des images de tomographies sismiques, interprétées par une modélisation analogique dans le **doc. 3**. Le **doc. 4** met en relation les mouvements de convection au sein du globe avec les contextes géodynamiques abordés dans les unités précédentes : subduction, dorsale, rift continental, point chaud.
- Il est important de solliciter l'esprit critique des élèves, quand à la modélisation du **doc. 3**, entre autre sur les paramètres suivants : absence de différence de densité (donc lithosphère et asthénosphère non modélisées), chauffage basal (à opposer au chauffage partout au sein de la Terre).
- Des propositions de modélisation de la convection avec des matériaux de viscosités différentes sont proposés sur le site : http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosgeol/01_decouvrir/03_convection/02_labo/00a.htm

Exploitation des documents par les activités

- 1 DOC. 1 A 3 (Saisir des informations et raisonner).** Sous les îles Samoa (**doc. 1**) et jusqu'à - 2900 km, on constate une zone d'anomalie négative : les ondes sismiques sont donc ralenties. On en déduit la présence d'un matériau anormalement chaud, moins dense que l'encaissant et animé d'un mouvement de convection ascendant, comme le montre le modèle analogique (**doc. 3**). Ce panache mantellique est à l'origine du point chaud en surface (**doc. 1**).
- Les images de tomographie sismique passant par les trois coupes (**doc. 2**) révèlent la présence de zones d'anomalie positive. Cela signifie que les ondes sismiques se propagent plus rapidement

que ce que le modèle théorique prévoit. Elles ont donc traversé des matériaux anormalement froids. Plus denses que l'encaissant, ces matériaux sont animés d'un mouvement de convection descendant, comme le montre le modèle analogique (**doc. 3**). Il s'agit des lithosphères océaniques froides plongeant dans le manteau. Sur les coupes BB' et CC', les lithosphères océaniques semblent avoir atteint - 1700 km.

2 DOC. 1 A 4 (Réaliser un schéma). Sur ce schéma doivent être représentés :

- Des mouvements ascendants de convection, d'origine profonde, générant en surface un magmatisme de point chaud.
 - Des mouvements ascendants de convection, d'origine peu profonde, à l'aplomb des dorsales et des rifts continentaux.
 - Des mouvements descendants de convection, correspondant au plongement de lithosphères océaniques dans le manteau.
- Les mouvements de divergence des plaques au niveau des dorsales et de convergence dans les zones de subduction doivent figurer. Le schéma page 237 représente ces mouvements de convection, associés aux contextes géodynamiques.

3 EN CONCLUSION (Communiquer en rédigeant une synthèse). La dissipation de l'énergie géothermique entraîne des **mouvements de convection** ascendants dans le manteau, d'origine profonde, nommés panaches mantelliques. L'énergie géothermique est dissipée par conduction au sein de la lithosphère, ce qui la refroidit. Lorsque celle-ci devient plus dense que l'asthénosphère, elle plonge alors, ce qui correspond à un **mouvement de convection** descendant. Cela exerce une traction sur toute la lithosphère océanique, à l'origine d'un **mouvement de divergence des plaques** au niveau de la dorsale. La dissipation de l'énergie thermique est donc à l'origine du mouvement des plaques lithosphériques et des mouvements de convection dans le manteau sous-jacent.

CHAPITRE 2 La plante domestiquée

UNITÉ

1

L'origine des espèces cultivées [pp. 242-243 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• L'utilisation des plantes par l'Homme est une très longue histoire, (doc. 2 p. 242 et 3 et 5 p. 243) [...]. • La sélection exercée par l'Homme sur les plantes cultivées a souvent retenu (volontairement ou empiriquement) des caractéristiques génétiques différentes de celles qui sont favorables pour les plantes sauvages. (Doc. 4 p. 243)	• Comparer une plante cultivée et son ancêtre naturel supposé. (doc. 1 p. 242)

Conseils et suggestions

- Pour sensibiliser les élèves à l'histoire de l'utilisation des plantes par l'Homme, on pourra faire chercher les centres de domestication et les dates d'introduction en Europe des végétaux consommés au cours d'une journée (cacao, poivre, café, fruits...).
- On insistera sur le nombre de centres de domestication, et les origines multiples de l'agriculture montrant ainsi qu'il s'agit d'un comportement humain probablement convergent.
- Le caractère volontaire ou involontaire de la sélection empirique ne peut faire l'objet que d'hypothèses, souvent difficiles à tester. C'est le cas par exemple de la baisse de toxicité fréquemment rencontré dans les syndromes de domestication (pomme de terre, carotte...)
- Pour élargir avec des exemples locaux, souvent moins bien documentés que les céréales, on pourra également comparer des plantes de la flore française métropolitaine avec des espèces cultivées : carotte, fenouil, panais, radis, betterave, fraises...

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 A 3. Dans l'exemple des blés, il existe dans les milieux naturels des espèces proches. Ces espèces sauvages proches des blés sont situées dans des régions où l'on trouve archéologiquement les plus anciens grains de blés connus. On peut donc faire l'hypothèse que les blés sont apparentés à ces espèces sauvages et qu'ils ont été domestiqués dans les régions où l'on trouve ces espèces. Ces régions sont appelées foyer de domestication.

2 DOC. 4. Pour la forme sauvage, la protection des grains favorise leur survie, leur dissémination facilitée augmente les

probabilités de rencontrer des conditions de milieu favorables à la germination et enfin leur maturation étalée augmente les probabilités de rencontrer des conditions météorologiques favorables. Tous ces caractères sont des atouts pour la plante et seront maintenus par sélection naturelle. A l'inverse, les blés seront plus faciles à cultiver si leur rachis est solide (moins de perte au moment de la récolte), les grains sont nus (la production de farine est facilitée), et la maturation des grains est synchrone (une seule récolte nécessaire). Les caractères favorables aux espèces cultivées ne sont pas favorables à leur vie en milieu naturel, ce qui explique qu'elles ne peuvent pas y survivre.

3 DOC. 4 ET 5. On constate sur le document 5 que les grains de blés ont des tailles qui augmentent au cours du processus de domestication. Les changements de caractères au cours des générations peuvent se produire naturellement par sélection (sélection naturelle), ici il est probable que l'action de sélection à l'origine de la modification des caractères chez les espèces cultivées a été réalisée par l'homme (sélection artificielle).

4 EN CONCLUSION. Les espèces cultivées ont été sélectionnées artificiellement à partir des espèces sauvages dans des régions appelées foyers de domestication (qui diffèrent selon l'espèce cultivée concernée). Ce processus s'appelle domestication. Les caractères que l'Homme a sélectionnés sont ceux qui facilitent la culture, la récolte et l'utilisation de l'espèce cultivée. Chez le blé il s'agit de la solidité du rachis, de la nudité des grains, de la synchronisation de la maturation et de la taille des grains.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• L'utilisation des plantes par l'Homme est une très longue histoire, qui va des pratiques empiriques les plus anciennes [...]. (doc. 1 et 4 p. 244 - 245) • La sélection exercée par l'Homme sur les plantes cultivées a souvent retenu (volontairement ou empiriquement) des caractéristiques génétiques différentes de celles qui sont favorables pour les plantes sauvages. (Doc. 2 et 3 p. 245)	• Comparer une plante cultivée et son ancêtre naturel supposé. (doc. 1, 2 et 3 p. 244 - 245) • Recenser, extraire et exploiter des informations afin de comprendre les caractéristiques de la modification génétique des plantes. (doc. 1, 2 et 3 p. 244 - 245)

Conseils et suggestions

- Les mécanismes d'hybridation chez les blés peuvent être généralisés chez les plantes en faisant le lien avec le document 2 p. 44 et l'exercice 4 p. 68.
- Les actions de sélection par l'Homme sont des mécanismes évolutifs comparables à la sélection naturelle. On pourra rappeler que la sélection artificielle a été un argument utilisé par Charles Darwin pour proposer l'hypothèse de sélection naturelle.
- Le gène Q code pour un facteur de transcription, c'est ce qui explique ses multiples effets, c'est donc un exemple de gène responsable de plusieurs caractères phénotypiques.
- Pour une mise au point scientifique on pourra lire l'article sur De Henry et al. (L'origine des blés, hors série Pour la Science, De la graine à la plante, 2002).
- Deux articles parus dans Biofutur n° 266 de mai 2006, sont directement en lien avec ce chapitre (La domestication des plantes : de la cueillette à la post-génomique de J. Jahier *et al.* et Le regard de la génomique sur la diversité naturelle des plantes cultivées J. David *et al.*)

Exploitation des documents par les activités

- DOC. 1.** Dans l'histoire des blés cultivés on constate qu'il y eu des événements d'hybridation, des doublements accidentels de chromosomes et des mutations (ici sur le gène Q).
- DOC. 2 ET 3 ET DOC 4 P. 243.** Trois gènes possèdent des allèles qui à eux seuls sont responsables de différents caractères du syndrome de domestication du blé : l'allèle *br* du gène *Brittle* code

pour un rachis solide, l'allèle *tg* du gène *Glume tenace* donne des grains nus, l'allèle *Q* du gène *Q* a des conséquences sur la forme de l'épi, sa solidité et la nudité des grains. Une espèce qui possède ces trois allèles présente un syndrome de domestication.

3 DOC. 4. Pour pouvoir faire l'objet d'une sélection phénotypique un caractère doit être visible ou pouvoir être sélectionné involontairement par l'agriculteur. Il doit également être codé génétiquement pour être transmis à la descendance.

4 DOC 3 ET 4. La taille des grains est un exemple de sélection phénotypique volontaire (**doc. 4**). En effet, en gardant comme semence pour l'année suivante les grains les plus gros de la récolte de l'année, il est probable (à condition que la taille du grain soit héréditaire) que les grains de la récolte suivante seront de plus grande taille. D'autres caractères phénotypiques peuvent être sélectionnés involontairement. La solidité du rachis, par exemple, est transmise à la génération suivante car les grains venant de rachis solides sont plus fréquemment récoltés (ceux de rachis fragiles sont tombés à terre au moment de la récolte).

5 EN CONCLUSION. Pendant le processus de domestication, l'Homme identifie dans les populations sauvages les individus qui présentent les caractéristiques intéressantes pour la culture (solidité du rachis, nudité des grains, taille des grains pour le blé par exemple). En récoltant les grains produits par ces individus et en les utilisant comme semence, il modifie de génération en génération les caractéristiques des espèces cultivées. Ils présentent finalement un ensemble de caractères utiles à l'Homme. L'ensemble de ces caractères constitue le syndrome de domestication. C'est un processus de sélection artificielle.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Une même espèce cultivée comporte souvent plusieurs variétés sélectionnées selon des critères différents ; c'est une forme de biodiversité. • Les techniques de croisement permettent, d'obtenir de nouvelles plantes qui n'existaient pas dans la nature (nouvelles variétés, hybrides etc...).	• Recenser, extraire et exploiter des informations afin de comprendre les caractéristiques de la modification génétique des plantes.

Conseils et suggestions

- Les documents de la page de gauche font référence aux travaux de John Doebley *et al.* (relation de parenté des maïs) et Ducrocq S., Charcosset A. *et al.* (date de floraison). La date de floraison se calcule en jours.température. Une unité également utilisée en entomologie légale. Elle se calcule en additionnant la température moyenne de chaque jour, la floraison a lieu quand la valeur jours. température atteint un certain seuil. Pour simplifier on a ici fixé la température à 20 °C.
- Les histoires des domestications et diversification des plantes cultivées sont parfois difficiles à reconstituer compte tenu des nombreux échanges entre agriculteurs de régions différentes qui ont pu avoir lieu. Les données phylogénétiques sont souvent croisées avec des sources historiques ou archéologiques. L'histoire du maïs a le mérite d'être très bien documentée.
- D'autres exemples de domestication européenne peuvent être évoqués : carotte, fenouil, panais, radis, betterave...
- Pour approfondir on pourra utiliser « Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées, Doré C., Quae, 2006, « Légumes d'hier et d'aujourd'hui », Arvy et al., Belin, 2007 ou Marchenay P., A la recherche des variétés locales de plantes cultivées, Guide méthodologique, disponible en ligne.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2. Le document 2 montre que les variétés de maïs les plus proches phylogénétiquement sont aussi les plus proches géographiquement. Il est donc possible à partir des données du document 1 et du document 2 de proposer les scénarios suivants : après un événement unique de domestication du maïs qui a eu lieu au centre du Mexique à - 7 000 ans, des variétés cultivées différentes ont été sélectionnées de proche en proche. Du centre du Mexique, il y a eu une branche de domestication vers le nord, à l'origine des maïs anciens du nord du Mexique et des États-Unis actuels et une branche vers le sud à l'origine des maïs d'Amérique latine. Par exemple, d'après le document 2, on peut faire l'hypothèse que c'est à partir d'une variété de maïs du sud du Mexique que les variétés des îles Caraïbes ont été sélectionnées.

2 DOC. 3. D'après le document 3, on constate que plus les variétés de maïs sont originaires de zone proche de l'équateur et plus elles ont des dates de floraison tardives à 20 °C. Inversement, il faut peu de temps à une espèce des régions tempérées plus froides pour fleurir et donc produire des grains à maturité. La domestication du maïs a eu lieu dans une zone tropicale (centre du Mexique), on peut donc faire l'hypothèse qu'au cours de la sélection des variétés cultivées plus au nord la capacité à fleurir précocement a été sélectionnée. En effet, la saison chaude étant plus courte, il est préférable d'avoir des maïs qui fleurissent vite. Cette sélection s'est faite au détriment de la productivité, qui reste plus importante en zone tropicale.

3 DOC. 1 A 4. Chez le maïs, on observe un seul événement de domestication suivi d'une sélection de nouvelles variétés importantes sur tout le continent américain. Pour le chou, les événements de domestication ont eu lieu à différentes reprises dans différentes régions d'Europe et ont porté sur des caractères différents (bourgeons, tiges inflorescences...). Après chacune de ces domestications une diversification variétale plus locale a pu avoir lieu.

4 DOC 5. Chez les choux, la sélection a porté selon la région sur des organes différents dont on a sélectionné l'hypertrophie : inflorescence pour le chou-fleur, bourgeons axillaires pour les choux de Bruxelles... Parallèlement et de façon plus ou moins involontaire, on a également sélectionné des préférences culturelles ou des qualités nutritionnelles propres à chacune de ces variétés.

5 EN CONCLUSION. A partir d'espèces domestiquées, la sélection artificielle exercée par l'Homme peut se poursuivre. On peut ainsi pour une même espèce domestiquée avoir de nombreuses variétés qui présentent des caractéristiques (culturelles, nutritionnelles...) différentes. Ces différentes variétés peuvent être adaptées à des climats différents (cas des maïs) ou avoir des propriétés nutritionnelles ou des conditions de cultures diverses (cas des choux). Elles sont le produit pour ces variétés anciennes de l'histoire agricole locale.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Les techniques de croisement permettent, d'obtenir de nouvelles plantes qui n'existaient pas dans la nature (nouvelles variétés, hybrides etc...).	• Recenser, extraire et exploiter des informations afin de comprendre les caractéristiques de la modification génétique des plantes.

Conseils et suggestions

– L'exemple de la diversité cultivée des pommes permet d'évoquer un aliment courant, fortement menacé dans sa diversité, notamment en France, et ayant un lien direct avec les problématiques environnementales (utilisation importante de produits phytosanitaires).

– De nombreuses espèces peuvent être utilisées comme exemple pour élargir les notions abordées ici (érosion de biodiversité cultivée, caractères intéressants des variétés anciennes) et montrer leur caractère généralisable. On pourra par exemple s'appuyer sur une visite d'un écomusée ou d'un conservatoire de biodiversité proche du lycée. Voir aussi sur ce thème l'atelier «Les conservatoires de ressources génétiques» p. 261.

– En ce qui concerne les techniques et les enjeux de la sélection et de l'amélioration des plantes on pourra consulter *Gallais A, Amélioration des espèces végétales cultivées, INRA éditions* et l'article *Caboche M., L'essor de la génomique végétale, Biofutur 265, avril 2006*. On pourra enfin compléter cette vision avec l'atelier «Sélectionneur végétal» p. 260 (voir notamment les références en ligne pour des exemples de projet de sélection).

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1. Les variétés de pommes commercialisées aujourd'hui à grande échelle présentent une forte productivité, un bel aspect. La résistance à la tavelure, pourtant une maladie fréquente chez les pommes, est assez peu présente chez ces variétés.

2 DOC. 1 A 3. Des variétés anciennes comme la Colapuis ou la Reinette, présentent des résistances naturelles à la tavelure. La Calville du roi se conserve très bien. Ces variétés ont donc des caractéristiques recherchées qui peuvent permettre de limiter le recours à des fongicides (résistance à la tavelure) ou l'utilisation de réfrigérateur (bonne conservation).

3 DOC. 4. Après fécondation, le zygote possède un lot de chromosome provenant de chaque parent. Ces chromosomes ont subi des crossing-over (ou enjambements) qui permettent aux gènes de se recombiner. Après chaque croisement de pommier, en sélectionnant les phénotypes qui nous intéressent (caractéristiques «élite» + résistance à la tavelure), on sélectionne également les combinaisons de gènes qui codent pour ces caractéristiques. En utilisant ces individus sélectionnés comme parents et en les recroisant à chaque étape avec un individu élite, il est possible, après de nombreux croisements, d'obtenir des individus possédant les caractéristiques phénotypiques recherchées. Cette méthode est donc très longue puisqu'elle nécessite (1) de nombreux croisement et (2) après chaque croisement d'attendre que les caractères phénotypiques puissent être observables.

4 EN CONCLUSION. La biodiversité cultivée est en forte réduction depuis quelques décennies, notamment parce que les variétés cultivées aujourd'hui sont peu nombreuses. Pourtant cette biodiversité cultivée, notamment pour les variétés anciennes, est une source importante de caractères potentiellement utiles qui par croisement peuvent être à l'origine de la formation de nouvelles variétés intéressantes.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Les techniques du génie génétique permettent d'agir directement sur le génome des plantes cultivées.	• Recenser, extraire et exploiter des informations afin de comprendre les caractéristiques de la modification génétique des plantes.

Conseils et suggestions

– Sur les modalités techniques des biotechnologies utilisées en agronomie on pourra se référer à Tourte Y. Génie génétique et biotechnologie, Dunod, 2002.

– En ce qui concerne la controverse sur les OGM, il conviendra de dépassionner le débat par l'utilisation d'arguments factuels pour et contre l'utilisation des OGM. Parmi les arguments «pour» on pourra insister (en utilisant des exemples) sur la diversité des gènes d'intérêt et des caractères associés en précisant chaque fois qui est le bénéficiaire du nouveau caractère (agriculteur, distributeur, consommateur) et en différenciant les OGM commercialisés, des OGM à l'étude. On modulera le propos en montrant que la controverse sur les OGM est différentielle en fonction des espèces concernées. Le développement des résistances, les hybridations avec des individus sauvages, les risques allergiques, la dépendance économique aux semenciers sont les risques et problèmes les plus couramment cités.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 A 3. La transgénèse est une technique permettant l'introduction d'un gène d'une espèce dans le génome d'une autre espèce. Pour cela il est possible d'utiliser une bactérie du genre *Agrobacterium*. Cette bactérie possède un plasmide (fragment d'ADN circulaire) avec lequel elle infecte naturellement les cellules végétales. En modifiant ce plasmide et en y insérant le gène d'intérêt (transgène) et un gène de sélection (résistance à la kanamycine par exemple) on réalise un plasmide dit recombinant. Après mise en contact des bactéries *Agrobacterium* recombinantes avec les cellules végétales (le plasmide est transféré), on sélectionne alors les cellules végétales ayant intégré le plasmide : elles se développent sur un milieu contenant de la kanamycine. Elles ont donc

également acquis le gène d'intérêt qui va s'intégrer naturellement à leur génome. L'un des avantages de la transgénèse est sa rapidité de mise en œuvre.

2 DOC. 2. Il est nécessaire de connaître le gène codant pour le caractère recherché.

3 DOC. 4. Le Maïs BT, le Colza «Round up ready» présente des avantages pour les agriculteurs principalement. La tomate «Mac Gregor» est surtout intéressante pour le distributeur et le commerçant. En revanche le riz doré présente des avantages pour le consommateur.

4 DOC 5. Ces espèces cultivées pouvant s'hybrider avec des individus sauvages, il est possible que des échanges de gènes surviennent entre plantes OGM et plantes sauvages. Ce risque est réduit pour les espèces dont les foyers de domestication sont sur d'autres continents (cas du maïs en Europe) et est élevé pour les espèces cultivées à proximité d'espèces sauvages apparentées comme la betterave ou la carotte en Europe.

5 EN CONCLUSION. Les OGM ont des avantages qui varient selon les espèces concernées et les OGM produits. Certains OGM vont limiter l'usage des insecticides (cas du maïs BT) ou permettre d'utiliser les herbicides de façon plus efficace car la plante cultivée y est elle-même résistante (Colza «Round up ready»). La tomate «MacGregor» facilite le transport et la conservation. Les avantages sont donc variables selon les OGM concernés et les bénéficiaires peuvent être les agriculteurs, les distributeurs ou les consommateurs. En ce qui concerne les risques, ils sont liés à la capacité de ces OGM à s'hybrider avec des espèces sauvages, propageant ainsi des transgènes qui peuvent poser problèmes ensuite (cas des résistances aux herbicides). Par ailleurs, les semences OGM sont la propriété des entreprises qui les ont mis au point et doivent être rachetées chaque année, rendant ainsi les agriculteurs dépendant de leur fournisseur.



EXERCICES DU THÈME 4

Les corrigés des exercices des rubriques «Évaluer ses connaissances» et «S'entraîner avec un exercice guidé» se trouvent à la fin du manuel (p. 366).

Chapitre 1

[pp. 239-240 du manuel]

⑤ LA TERRE SELON ATHANASIUS KIRCHER

Commenter et critiquer un texte historique

Réponse attendue :

Trois points sont traités par A. Kircher : la source de l'énergie géothermique, son mode de transfert et la conséquence en surface.

- L'énergie thermique proviendrait de réserves éparses de feu (vestiges d'un ancien soleil refroidi, dont serait issu la Terre, ce qui est faux). Nous savons aujourd'hui que l'énergie géothermique est produite principalement par les substances radioactives.

- L'énergie thermique serait dissipée en surface grâce à l'ascension de feu par des «fissures», depuis le centre de la Terre. Ceci est faux : l'énergie géothermique est transférée en surface par conduction et, majoritairement, par convection mantellique.

- Les éruptions volcaniques seraient des manifestations de la dissipation de l'énergie thermique. C'est effectivement le cas. Il est cependant surprenant qu'il n'évoque pas la fusion des roches sous l'action de ces «feux» et l'émission de laves en surface qui en résulterait.

⑥ FLUX GÉOTHERMIQUE OCÉANIQUE ET CONTINENTAL

Exploiter un graphique et raisonner

Réponses attendues :

1. Ce graphique présente l'évolution du flux géothermique en fonction de l'âge de la croûte océanique. On constate que le flux géothermique décroît, à mesure que la croûte océanique vieillit. Le flux dissipé par une croûte nouvellement formée atteint un peu plus de 300 mW.m^{-2} , tandis qu'il n'est que de 60 mW.m^{-2} à la surface d'une croûte âgée de 80 Ma à 160 Ma.

En effet, la croûte océanique se refroidit par conduction après sa formation au niveau de la dorsale. Ce refroidissement rend la lithosphère océanique de plus en plus dense. Lorsque sa densité dépasse celle de l'asthénosphère, elle plonge alors.

2. Ce graphique présente l'évolution du flux géothermique émis à la surface de la croûte continentale en fonction de l'âge de la dernière orogénèse. On observe que plus l'âge de la dernière orogénèse est récent, plus le flux géothermique augmente. Le flux moyen émis dans les zones non remobilisées depuis 2 milliards d'années par une orogénèse est proche de 40 mW.m^{-2} . Dans les zones remobilisées depuis moins de 250 millions d'années, il dépasse 60 mW.m^{-2} .

Ces zones comprennent les chaînes de montagnes actuelles caractérisées par un épaissement crustal important. Or, la croûte continentale contient des substances radioactives dont la désintégration produit de l'énergie thermique. Donc sur une même surface donnée, la quantité d'éléments radioactifs et d'énergie thermique produite est plus importante au niveau des orogènes que des plaines, dont l'épaisseur crustale est moindre.

3. Les zones de subduction sont caractérisées par la présence d'un arc volcanique, à l'origine d'un fort flux géothermique en surface. Ce volcanisme est cependant localisé. En dehors de ces zones volcaniques, le flux est faible en raison du plongement de la lithosphère océanique, froide. (Cela est bien observable dans le doc. 3 p 228)

⑦ L'ORIGINE ET LA DISSIPATION DE L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

Rédiger une synthèse des connaissances

Réponses attendues :

Cette synthèse inclut quelques notions abordées dans les chapitres précédents, sur le domaine continental et sa dynamique.

- L'énergie géothermique provient principalement de la désintégration des substances radioactives contenues dans les roches en profondeur. Le manteau en est le principal producteur.

- Elle est essentiellement dissipée par l'ascension de matériau chaud d'origine profonde, au sein du manteau sous-lithosphérique. Ce mode de transfert thermique, nommé convection, est plus efficace que la conduction qui propage l'énergie thermique sans mouvement macroscopique de matière. Au sein de la lithosphère, l'énergie géothermique est uniquement dissipée par conduction.

- Le refroidissement de la lithosphère océanique se manifeste par l'abaissement de l'isotherme 1300°C , ce qui augmente son épaisseur par ajout de manteau. La densité du manteau lithosphérique étant supérieure à celle de la croûte océanique, la lithosphère océanique devient plus dense. Lorsque sa densité dépasse celle du manteau asthénosphérique, elle plonge (= mouvement de convection descendant), engendrant un mouvement de convergence entre la lithosphère océanique plongeante et la lithosphère sus-jacente. Ce plongement exerce une traction sur toute la lithosphère océanique, à l'origine d'un mouvement de divergence des plaques de part et d'autre de la dorsale.

(Le lien de causalité entre la divergence des plaques et l'ascension et la fusion de matériau mantellique à l'aplomb de la dorsale n'est pas exigible. D'autre part, le modèle de rifting actif, engendré par l'ascension d'un matériau chaud n'est pas abordé dans ce programme)

(...)

⑧ LE POTENTIEL D'EXPLOITATION GÉOTHERMIQUE EN ISLANDE

Mettre en relation des informations

Réponses attendues :

Dans le **doc. 1**, on observe de nombreux volcans d'âge inférieur à 0,7 Ma au centre de l'Islande. Cela suggère la présence d'un flux géothermique élevé en surface.

D'autre part, les roches volcaniques sont de plus en plus âgées, du centre vers la périphérie de l'île, selon un axe nord-ouest/sud-est. Les roches volcaniques les plus récentes sont affectées de failles normales, situées dans le prolongement de la dorsale océanique, visible au nord et au sud de l'île. Ces indices laissent penser que ces roches ont été mises en place par la dorsale. En effet, la divergence des plaques lithosphériques laisse place à de nouvelles roches magmatiques, formées à l'aplomb de la dorsale.

La tomographie sismique (**doc. 2**) met en évidence un ralentissement de la propagation des ondes sismiques sous l'Islande, jusqu'à une profondeur de 2 500 km. Cela révèle l'existence d'un matériau anormalement chaud, d'origine profonde. Il s'agit d'un panache mantellique dont on sait qu'il produit en surface un magmatisme abondant nommé point chaud.

Ainsi, l'Islande est un pays à fort potentiel géothermique en raison d'une activité magmatique abondante d'une dorsale et d'un point chaud.

⑨ ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE ET ÉNERGIE SOLAIRE

Saisir des informations et raisonner

Réponses attendues :

1. 83,3 % de l'énergie totale produite par la Terre provient de la désintégration des éléments radioactifs ($35/42 \times 100$). Les autres sources représentent environ 16 % de l'énergie interne.

2. Il y a 4 milliards d'années, la Terre produisait 150,1012 W d'énergie thermique, par désintégration des éléments radioactifs. Elle en produisait donc au minimum quatre fois plus qu'aujourd'hui ($150/35$), compte tenu des autres sources d'énergie.

D'autre part, les isotopes ^{40}K et ^{235}U produisaient les 2/3 de l'énergie géothermique, tandis qu'aujourd'hui, les isotopes ^{232}Th et ^{238}U produisent les $\frac{3}{4}$ de l'énergie géothermique.

3. $42.10^{12} / 7.10^{17} = 6.10^{-5}$. La part de l'énergie produite par la Terre est 60 000 fois plus faible que celle reçue par le soleil. C'est donc essentiellement l'énergie solaire qui contribue à la température de la Terre. Buffon se trompait.

Chapitre 2

[pp. 256-257 du manuel]

⑤ LE TOURNESOL SAUVAGE

Analyser des données

Réponses attendues :

1. Chez les tournesols cultivés, on constate une absence de ramifications, des fruits plus gros (cinq fois environ) et plus nombreux (15 fois environ) et des feuilles de plus grande taille (1,5 à 2 fois).

2. L'augmentation de la capacité photosynthétique (feuilles plus grandes) permet une plus grande productivité. Le poids de fruits par pied passe ainsi de 1 gramme (maximum) à 97 grammes

(maximum). La présence d'une seule inflorescence par pied permet une maturité synchronisée de tous les fruits et une récolte plus aisée pour l'agriculteur.

⑥ LA BETTERAVE SUCRIÈRE

Analyser des données

Réponses attendues :

1. La betterave sucrière et la betterave maritime étant génétiquement proches, elles peuvent s'hybrider. Il est donc possible de retrouver des allèles caractéristiques des betteraves cultivées dans des individus sauvages dont au moins un des parents est une betterave sucrière cultivée.

2. D'après la carte, on constate que dans les régions Basse-Normandie, Haute-Normandie, Picardie, Nord-Pas-de-Calais et Auvergne il y a à la fois une production de betterave sucrière (cultivée) et la présence de betterave maritime (sauvage).

3. Les betteraves cultivées et sauvages pouvant s'hybrider, on peut supposer que la culture de betteraves OGM dans les régions où la betterave maritime est présente pourrait être à l'origine d'une hybridation entre des individus sauvages et des individus cultivés. Dans ce cas, on ne peut exclure une présence potentielle du transgène chez des descendants hybrides sauvages.

⑦ DIVERSITÉ VARIÉTALE CHEZ LE PIMENT ET RÉSISTANCE AUX MALADIES

Raisonner

Réponses attendues :

1. La variété sensible joue le rôle de témoin. Les variétés résistantes à l'infection finissent malgré tout par être malades : la résistance n'est pas totale. De la même façon, les plantes résistantes à la migration du virus, finissent par être malades également. En revanche dans ces deux cas de résistance, le pourcentage de plantes n'atteint les 100 % que 25 jours après l'inoculation (contre 10 jours pour le témoin sensible). Les variétés possédant les deux résistances ne comptent que 10 % d'individus malades 25 jours après inoculation. Les deux résistances semblent donc complémentaires l'une de l'autre.

2. Il est possible d'obtenir des variétés présentant les deux résistances en croisant une variété possédant une résistance à la migration avec une autre variété possédant une résistance à l'infection. Il est alors nécessaire de sélectionner dans la descendance de ces croisements les individus possédant simultanément les caractéristiques recherchées (les deux résistances).

Objectif bac

[p. 258-259 du manuel]

① LES VARIATIONS DU FLUX ET DU GRADIENT GÉOTHERMIQUES

La phrase introductive du sujet suggère que les contextes géodynamiques à traiter sont en domaine continental, là où l'exploitation de l'énergie géothermique est possible. L'étude des dorsales, lieu d'un fort flux géothermique n'est donc pas attendue.

Parmi les trois contextes géodynamiques cités dans le B0, magmatisme de rifting, de point chaud et de subduction, deux peuvent être choisis et comparés à un bassin sédimentaire (hors rift, type

bassin parisien), dont le gradient géothermique correspond au gradient continental moyen.

Un écueil possible dans ce sujet est la relation simpliste que les élèves seraient tentés de faire entre le flux et le gradient géothermique : les zones de fort flux géothermique ne sont pas partout caractérisées par un fort gradient géothermique. A l'échelle locale, à l'aplomb des zones volcaniques, la température du sol est très élevée : la différence de température entre le sol et les premiers kilomètres est donc faible, autrement dit, le gradient géothermique est faible. Néanmoins, à proximité de ces zones, le sol est à une température moyenne de 10 °C environ, le sous-sol est chaud en raison de la proximité du magma, si bien que le gradient géothermique est très fort.

Deux plans sont possibles, une première possibilité étant de rédiger un paragraphe par contexte géodynamique. Cependant ce premier plan ne permet pas une étude comparée. Ci-dessous figure une deuxième proposition de plan et les notions attendues.

Introduction :

- Énergie géothermique : définition, origine, dissipation en surface, à l'origine d'un gradient et d'un flux géothermiques (à définir).
- Production d'énergie géothermique homogène au sein des enveloppes internes. Or, le gradient géothermique et le flux géothermique émis en surface sont très variables.
- Problématique : comment expliquer ces fortes variations ?

I- Les variations du flux et du gradient géothermiques

Contextes géodynamiques proposés :

- Bassin sédimentaire (ex : bassin parisien et aquitain) : flux et gradient géothermiques moyens (les valeurs 60 mW.m⁻² et 30 °C.km⁻¹ ne sont pas exigibles, mais peuvent constituer un bonus).
- Zones du subduction (Guadeloupe ou Martinique) : près de la côte (près de la fosse, sans l'expliciter à ce stade) flux et gradient faibles, en arrière de la côte (à l'aplomb de l'arc volcanique, sans l'expliciter) flux géothermique fort, le gradient géothermique est lui très variable.
- Zones de point chaud : flux géothermique fort, gradient géothermique variable.
- La synthèse de ces données sur une carte est pertinente et peut être valorisée. Ex : carte simplifiée de la France (avec métropole, Guadeloupe ou Martinique et Réunion), représentant le flux géothermique (avec 3 couleurs différentes : flux faible, moyen et fort) et le gradient géothermique (de 3 types : faible, moyen ou fort).

II- Origine des variations du flux et du gradient géothermiques

Représenter à la même échelle, de façon très simplifiée ces trois contextes, en coupe :

- Bassins sédimentaires : faire apparaître un socle et une couverture sédimentaire, Moho à 30 km, isotherme 1300 °C à 150 km, absence de magmatisme.
- Magmatisme de point chaud : faire apparaître un panache mantellique ascendant sous la lithosphère, la fusion de roches mantelliques et crustales et le volcanisme en surface. Le gradient géothermique est faible sous les roches volcaniques (les températures sont très élevées de la surface à la profondeur) et fort à proximité des roches volcaniques (la température du sol étant

proche de la normale et celle du sous-sol élevée, en raison de la présence du magma en profondeur)

- Magmatisme de subduction : faire figurer le plongement de la lithosphère océanique, la fusion partielle du manteau lithosphérique et l'ascension du magma générant le volcanisme en surface (l'origine de la fusion partielle n'est pas attendue). Situer à l'aplomb de l'arc volcanique, le fort flux, en avant de l'arc, vers la fosse, le faible flux géothermique. Le gradient géothermique est faible sous les roches volcaniques et fort à proximité des roches volcaniques, pour les mêmes raisons évoquées dans le cas du magmatisme de point chaud.

Conclusion :

- Synthèse des données
- Ouverture sur les utilisations possibles de l'énergie géothermique (chauffage collectif, électricité), en fonction de la température des fluides prélevés.

② LES MODIFICATIONS DE LA BIODIVERSITÉ CULTIVÉE

Introduction :

- Aux origines de l'agriculture : domestication à partir d'espèces sauvages
- Biodiversité cultivée : définition (espèces, variétés, gènes, éventuellement terroirs ou régions géographiques).
- Quelles actions volontaires ou involontaires de l'Homme ont des impacts (positifs ou négatifs) sur la biodiversité cultivée ?

I- L'homme, acteur de la domestication et de la diversification variétale

- De nombreux événements de domestication dans différentes régions du monde (exemples de foyers de domestication) sont à l'origine des nombreuses espèces cultivées aujourd'hui.
- Selon les besoins régionaux (climat notamment), culturels, nutritionnels ou culturels, l'Homme a exercé une sélection artificielle différente (exemple des maïs) à l'origine d'une grande diversité variétale.

II- L'Homme responsable de l'érosion de la biodiversité cultivée

- La recherche de rendements maximum et de produits agricoles faciles à conserver et à transporter est à l'origine d'une érosion de la biodiversité cultivée (exemple des pommes). Une faible quantité de variétés cultivées est à l'origine de l'essentiel de la production agricole alimentaire. Les variétés qui ne sont pas cultivées sont susceptibles de disparaître.
- Pourtant certaines variétés anciennes possèdent des caractéristiques (résistance aux maladies, qualités nutritionnelles ou gustatives) recherchées par les agronomes, les agriculteurs ou les consommateurs (exemple des pommes).

III- Mise en valeur et utilisation moderne de la biodiversité cultivée

- Les espèces présentant des caractères intéressants peuvent être croisées entre elles. Avec de nombreux croisements suivis de sélection (schéma des croisements), les sélectionneurs obtiennent des variétés présentant une combinaison des caractères recherchés. La biodiversité cultivée peut donc être vue comme un réservoir de caractères permettant de produire de nouvelles variétés.

– L’Homme peut utiliser des gènes d’autres espèces pour produire des plantes transgéniques (schéma méthode), contribuant ainsi à la formation de nouvelles variétés présentant un caractère original. Ces OGM sont aujourd’hui controversés.

Conclusion :

- Bilan des idées
- Ouverture sur les conservatoires de biodiversité cultivée (banque de semences, conservatoires génétiques)

③ LA DIVERSITÉ DES MAÏS CULTIVÉS

Réponses attendues :

1b ; 2c ; 3a

③ LE POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DU JAPON

Réponse attendue :

Dans le doc. 1, on constate la présence de nombreux volcans au Japon. Cela explique le fort flux géothermique en surface, atteignant plus 160 mW.m⁻² (doc. 2). Ces deux caractéristiques témoignent de températures élevées en profondeur, ce qui est favorable à une exploitation géothermique. Mais quelle est l’origine de cette forte activité volcanique ?

On constate dans les doc. 1 et 2 une dépression topographique brutale d’environ 8 km, à l’est du Japon, s’accompagnant d’une forte diminution du flux géothermique, atteignant à peine 30 mW.m⁻² (doc. 2). D’autre part, la tomographie sismique (doc. 3) révèle la présence d’une zone d’accélération de la vitesse de propagation des ondes sismiques, située sous le Japon et se poursuivant jusqu’à 2900 km de profondeur. Cela indique la présence d’un matériau solide, anormalement froid. Ces trois caractéristiques nous per-

mettent d’en déduire que la plaque Pacifique plonge sous la plaque Eurasie (doc. 1). L’eau libérée par la déshydratation de cette plaque océanique entraîne la fusion partielle des roches mantelliques sus-jacentes. Il en résulte un magmatisme abondant, au niveau du Japon, à l’origine du fort flux géothermique en surface.

Ainsi, le Japon est caractérisé par un magmatisme de subduction, rendant possible le prélèvement de fluides de températures supérieures à 90 °C, pour la production d’électricité.

BIBLIOGRAPHIE

- *L’origine des blés*, Yves Henry et Jacques de Buyser, Pour la Science, Hors-série n° 26, janvier 2000.
- *De la graine à la plante*, Bibliothèque scientifique, Pour la Science, 2002.
- *La domestication des plantes : de la cueillette à la post-génomique*. J. Jahier et al. Biofutur n° 266, mai 2006.
- *Le regard de la génomique sur la diversité naturelle des plantes cultivées*. J. David et al. Biofutur n° 266, mai 2006.
- *Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées*, Doré C., Quae, 2006.
- *Légumes d’hier et d’aujourd’hui*, Arvy M.-P., Galloin F., Belin, 2007.
- *A la recherche des variétés locales de plantes cultivées*, Guide méthodologique, Marchenay P., disponible en ligne.
- *Amélioration des espèces végétales cultivées*, Gallais A, INRA éditions, 1992.
- *L’essor de la génomique végétale*, Caboche M., Biofutur n° 265, avril 2006.
- *Génie génétique et biotechnologie*, Tourte Y., Dunod, 2002.

THÈME 5 LE MAINTIEN DE L'INTÉGRITÉ DE L'ORGANISME

CHAPITRE 1

La réaction inflammatoire, une manifestation de l'immunité innée

UNITÉ 1

Les caractéristiques de la réaction inflammatoire aigüe

[pp. 268-269 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• Très rapidement mise en œuvre, l'immunité innée est la première à intervenir lors de situations variées (atteintes des tissus, infection, cancer).[...] C'est une première ligne de défense qui agit d'abord seule puis se prolonge pendant toute la réaction immunitaire. • La réaction inflammatoire aigüe en est un mécanisme essentiel. Elle fait suite à l'infection ou à la lésion d'un tissu [et se manifeste par des] symptômes stéréotypés (rougeur, chaleur, gonflement, douleur). • L'immunité innée ne nécessite pas d'apprentissage préalable, est génétiquement héritée et est présente dès la naissance.	• Réaliser des observations macroscopiques ou microscopiques ou utiliser les résultats de ces observations en les combinant avec des informations complémentaires pour : – mettre en évidence les manifestations de la réaction inflammatoire aigüe et le caractère stéréotypé de ses symptômes (doc. 1 et 2) – identifier quelques-uns de ses acteurs cellulaires (doc 4) • Recenser, extraire et exploiter des informations à partir d'images, de textes, de graphiques pour : – caractériser les conditions de déclenchement de la réaction inflammatoire aigüe (doc 3) – démontrer son caractère génétiquement hérité et le fait qu'elle est présente dès la naissance (doc. 5) • Comprendre un protocole expérimental et en saisir l'intérêt dans la perspective de la résolution d'une problématique (doc. 5)

Conseils et suggestions

– L'objectif d'ensemble du chapitre est de préciser les caractéristiques de la réaction inflammatoire à différentes échelles puis d'en décrire les principales étapes et mécanismes. Les unités abordent ainsi successivement la phase d'initiation et d'amplification de la réaction inflammatoire en insistant notamment sur le rôle des médiateurs de l'inflammation. La dernière unité permet enfin d'aborder la phase de résolution de la réaction immunitaire innée et d'envisager une première fois son rôle dans le déclenchement de la réaction adaptative.

– La **page d'ouverture du chapitre** permet, à la suite de la double page « mobiliser ses acquis » de réinvestir les connaissances construites en classe de troisième concernant le risque infectieux et l'intervention de la phagocytose dans l'élimination des agents pathogènes.

– Lors de cette première unité, l'élève est amené à préciser les caractéristiques de la réaction inflammatoire aigüe ce qui permet, en quelque sorte, de planter le décor. Les conditions de déclenchement de la réaction (doc. 3) ainsi que les symptômes macroscopiques sont d'abord décrits (doc. 1 et 2) puis mis en relation et expliquées par des observations (doc. 4) et expérimentations (doc. 5) à l'échelle tissulaire.

– Le programme de troisième proposait déjà une partie de cette caractérisation, mais il s'agit ici de quantifier certains des phé-

nomènes et aussi de les interpréter à l'échelle tissulaire voire cellulaire.

Les activités proposées consistent essentiellement en une analyse synthétique des documents proposés

– La nature des documents proposés permet de montrer aux élèves que, si une observation directe permet en première approche de préciser un certain nombre de symptômes de la réaction inflammatoire (doc. 1 et une partie du doc. 2) des observations indirectes (thermographie du doc. 2) ou à l'aide d'instruments de microscopie optique classique à différentes échelles (doc. 4) permettent de compléter les premiers constats. Une approche par l'expérimentation, avec la technique des fenêtres cutanées ou la recherche d'éventuelles particularités génétiques, permet de compléter l'analyse et de confirmer un certain nombre d'hypothèses émises par les scientifiques (doc. 5).

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (Recenser, extraire et exploiter des informations à partir d'images, de textes, de graphiques.)

Le document 1 permet de mettre en évidence les phénomènes de **gonflement**, de **rougeur** au niveau d'une lésion accidentelle cuta-

(...)

née de la main. La sensation de **douleur** est indiquée dans le texte. Le document 2 présente une plaie d'origine chirurgicale (il s'agit ici d'une opération du genou gauche) observée d'une part en photographie classique (à gauche) et à l'aide d'une caméra infrarouge (thermographie). Ces observations sont complétées par le suivi, par thermographie infrarouge, de la température de cette plaie sur une période de 15 jours. Cette méthode non invasive permet, à l'aide d'une caméra infra-rouge, de suivre l'évolution de la plaie après intervention chirurgicale et de s'assurer de la bonne résolution de l'opération. Le retour à la même température que le reste du corps signe la guérison. L'augmentation de la température au bout de quelques heures permet de montrer le **caractère rapide** de la réaction inflammatoire aigüe, le maintien d'une température élevée pendant plusieurs jours laisse également supposer que la réaction inflammatoire, bien que constituant une première ligne de défense, peut se prolonger pendant toute la réaction immunitaire.

2 DOC. 3 (*Recenser, extraire et exploiter des informations à partir de différentes sources*)

Le document 3 propose quelques exemples d'agents et de situations déclenchant la réaction inflammatoire aigüe. Le document montre la **diversité** des micro-organismes ou structures impliquées. Le texte précise en outre que des lésions tissulaires sans contamination aboutissent au même résultat. Le fait que la présence de cellules cancéreuses puisse également être à l'origine d'une réaction innée n'est pas mentionné ici mais est abordé dans le cadre de l'exercice 2 de la page 318. En dehors de ce dernier cas, les points d'origine de la réaction sont des surfaces de contact avec le milieu extérieur. On trouve également dans le texte l'idée d'une **réaction stéréotypée** quel que soit le processus déclencheur et le fait qu'il s'agit d'une **réaction innée, génétiquement héritée, ne nécessitant pas d'apprentissage préalable et étant présente dès la naissance**. Cette double notion réapparaît à plusieurs reprises dans les différentes unités (voir également l'exercice n° 4 p. 280).

3 DOC. 4 ET 5 (*Réaliser des observations macroscopiques ou microscopiques ou utiliser les résultats de ces observations Recenser, extraire et exploiter des informations. Comprendre un protocole expérimental et en saisir l'intérêt dans la perspective de la résolution d'une problématique*).

La comparaison de la structure tissulaire et cellulaire du derme chez un individu sain et chez un individu contaminé doit permettre d'expliquer en partie les symptômes observés à l'échelle de l'organisme: l'infiltration de plasma explique le gonflement

et la désorganisation de la structure derme/épiderme ainsi que le dégagement de chaleur. On observe également la présence de cellules chez l'individu contaminé. Le document sous rabat permet d'identifier ces cellules comme faisant partie du système immunitaire. Ainsi la cellule présentée en gros plan est un granulocyte.

A l'aide de leurs connaissances de 3^e concernant la localisation des cellules du système immunitaire dans le compartiment sanguin, les élèves doivent pouvoir formuler l'hypothèse d'une migration des cellules immunitaires depuis le compartiment sanguin vers le compartiment tissulaire.

Les caractéristiques des cellules qui affluent sur le site de l'infection sont fournies dans le document sur rabat. On y retrouve également un descriptif des propriétés de ces cellules. Elles expliquent comment elles peuvent participer à la reconnaissance et à l'élimination des agents pathogènes: capacité de migration vers les tissus infectés et réalisation de la phagocytose notamment.

L'expérience des fenêtres cutanées, mise au point par Reebuck, permet de confirmer cette hypothèse. Chez l'individu sain, l'abrasion de la peau provoque une réaction inflammatoire normale qui se manifeste par un afflux de cellules immunitaires depuis le compartiment sanguin. Chez l'individu souffrant d'infections à répétitions (donc contre lesquelles il ne peut lutter) la migration des monocytes et granulocytes ne se réalise pas correctement. Le document 5 peut être utilisé avec les élèves pour discuter de l'intérêt du protocole expérimental mis en œuvre pour la compréhension des mécanismes de l'immunité innée.

L'individu étudié par le biais de l'expérience des fenêtres cutanées et souffrant d'infections à répétition présente un déficit de migration des cellules immunitaires. Ce déficit est dû à l'absence, à la surface de ces cellules, de récepteurs leur permettant d'interagir avec les cellules de la paroi des vaisseaux sanguins du fait de la présence de deux allèles mutés du gène codant pour ces molécules. Il s'ensuit un déficit d'adhésion leucocytaire dont l'origine est génétique. On retrouve ainsi l'idée d'une réaction immunitaire innée, génétiquement héritée.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*).

Les documents et activités proposés doivent donc permettre aux élèves de dresser la liste des principales caractéristiques de la réaction inflammatoire aigüe et plus généralement de la réaction immunitaire innée, telles que décrites dans le bilan de l'unité.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• L'immunité innée repose sur des mécanismes de reconnaissance [...] très conservés au cours de l'évolution. [Elle] met en jeu des molécules à l'origine de symptômes stéréotypés.	• Travailler en autonomie pour recenser, extraire et exploiter des informations à partir de divers types de documents et raisonner avec rigueur pour : – caractériser les cellules sentinelles à l'origine de la reconnaissance des agents pathogènes (doc. 1 et 2) – caractériser les récepteurs qui permettent cette reconnaissance (doc. 6 et atelier « sciences actualités » p321) – caractériser le comportement de ces cellules à la suite de cette reconnaissance (doc. 3) – mettre en évidence la libération des médiateurs de l'inflammation et proposer des hypothèses sur leur rôle (doc. 4 et 5 et encart « vocabulaire ») • Comprendre un protocole expérimental et en saisir l'intérêt dans la perspective de la résolution d'une problématique (doc. 3)

Conseils et suggestions

Cette unité vise dans un premier temps à montrer quels sont les conditions et les acteurs du déclenchement de la réaction inflammatoire aigüe (doc. 1 à 3). Dans un second temps l'objectif est de montrer comment les cellules sentinelles, principaux acteurs de cette initiation, agissent pour recruter les cellules effectrices.

L'étude s'appuie sur des documents obtenus à partir de techniques de microscopie dont les élèves ne disposent pas en classe mais dont ils fréquentent régulièrement les représentations : microscopie électronique en transmission (doc. 4) ou à balayage (doc.2) – avec, dans les deux cas, la possibilité de traitement de l'image par fausses couleurs –, microscopie optique à épifluorescence (doc. 3). Les documents d'observation sont complétés par des données issues de publications concernant le comportement des cellules dendritiques (doc. 3) qui représentent actuellement un champ de recherches particulièrement actif comme en témoigne également l'attribution du prix Nobel de Physiologie et Médecine à Ralph Steinman mentionnée dans l'atelier p. 321. Les résultats d'une seconde étude (doc. 5) permettent également de montrer le rôle des cellules sentinelles dans la production des médiateurs chimiques de l'inflammation. Ces différents documents sont accompagnés par un certain nombre de définitions fournies soit dans le corps de l'unité, soit dans le « dico des sciences » en fin d'ouvrage. De ce fait, les élèves peuvent travailler de façon autonome à la résolution d'une tâche complexe dont l'enjeu est de préciser les acteurs et mécanismes du déclenchement de la réaction inflammatoire aigüe. L'élève construit sa propre démarche, en utilisant les ressources dont il dispose. S'il le souhaite, il peut s'aider des conseils proposés qui constituent une aide procédurale.

– **L'atelier Sciences actualité** (p. 321) constitue un travail complémentaire à cette unité pouvant être associé à une recherche documentaire (B2i). Cet atelier ne traite cependant pas exclusivement ni principalement du rôle des cellules sentinelles

Exploitation des documents par les activités

1 DOC 1 ET 2 (*Travailler en autonomie pour recenser, extraire et exploiter des informations à partir de divers types de documents et raisonner avec rigueur*)

Le document 1 doit amener les élèves à revoir en partie les connaissances construites dans l'unité 1. Il permet en effet de montrer que certaines cellules immunitaires, dont la diversité est précisée dans le texte, sont déjà présentes au niveau des tissus périphériques en l'absence de contamination. Le terme de cellules sentinelles, utilisé dès le départ pour les caractériser indique déjà leur rôle mais l'enjeu, pour les élèves est de préciser la raison de cette appellation.

L'électronographie présentée doit permettre de décrire la morphologie des cellules dendritiques en relevant notamment le nombre très élevé de leurs prolongements cytoplasmiques à mettre en relation avec leurs capacités d'exploration des tissus environnants.

2 DOC 3 (*Travailler en autonomie pour recenser, extraire et exploiter des informations à partir de divers types de documents et raisonner avec rigueur*)

Ce document présente les résultats d'une des très nombreuses études portant sur la caractérisation du comportement des cellules dendritiques. Les 4 clichés obtenus en microscopie optique à épifluorescence montrent comment il est possible, grâce à cette technique, de suivre les déplacements des cellules dendritiques au cours du temps. Une même cellule dendritique du derme de l'oreille d'une souris marquée par un fluorochrome jaune est suivie sur une période de 14 minutes (on distingue également sur le cliché les fibres qui entourent cette cellule). Le déplacement de la cellule, marqué par le trait rouge peut être mesuré à l'aide de logiciels de type MESURIM dont les élèves connaissent le principe. Ce document qui permet de présenter la technique expérimentale utilisée, vient en appui des résultats obtenus grâce à cette tech-

(...)

nique et présentés sous forme graphique. Lorsque la technique est appliquée à un grand nombre de cellules en présence ou en l'absence de contamination expérimentale par un agent pathogène pluricellulaire eucaryote, on constate un changement de comportement des cellules sentinelles : en l'absence de contamination, les cellules se déplacent dans le derme permettant en quelque sorte une surveillance tissulaire (certains auteurs utilisent le terme de patrouille pour désigner ce comportement). Lorsque la contamination survient, les cellules s'immobilisent momentanément au contact de l'agent infectieux assurant ainsi la reconnaissance de celui-ci. L'injection de billes en lieu et place du parasite montre que le déplacement des cellules n'est pas modifié par rapport à une situation sans contamination, ce qui implique que la modification du comportement est spécifique de certains agents extérieurs à l'organisme et qu'elle est conditionnée par la reconnaissance de ces agents. On pose donc ici une première fois l'idée que la réaction innée nécessite une reconnaissance et présente donc une certaine spécificité.

L'article original d'où est tiré le document 3 est disponible en ligne à l'adresse suivante : <http://www.plospathogens.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.ppat.1000222>. De courts enregistrements vidéos illustrant le comportement des cellules dendritiques sont également disponibles (http://www.youtube.com/watch?v=3DXOeRJPIMp&ei=sGTCT_uUlsZhQe1zLSZDg&u sg=AFQjCNE1qopwS3dYqpcf71jnfSZP3LUMnw&cad=rja et http://wn.com/A_dermal_dendrite_cell_containing_multiple_vacuoles_capturing_an_Leishmania_parasite).

3 DOC 4 (*Travailler en autonomie pour recenser, extraire et exploiter des informations à partir de divers types de documents et raisonner avec rigueur*)

Également présents dans les tissus périphériques, les mastocytes interviennent dans les phases d'initiation et d'amplification de la réponse. Ces cellules constituent un modèle simple pour évoquer avec les élèves la libération des médiateurs chimiques de l'inflammation. Les deux électrographies présentées (dont la première a été traitée à l'aide de fausses couleurs pour mettre en évidence le noyau et les vésicules de sécrétions) permettent de montrer la modification de structure que subit la cellule à la suite de la reconnaissance du pathogène et d'illustrer le phénomène de dégranulation des mastocytes. Les indications chiffrées fournies dans le texte permettent de montrer que cette dégranulation aboutit à la libération d'histamine et de TNF. Ces deux molécules ont été retenues pour illustrer la notion de médiateurs chimiques. Elles apparaissent dans la suite du chapitre pour les effets qu'elles ont sur le recrutement cellulaire et la vasodilatation (voir unité 3, doc. 1 et 3).

La revue « L'immunité innée : des mécanismes de défense ancestraux aux maladies inflammatoires », disponible sur le site <http://www.cri-net.com/>, est un outil très synthétique permettant de comprendre le rôle des mastocytes ainsi que d'autres acteurs dans la réponse innée.

4 DOC 5 (*Travailler en autonomie pour recenser, extraire et*

exploiter des informations à partir de divers types de documents et raisonner avec rigueur)

Ce document permet de préciser les conditions de libération des médiateurs chimiques (ici le TNF) par les cellules sentinelles (ici les macrophages tissulaires). Il est donc très complémentaire des documents 4 et 6. On montre que la libération de TNF se fait au bout d'une dizaine d'heures lorsque les cellules sont cultivées en présence du virus de l'herpès et à condition que la cellule n'ait pas subi de mutation sur les gènes codant pour les récepteurs de l'immunité innée. On confirme ici l'importance de la reconnaissance déjà évoquée pour le document 3.

5 DOC 6 Le texte proposé permet de préciser la notion de récepteurs de l'immunité innée portés par les cellules sentinelles à l'origine de la reconnaissance des agents pathogènes et des signaux de danger. Ces récepteurs présentent une spécificité large permettant la reconnaissance de marqueurs présents chez de nombreux pathogènes différents (Lipopolysaccharide bactérien, mannoprotéines de la paroi des mycètes, Acides nucléiques viraux). Les motifs reconnus sont appelés PAMP (Pathogen Associated Molecular Pattern), le terme de PRR (Pattern Recognition Receptors) désignant les récepteurs associés. L'archétype de ces récepteurs est le récepteur Toll mis en évidence chez la Drosophile et ayant valu le prix Nobel de Physiologie et de Médecine au Français Jules Hoffmann en 2011 (voir l'atelier « sciences actualités » de la page 321). La présence de récepteurs de type Toll chez de très nombreux organismes permet de préciser la notion de conservation évolutive des mécanismes de la réponse immunitaire innée.

La structure des récepteurs Toll et de leurs interactions avec les molécules portées par les agents pathogènes est disponible sous forme de fichiers PDB, consultables grâce à l'application RASTOP. Des vidéos d'illustrations sont également disponibles en ligne pour les TLR3 (<http://www.youtube.com/watch?v=qT6PVR5MNE>) et TLR4 (http://www.youtube.com/watch?v=t_0pt7QIE2U)

6 TÂCHE COMPLEXE. Grâce à l'étude des différents documents et à la mise en relation des informations, les élèves sont amenés à caractériser les cellules sentinelles (cellules dendritiques, macrophages tissulaires, mastocytes) : pourvues de récepteurs de l'immunité innée susceptibles de reconnaître de nombreux agents pathogènes et signaux de danger, ces cellules voient leur comportement changer à la suite de cette reconnaissance. Elles peuvent s'immobiliser momentanément, cesser d'émettre de nouveaux prolongements cellulaires, subir une maturation dans le cas des cellules dendritiques et libérer un certain nombre de substances qualifiées de médiateurs de l'inflammation. Le rôle de ces substances n'est pas encore accessible aux élèves à ce stade de l'étude mais ils peuvent émettre des hypothèses dans la mesure où il leur est précisé que ces molécules peuvent agir sur d'autres agents immunitaires et déclencher la réaction immunitaire innée. L'action précise de ces médiateurs fait l'objet de l'unité suivante.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• L'immunité innée repose sur des mécanismes [...] d'action très conservés au cours de l'évolution. [Elle] met en jeu des molécules à l'origine de symptômes stéréotypés.	• Recenser, extraire et organiser des informations à partir de documents de différentes natures (données graphiques, observations microscopiques, schémas de synthèse) et raisonner avec rigueur pour : – expliquer à l'échelle microscopique la migration des cellules immunitaires lors de la réaction inflammatoire aiguë (doc. 2 et 4) – démontrer le rôle des médiateurs de l'inflammation dans la mise en place des symptômes de la réaction inflammatoire aiguë (doc. 1, 3 et 4) • Comprendre un protocole expérimental et en saisir l'intérêt dans la perspective de la résolution d'une problématique (doc. 1) • Recenser, extraire et organiser des informations à partir de documents de différentes natures (données graphiques, observations microscopiques, schémas de synthèse) et raisonner avec rigueur pour : – comprendre les enjeux de société liés aux maladies inflammatoires chroniques (doc. 5) – comprendre le rôle des médiateurs de l'inflammation dans ces pathologies et les principes d'action de quelques médicaments anti-inflammatoires (doc. 6 et 7) • Manifester de l'intérêt pour les enjeux de santé publique, manifester curiosité et esprit critique pour comprendre l'intérêt des études cliniques et la nature provisoire du savoir scientifique (doc. 8)

Conseils et suggestions

- L'unité précédente a permis de montrer que le contact entre agents pathogènes ou signaux de danger et cellules sentinelles aboutit à la production, par ces dernières, de substances appelées médiateurs chimiques de l'inflammation. L'unité 3 doit permettre de comprendre le rôle de ces médiateurs dans l'amplification de la réponse immunitaire innée. Les exemples du TNF et de l'histamine déjà présentés dans l'unité précédente sont détaillés ici.
- Les documents proposés (électronographies, résultats expérimentaux et schéma de synthèse concernant les mécanismes de la diapédèse) doivent permettre aux élèves de comprendre le rôle des médiateurs de l'inflammation sur deux aspects principaux de la réponse déjà mis en évidence dans la première unité : recrutement des cellules sur le lieu de l'infection et afflux de plasma. Il s'agit donc bien ici d'adopter une démarche explicative par rapport aux constats faits dans cette première unité.
- La seconde partie de l'unité traite d'un dérèglement de la réaction immunitaire innée avec le cas des maladies inflammatoires chroniques. Deux exemples de maladies sont présentés de façon succincte (polyarthrite rhumatoïde et maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (MICI). Ces pathologies sont abordées aux différentes échelles, depuis l'échelle de la population (doc. 5 et 8) jusqu'à l'échelle cellulaire ou moléculaire (doc. 6 et 7) en passant par l'échelle de l'organisme (doc. 7).

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Comprendre un protocole expérimental et en saisir l'intérêt dans la perspective de la résolution d'une problématique.*

Extraire et mettre en relation des informations pour formuler une explication).

L'unité 1 avait permis de montrer que le site infecté faisait l'objet d'un afflux de liquide sanguin. Le document 1 permet d'en expliquer l'origine. Les déplacements de plasma sont suivis grâce à un marqueur fluorescent injecté dans la circulation. Lorsque l'injection du marqueur est suivie de l'injection d'histamine dans un tissu (ici le muscle), on constate une augmentation de la fluorescence dans le tissu entourant les vaisseaux sanguins. Le marqueur n'étant présent initialement que dans la circulation, cette augmentation ne peut s'expliquer que par un déplacement de liquide du compartiment sanguin vers les tissus adjacents.

2 DOC. 2 À 4 (*Recenser, extraire et organiser des informations à partir de documents de différentes natures et raisonner avec rigueur*)

L'unité 1 démontrait également un déplacement de cellules immunitaires vers les sites contaminés. Les documents 2, 3 et 4 permettent d'interpréter ces déplacements. Le document 2 permet l'observation du phénomène de diapédèse dans le cas d'un granulocyte. Sur le cliché du haut, la cellule est localisée intégralement dans le compartiment sanguin à proximité de la paroi du vaisseau. Sur le cliché du bas, la cellule s'insère entre deux cellules endothéliales migrant ainsi en direction du tissu contaminé. Cette migration est possible à la condition que la cellule puisse reconnaître des signaux de déplacement. C'est ce que montrent les deux autres documents. Le document 4 précise certaines des étapes de la migration (roulement, adhésion, passage à travers la

(...)

paroi, étapes auxquelles il conviendrait d'ajouter la migration dans les tissus). L'étape d'adhésion requiert la présence, sur la paroi des vaisseaux de différents types de molécules d'adhésion reconnues par les cellules immunitaires grâce aux récepteurs correspondants. On cite ici l'exemple des sélectines mais d'autres molécules interviennent également. Le document complète ces informations en démontrant que le TNF, produit par les cellules sentinelles, induit une surexpression de ces molécules, donc une augmentation du phénomène d'adhésion et de diapédèse et un recrutement des cellules immunitaires sur le site de l'infection. Ce recrutement est renforcé par des facteurs diffusibles tels que l'IL8 (non démontré ici) qui agissent sur le déplacement des cellules dans les tissus contaminés. Le syndrome de Déficit d'Adhérence Leucocytaire mentionné dans le document 5 de l'unité 1 correspond à un déficit de reconnaissance au moment de la diapédèse. L'ouvrage «Cas cliniques en Immunologie», (Rosen et Geha, éditions de Boeck) présente le déficit d'adhérence leucocytaire de façon plus complète. Il existe également un certain nombre de vidéos en ligne illustrant le phénomène de diapédèse, notamment «Inner life of the cell» de l'université de Harvard qui développe un ensemble de phénomènes moléculaires associés à la diapédèse (<http://www.youtube.com/watch?v=yKW4F0Nu-UY>).

3 DOC. 5 À 8 (*Manifester de l'intérêt pour les enjeux de santé publique, manifester curiosité et esprit critique pour comprendre l'intérêt des études cliniques et la nature provisoire du savoir scientifique. Recenser, extraire et organiser des informations à partir de documents de différentes natures et raisonner avec rigueur*)

Les maladies inflammatoires chroniques sont l'occasion, avec les élèves, d'aborder un problème de santé publique non seulement sous l'angle de la biologie (avec les mécanismes et les traitements envisagés) mais aussi de la clinique et de l'épidémiologie. C'est ce par quoi débute cette sous-unité (Doc. 5) en apportant un certain nombre d'informations sur la polyarthrite rhumatoïde et les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (voir sur ce dernier point le site de l'INSERM: <http://www.inserm.fr/thematiques/circulation-metabolisme-nutrition/dossiers-d-information/les-maladies-inflammatoires-chroniques-de-l-intestin-mici>). C'est l'occasion de faire la différence entre inflammation aiguë et chronique et de montrer aux élèves que l'on peut traiter une maladie sans forcément en connaître toutes les causes. On aborde ici la notion de traitement symptomatique. Trois principaux types de traitements sont actuellement utilisés dans le traitement de ces maladies :

Anti-inflammatoires stéroïdiens (non développés ici) : il s'agit de cortico-stéroïdes de synthèse. Considérés comme les plus puissants anti-inflammatoires, ils ont cependant de nombreux effets secondaires dans le cas de traitements sur le long terme (atteintes sur le tractus digestif, sur le système immunitaire...).

Anti-inflammatoire non stéroïdiens (doc. 6) : On y trouve de nombreuses molécules de la famille de l'aspirine (dérivés salicylés) ou de l'Ibuprofène (dérivés propioniques); leur mode d'action n'est pas totalement élucidé. L'efficacité de ces molécules serait due à leur effet inhibiteur sur l'enzyme Cyclo Oxygénase (COX)

promoteur de la synthèse des prostaglandines, molécules ayant de très nombreuses fonctions et intervenant notamment en tant que médiateurs de l'inflammation. Il existe en fait au moins deux types d'enzymes COX (COX1 enzyme tissulaire constitutive et COX2 enzyme inductible spécifiquement activée dans les cellules immunitaires) ciblées de façon plus ou moins spécifique par les anti-inflammatoires non stéroïdiens. La mise au point d'anti-inflammatoires dirigés spécifiquement contre l'enzyme COX2 est en cours d'étude. Elle permettrait théoriquement de limiter certains effets secondaires notamment au niveau du tractus digestif.

Anticorps dirigés contre les médiateurs de l'inflammation (doc. 7). Il s'agit de traitements ciblant spécifiquement les médiateurs de l'inflammation impliqués dans l'inflammation chronique. C'est notamment le cas du TNF- dont la surexpression a été associée aux pathologies de type polyarthrite rhumatoïde. Le succès du traitement est ici mesuré à partir de deux des symptômes majeurs de l'inflammation chronique : le nombre d'articulations touchées par l'inflammation et la douleur ressentie par le patient (dans ce cas, on se base sur une échelle subjective sur laquelle on demande au patient de situer sa sensation). Les résultats obtenus montrent un effet très net de l'anticorps par rapport au placebo, tant sur le nombre d'articulations affectées que sur l'intensité de la douleur. On pourra voir, sur ce point, le site commercial d'informations <http://www.lesantitnf.fr/>, propriétés des laboratoires pharmaceutiques Abbott France et celui de la Société Française de Rhumatologie (<http://sfr.larhumatologie.fr>). Ce peut-être l'occasion d'aborder, avec les élèves, la recherche d'informations et la nécessité d'identification et de recoupement des sources.

Le document 8 propose d'élargir la question du traitement de maladies inflammatoires chroniques en considérant, sur la durée, l'efficacité des traitements par des anti-inflammatoires non stéroïdiens, dans le cas des maladies inflammatoires chroniques de l'intestin. Cette approche épidémiologique permet de montrer que, pour une pathologie donnée, le même traitement ne donnera pas forcément les mêmes résultats chez tous les patients (depuis une réponse complète jusqu'à l'absence de totale de réponse au traitement). En outre, on montre que les réponses peuvent évoluer au cours du temps, avec, dans ce cas précis, une augmentation sensible du nombre de patient ne répondant pas du tout ou répondant partiellement. L'enjeu de ce document est donc de montrer aux élèves que la connaissance des mécanismes biologiques d'une pathologie ne suffit pas toujours à la mise au point d'un traitement efficace. L'efficacité dépend largement de facteurs propres à chaque patient (facteurs génétiques ou environnementaux) sur lesquels les chercheurs ou les médecins n'ont pas toujours prise.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Les médiateurs de l'inflammation, produits par les cellules sentinelles permettent d'expliquer les phénomènes observés lors de l'inflammation : afflux de liquide et recrutement de cellules immunitaires sur les sites infectieux. Les mêmes médiateurs sont impliqués dans les mécanismes de l'inflammation chronique. L'action sur ces médiateurs de façon spécifique ou non permet donc de lutter contre les symptômes de ces pathologies.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• L'immunité innée ne nécessite pas d'apprentissage préalable [...] et est présente dès la naissance. Elle repose sur des mécanismes [...] d'action très conservés au cours de l'évolution. • C'est une première ligne de défense qui agit d'abord seule puis se prolonge pendant toute la réaction immunitaire. • Elle prépare le déclenchement de l'immunité adaptative.	• Utiliser le résultat de différents types d'observations microscopiques pour : – caractériser les cellules phagocytaires (doc. 1 et 2) – décrypter les principales étapes et conséquences de la phagocytose (doc. 3) – démontrer le caractère évolutivement conservé de ce phénomène et le fait qu'il ne nécessite pas d'apprentissage préalable (doc. 4) • Mettre en relation des protocoles et des résultats expérimentaux avec des informations bibliographiques, raisonner avec rigueur pour : – comprendre le rôle de la phagocytose dans la résolution de la contamination (doc. 3 et 5) – envisager le rôle de l'immunité innée dans le déclenchement de la réaction adaptative (doc. 5 à 7)

Conseils et suggestions

– Après avoir envisagé les phases d'initiation et d'amplification de la réaction inflammatoire, il s'agit, dans l'unité 4, d'en décrire l'issue, en insistant particulièrement sur le rôle et les mécanismes de la phagocytose (doc. 1 à 4) et de poser quelques jalons concernant le rôle de la réaction innée dans le déclenchement de la réaction adaptative (doc. 5 à 7).

– Les documents proposés relèvent pour la première partie, des techniques d'observation microscopique (microscopie électronique en transmission, microscopie optique à épifluorescence ou microscopie à contraste de phase). Dans tous les cas de figure, on vise une approche dynamique des phénomènes observés, comme par exemple avec les clichés sériés du document 3.

Dans la seconde partie, une approche résolument expérimentale permet de suivre l'évolution des cellules dendritiques, archétypes des cellules sentinelles, déjà citées précédemment, à la suite de la réaction innée et d'aborder ainsi leur futur rôle de cellules présentatrices professionnelles de l'antigène. Cette étude est complétée par l'unité 4 du chapitre suivant (voir page 290 du manuel de l'élève). Les différents documents permettent également de revenir sur certaines des caractéristiques générales de la réaction immunitaire rapide: le fait qu'elle ne nécessite pas d'apprentissage préalable (doc. 4) comme déjà mentionné dans l'unité 1; le fait qu'elles soient présentes chez de très nombreux organismes, qu'ils s'agissent des mammifères (la Souris et l'Homme servent de modèle dans de nombreux exemples des unités précédentes) ou des poissons-zèbre (doc. 4). Ce point particulier est également abordé dans l'exercice n° 5 de la page 281 du manuel de l'élève qui reprend les observations historiques d'Ilya Metchnikov réalisées chez les Amphibiens.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 À 3 (Utiliser le résultat de différents types d'observations microscopiques pour raisonner).

Les documents 1 et 2, montrent l'ultrastructure des macrophages en insistant notamment sur la présence des lysosomes et sur leur contenu (doc.1). Le caractère déformable de la membrane de ces cellules au contact d'éléments étrangers à la cellule est mis en évidence avec le document 2.

Le document 3 permet de reconstituer les étapes de la phagocytose en repositionnant les éléments présents dans la cellule et en démontrant leurs relations. Les marquages utilisés permettent de mettre en évidence la déformation de la membrane de la cellule pour englober l'élément étranger (ici des levures) puis les événements successifs de la phagocytose. Dans un premier temps, même englobées à l'intérieur des cellules dans les phagosomes, les levures fluorescent en rouge. Mais au bout de 15 minutes, la fluorescence des levures devient jaune, ce qui traduit la fusion entre phagosomes (rouges) et lysosomes (vert). On confirme ainsi par l'observation, les informations apportées dans le texte des deux précédents clichés. La toxicité des substances contenues dans les lysosomes explique l'élimination des agents pathogènes. Il existe de très nombreuses vidéos et animations disponibles sur internet concernant le phénomène phagocytaire qui peuvent être exploitées avec les élèves.

2 DOC. 4 (S'informer à partir de documents de microscopie et d'un texte). Le document 4 montre une figure de phagocytose classique observée au microscope à contraste de phase. Il est important de souligner le fait que cette observation est réalisée chez un embryon de poisson-zèbre n'ayant jamais été en contact avec les bactéries contaminantes. On peut donc en conclure que la réaction de phagocytose peut se dérouler dès la première rencontre avec l'agent pathogène et ne nécessite pas d'apprentissage préalable, comme cela avait déjà été indiqué dans le document 5 de l'unité 1 (expérience des fenêtres cutanées chez un nouveau-né).

Ce document offre un exemple d'observation des mécanismes de l'immunité innée en dehors du groupe des Mammifères. Il est

(...)

aussi question des Insectes dans l'atelier Science Actualités p. 321 ou dans l'exercice n° 7 p. 282. Ces observations suggèrent que l'immunité innée, contrairement à l'immunité adaptative est présente chez la plupart des organismes animaux où elle possède des mécanismes conservés.

3 DOC. 5 À 7 (*Extraire et organiser des informations à partir de documents de différentes natures. Comprendre la conception et l'intérêt d'un protocole expérimental dans la perspective de la résolution d'une problématique*).

On aborde ici les prolongements de la réponse innée. Le document 5 précise que la phagocytose par certaines cellules, notamment les cellules dendritiques, ne détruit pas totalement les agents infectieux mais en conserve certains fragments. Ce même document présente également l'association de ces fragments avec les molécules du Complexe Majeur d'Histocompatibilité (CMH). L'ultrastructure cellulaire et les mécanismes de la traduction protéique au sein de la cellule n'étant pas abordés dans les niveaux de classe précédents, la représentation retenue est volontairement très simpliste. Elle vise simplement à montrer que des éléments d'origine étrangère, issus de la dégradation au cours de la phagocytose, peuvent être associés avec des molécules synthétisées par la cellule elle-même et présentées à la surface de la cellule.

Les documents 6 et 7 visent à préciser le contexte de cette initiation de la réponse adaptative. Le document 6 permet de localiser les ganglions lymphatiques et notamment les ganglions poplités et inguinaux qui sont mentionnés dans l'expérience du document 7. Ce document est complémentaire du document sous rabat en début d'ouvrage qui présente les organes lymphoïdes. L'expérience

consiste à réinjecter chez une souris des cellules dendritiques préalablement activées par contact avec un agent bactérien. Ces cellules se comportent donc comme elles le feraient à l'issue de la réaction inflammatoire. Le graphique permet aux élèves de montrer que les cellules dendritiques se déplacent en direction du ganglion lymphatique le plus proche de l'endroit où elles ont été injectées (ganglion poplité pour une injection au niveau du pied, ganglion inguinal pour une injection au niveau de la cuisse). En extrapolant au cas de la réaction inflammatoire naturelle, on pourra postuler que les cellules dendritiques, à la suite de la phagocytose et de la digestion partielle des éléments pathogènes, se déplacent en direction des ganglions lymphatiques les plus proches de l'infection pour déclencher la réponse adaptative. Si les mécanismes de ce déclenchement ne sont pas accessibles aux élèves à l'issue de ce chapitre, on prépare en revanche l'étude de la présentation de l'antigène par des cellules spécialisées ou non dans cette fonction telle qu'abordée dans l'unité 4 du chapitre 2 (doc. 1 et 2 p. 290 du manuel de l'élève).

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Après la phase de reconnaissance initiale, et de recrutement de cellules sur le site de l'infection, la phagocytose permet soit l'élimination de l'agent infectieux par destruction totale, soit la dégradation partielle et la présentation, à la surface de la cellule phagocytaire, de fragments du pathogène en association avec les molécules du CMH. Dans ce dernier cas, les cellules peuvent se déplacer vers les ganglions lymphatiques les plus proches où elles participent au déclenchement de la réponse adaptative.

CHAPITRE 2 L'immunité adaptative

UNITÉ 1 La réponse adaptative humorale

[pp. 284-285 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« L'immunité adaptative s'ajoute à l'immunité innée et assure une action plus spécifique contre des molécules, ou partie de molécules. [...] - On insistera sur la réponse adaptative à médiation humorale. »	- Recenser, extraire et exploiter des informations, y compris expérimentales, sur les cellules et les molécules intervenant dans l'immunité adaptative (doc. 1 à 5). - Concevoir et réaliser une expérience permettant de caractériser la spécificité des molécules intervenant dans l'immunité adaptative (doc. 5). - Concevoir et réaliser des expériences permettant de mettre en évidence les immunoglobulines lors de la réaction immunitaire (doc. 2).

Conseils et suggestions

– La **page d'ouverture du chapitre** peut être utilisée pour rappeler que la dernière étape de la réaction inflammatoire peut correspondre à l'initiation de la réponse adaptative, grâce à la

migration de cellules dendritiques dans un ganglion lymphatique et l'activation de nouvelles cellules, les lymphocytes. Ceci permet donc de faire une transition entre les chapitres 1 et 2, et de poser

de nouvelles questions : comment sont formés ces lymphocytes ? Comment vont-ils agir dans la lutte contre l'infection ?

– L'objectif de ce chapitre est de comprendre comment le système immunitaire peut lutter de façon spécifique contre des molécules variées de pathogènes, par une réponse dite adaptative, et ceci en collaboration avec la réponse innée vue dans le chapitre précédent.

– Lors de cette première unité, l'élève est amené à caractériser la réponse adaptative à travers l'étude des anticorps, ce qui lui permet de mettre en évidence des différences avec la réponse innée précédemment étudiée : délai d'apparition de la réponse, spécificité pour les molécules reconnues. L'idée de fixation spécifique des anticorps à leur antigène est reprise et complétée par la notion d'affinité dans l'exercice 3 p. 319, ce qui est l'occasion de découvrir le phénomène de maturation d'affinité au cours d'une infection.

– L'exemple de pathogène pris ici est, conformément au programme, celui du virus de la grippe.

– La méthode de double diffusion en gel d'Ouchterlony peut, entre autres, être utilisée pour détecter la présence d'anticorps spécifiques dans un sérum (mais aussi pour comparer des déterminants antigéniques), ce qui nous permet ici de mettre en évidence le caractère spécifique de la réponse immunitaire adaptative. Le protocole complet de cette méthode est disponible sur le site de Jussieu (<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/ATP/immu2.htm>) et des kits complets sont disponibles chez les fournisseurs habituels (à noter, l'existence d'un kit avec produits de substitution, facilement conservables, qui permettent d'obtenir le résultat attendu sans véritables sérums et antigènes).

– La détection des gamma-globulines (dont les anticorps font partie) par électrophorèse permet d'associer la présence de ces molécules à une infection. C'est ce principe qui est utilisé dans le **sujet d'évaluation des compétences expérimentales** proposé p. 362. Il est possible de compléter cette activité par la réalisation d'un profil électrophorétique par analyse densitométrique en utilisant les logiciels téléchargeables gratuitement sur le web, Mesurim et Digispec.

Exploitation des documents par les activités

❶ **DOC. 1 ET 2** (*Manipuler, extraire et mettre en relation des informations pour proposer une hypothèse*). Les anticorps apparaissent suite à une infection (ici par le virus de la grippe), dans un délai de 5 à 6 jours, c'est-à-dire plus lentement que l'apparition de la réponse inflammatoire (moins de 24 h) (**doc. 1**). La comparaison des électrophorèses de sérums d'individu témoin et d'individu 8 jours après injection de molécule étrangère (ou 8 jours après infection par le virus de la grippe) permet d'observer l'augmentation de la quantité des gammaglobulines (**doc. 2**). En corrélant ces informations, on peut proposer que les anticorps sont des protéines du sérum, de la famille des gammaglobulines.

❷ **DOC. 3** (*Extraire des informations*). D'après le schéma et sa légende, les anticorps se fixent sur des molécules accessibles (à la surface de l'agent infectieux), et étrangères à l'organisme.

❸ **DOC. 4 ET 5** (*Manipuler, extraire et mettre en relation des informations pour proposer une explication*). En résultat du test d'Ouchterlony (**doc. 5**), le précipité blanc observé dans la boîte de droite prouve l'existence d'un complexe immun (c'est-à-dire d'une association anticorps-antigènes, **doc. 4**) formé entre l'albumine de bœuf (antigène) et des anticorps contenus dans le sérum du lapin ayant subi au préalable une injection d'albumine de bœuf. La comparaison avec la boîte témoin de gauche montre que ce complexe immun ne peut se former que si le sérum provient d'un individu ayant déjà rencontré l'antigène en question. Ceci suggère de nouveau que les anticorps sont des molécules qui apparaissent suite à l'introduction de molécules étrangères chez un organisme. Par ailleurs, les anticorps se fixent uniquement aux antigènes préalablement rencontrés par l'organisme, et non à des molécules très proches (les autres albumines ici testées) : ceci est la preuve de la spécificité de reconnaissance des anticorps pour leur antigène.

❹ **EN CONCLUSION** (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). La réponse adaptative humorale contre la grippe met en jeu des protéines circulant dans le sérum, les anticorps, qui apparaissent suite à l'infection de l'organisme et qui sont capables de se lier spécifiquement à des antigènes du pathogène. Cette réponse est plus lente que la réponse innée et elle est spécifique de ce virus.

UNITÉ 2 Le mode d'action des anticorps

[pp. 286-287 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « Les défenses adaptatives associées avec les défenses innées permettent normalement d'éliminer la cause du déclenchement de la réaction immunitaire. »	• Recenser, extraire et exploiter des informations, y compris expérimentales, sur les différents modes d'action des anticorps, molécules de l'immunité adaptative.

(...)

Conseils et suggestions

– Cette unité vise à montrer que la spécificité des anticorps pour leur antigène, précédemment mise en évidence, est basée sur leur structure moléculaire, complémentaire à celle de l'antigène au niveau des domaines variables (**doc. 1 à 3**). Dans un second temps, cette unité aborde différents modes d'action des anticorps dans l'élimination de l'agent infectieux (**doc. 4 à 7**) : neutralisation et opsonisation (ce dernier terme n'est pas au programme). Ces modes d'action sont repris dans les **exercices 5** (pour la neutralisation) et **6** (pour l'opsonisation) p. 303 et sont l'occasion d'illustrer la collaboration entre réponse adaptative et réponse innée. L'**exercice 8** p. 304 permet de montrer que les processus décrits dans cette unité ne sont pas exhaustifs, à travers l'exemple de l'activation de la voie classique du complément par les anticorps.

– L'idée de coopération entre immunité innée et immunité adaptative abordée dans cette unité est reprise dans l'atelier « Sciences et actualité » p. 321 grâce à l'étude des travaux de Beutler, Hoffmann et Steinman (prix Nobel de physiologie et médecine 2011).

– La première partie de cette unité s'appuie sur des images de modélisation moléculaire obtenues grâce au logiciel Rastop. Ces images pourront être complétées par une comparaison de séquences de différents anticorps grâce au logiciel Anagène, pour mettre en évidence d'une part l'identité des deux chaînes lourdes entre elles et des deux chaînes légères entre elles, et d'autre part la différence de variabilité entre régions constantes et régions variables au sein d'une même chaîne (résultat donné **doc. 3**). Cette activité est l'occasion de construire un TP autour de l'utilisation de ces deux logiciels. Il est possible de se procurer les séquences peptidiques de différents anticorps anti-grippe sur le **site GenBank** (en anglais) : www.ncbi.nlm.nih.gov/protein. L'alignement des séquences peptidiques et leur comparaison peuvent aussi être effectués en ligne avec le **logiciel ClustalW2** (en anglais) : www.ebi.ac.uk/Tools/msa/clustalw2. Ces deux sources proposent également de travailler sur des séquences nucléotidiques.

– Les fichiers pdb utilisés pour l'obtention des images sur Rastop correspondent à des séquences d'anticorps anti-grippe (plus particulièrement dirigés contre l'hémagglutinine), conformément au programme. Le fichier pdb utilisé pour l'obtention du **doc.2** est 1QFU.pdb, disponible sur le site compagnon ou téléchargeable sur le site du NCBI : <http://www.rcsb.org/pdb/explore.do?structureId=1QFU>. Le logiciel Rastop, gratuit, ainsi qu'un guide d'utilisation, sont disponibles sur le site de l'INRP : <http://www.inrp.fr/Acces/biotic/rastop/accueil.htm>.

– Des données de publications scientifiques (**doc. 4**), des schémas et une observation en microscopie électronique à balayage (**doc. 7**) complètent l'approche pour en comprendre les aspects fonctionnels.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*Utiliser un logiciel de modélisation moléculaire, comparer des images pour extraire des informations*). Un anticorps est une protéine complexe tétramérique possédant plusieurs types de régions (**doc.1**). Elle est notamment composée de deux fragments symétriques (les fragments Fab ; cette nomenclature n'est

pas au programme) capables chacun de fixer un antigène (**doc.2**). Un anticorps peut donc fixer deux antigènes à la fois.

2 DOC. 2 ET 3 (*Extraire et mettre en relation des informations pour formuler une hypothèse explicative*). Un anticorps se fixe à un antigène par un site composé de deux régions variables associées, de structure tridimensionnelle complémentaire à celle d'une partie de l'antigène (**doc.2**). Or, la comparaison des séquences peptidiques de régions variables d'anticorps de spécificité différente montre l'existence de positions particulièrement variables, aussi bien dans les chaînes lourdes que légères (**doc. 3**), qui correspondent aux acides aminés directement en contact avec l'antigène (**doc.2**). La séquence peptidique d'une protéine déterminant sa structure spatiale, on peut émettre l'hypothèse que des anticorps différents présentent des sites de fixation de forme différente, et donc une complémentarité à des antigènes différents. Un anticorps donné ne fixe que l'antigène pour lequel son site de fixation est complémentaire.

3 DOC. 4 ET 5 (*Extraire et mettre en relation des informations pour proposer une explication*). Le virus de la grippe se fixe d'autant moins bien à ses cellules cibles que le milieu de culture contient une grande quantité d'anticorps anti-hémagglutinine. Ce défaut de fixation est corrélé à un défaut d'infection des cellules (**doc. 4**). La fixation du virus sur sa cellule cible est indispensable à l'infection (**doc. 5**). On peut donc émettre l'hypothèse que la perte du pouvoir infectieux du virus en présence des anticorps est causé par un défaut de fixation à la surface de sa cellule cible. Le **doc. 5** montre que l'anticorps reconnaît et se fixe sur le site de fixation de l'hémagglutinine, entrant ainsi en compétition avec la fixation de cette protéine sur son récepteur, situé sur la membrane de la cellule cible. Il permet donc de comprendre comment les anticorps peuvent inhiber la fixation du virus sur la membrane de sa cellule cible et ainsi le neutraliser.

4 DOC. 6 ET 7 (*Extraire des informations pour proposer une explication*). Les anticorps, en établissant des liens entre molécules de l'agent infectieux (par la fixation antigène-anticorps) et les phagocytes (par la liaison anticorps-récepteur de surface) augmentent l'efficacité de la phagocytose (**doc.6**). Lorsque la phagocytose n'est pas possible, les anticorps permettent aux granulocytes (qui possèdent aussi des récepteurs spécifiques de la partie constante (Fc) des anticorps) de se lier à la surface du pathogène ce qui active la destruction de ce dernier par des enzymes (**doc.7**). Dans les deux cas, les anticorps augmentent l'efficacité de cellules intervenant dans l'immunité innée (voir chapitre 1) en leur permettant une action ciblée spécifique contre un agent infectieux donné. Réciproquement, l'intervention de ces cellules phagocytaires permet la réalisation de la phase effectrice de la réponse adaptative : il s'agit donc d'une réelle complémentarité entre ces deux types de réponses immunitaires.

5 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). La structure tridimensionnelle des anticorps, elle-même déterminée par la séquence en acides aminés des 4 chaînes qui les composent, présente entre autres deux sites de fixation spécifiques de l'antigène et un fragment de structure constante d'un anticorps

à un autre. Les deux sites de fixation permettent d'agglutiner les antigènes (complexe immun), ce qui peut faciliter leur élimination, et sont aussi à l'origine d'une neutralisation de certains pathogènes,

par recouvrement en surface. Par ailleurs le fragment constant est reconnu par des cellules phagocytaires qui éliminent efficacement le pathogène lié par l'anticorps.

UNITÉ 3 La réponse adaptative cellulaire

[pp. 288-289 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« L'immunité adaptative s'ajoute à l'immunité innée et assure une action plus spécifique contre des molécules, ou partie de molécules. [...] - Les défenses adaptatives associées avec les défenses innées permettent normalement d'éliminer la cause du déclenchement de la réaction immunitaire. »	- Recenser, extraire et exploiter des informations (graphiques, images, schémas, texte, expérience) pour : - mettre en place le rôle et le mode d'action des lymphocytes T cytotoxiques (doc. 1,2) - mettre en évidence et comprendre l'origine de la spécificité d'action des lymphocytes T cytotoxiques (doc. 3,4)

Conseils et suggestions

- Cette unité a pour but de montrer l'implication de l'immunité cellulaire adaptative dans l'élimination d'un pathogène. Elle permet de montrer les bases cellulaires et moléculaires de l'action des lymphocytes T cytotoxiques et de leur spécificité.
- Cette unité complète les deux unités précédentes qui n'abordaient que l'immunité humorale, en présentant l'immunité cellulaire et son implication dans l'élimination des virus.
- Comme le prescrit le programme, cette unité débute par l'exemple du Virus de la Grippe. Le **Doc 1** permet de faire émerger l'idée d'un lien de cause à effet entre élimination du virus de la Grippe et la présence, par production induite, de la population de lymphocytes T cytotoxique induisant la destruction des cellules infectées par le virus de la Grippe. La suite de l'unité explicite les mécanismes d'action des lymphocytes T cytotoxiques grâce à des images au microscope électronique à transmission et au microscope à fluorescence (**doc 2**). Ces dernières montrent clairement l'existence d'un contact entre le lymphocyte et la cellule infectée et suggèrent que la destruction dépend de molécules produites et libérées par exocytose par le lymphocyte cytotoxique. Les deux derniers documents permettent d'aborder la notion de spécificité d'action.
- La compréhension des mécanismes d'action des LTc est nécessaire à la résolution de **l'exercice 8** du chapitre.
- Un développement possible (hors programme) de cette unité et le rôle que prennent les LTc durant le rejet de greffe. Cet aspect peut faire l'objet d'un exercice.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*extraire des informations d'un document*), Lors de la présence dans un individu du virus de la grippe, à partir de 3 jours après l'infection, commence à apparaître dans les tissus pulmonaires, une population de lymphocytes T, les lymphocytes cytotoxiques, qui sont capables de détruire les cellules infectées par le

virus de la grippe. Entre 3 et 6 jours après l'infection le nombre de ces lymphocytes augmente pour atteindre environ 300.10^3 cellules et conjointement, il est possible de mesurer une diminution de la concentration sanguine en virus qui passe de 5.10^6 à 10^5 UA. Au delà de 6 jours après l'infection, le nombre de ces lymphocytes diminue ainsi que la concentration en virus qui tend à disparaître du sang. La production des lymphocytes T cytotoxiques lors de la réponse antigrippe présente un délai de réponse et est transitoire.

2 DOC. 2 (*extraire des informations pour proposer une chronologie d'action*) Les LTc contiennent des protéines (les perforines) capables de lyser les cellules infectées et des enzymes (granzymes) capables de digérer les protéines.

– Lorsque les LTc ne sont pas fixés à des cellules infectées les différentes protéines sont contenues dans des vésicules réparties uniformément dans le cytoplasme.

– La fixation du LTc à une cellule infectée induit la redistribution des vésicules (granules) sous la membrane plasmique du LTc au niveau de la zone de contact.

– S'ensuit la libération, par exocytose, des perforines et granzymes dans l'espace extracellulaire au niveau de la zone de contact entre LTc et la cellule infectée.

– Les perforines forment des pores dans la membrane plasmique de la cellule infectée. Les granzymes, libérées dans la cellule infectée, induisent sa destruction en digérant les protéines.

– La cellule infectée par le virus est détruite.

3 DOC. 3 (*Analyser des résultats expérimentaux pour extraire des informations et raisonner*) Lorsque les cellules dermiques mises en présence des lymphocytes Tc sont saines, ces derniers n'engendrent aucune lyse des cellules, quel que soit leur provenance. Il s'agit de l'expérience témoin montrant que les LTc n'agissent que sur des cellules infectées. Lorsque les LTc proviennent de souris saines, aucune lyse n'est observée, quelle que soit la provenance des cellules der-

(...)

miques infectées. Ce résultat s'explique par la donnée du **Doc. 1** : les LTc actifs sont produits suite à une infection. Lorsque les cellules dermiques sont infectées par un virus (A ou B), seul les LTc provenant de souris infectées par le même virus (A ou B) sont capables de lyser les cellules infectées. Nous pouvons donc en conclure qu'un organisme, infecté par un virus, produit des LTc capables de détruire spécifiquement les cellules infectées par ce virus.

4 DOC. 4 (*Extraire des informations pour proposer une explication*) Les LTc présentent à leur surface des récepteurs, les récepteurs T ou TCR (T Cell Receptor), capables de se fixer spécifiquement à des protéines membranaires présentes sur toutes les cellules de l'organismes, les molécules du CMH. Ces molécules sont associées aux fragments des différentes protéines (peptides) synthétisés par une cellule, qu'elles présentent ainsi en surface. Lorsque une cellule est infectée par un virus, elle synthétise les protéines virales. Des peptides viraux (antigéniques) sont donc présentés, associés au CMH, à la surface de ces cellules. Les récepteurs T sont

des molécules très spécifiques, capables de ne reconnaître qu'un seul antigène. Dans la circulation sanguine et lymphatique, les LTc possédant un récepteur capable de reconnaître spécifiquement la molécule de CMH associée à un peptide viral (et seulement ceux-ci) se fixent aux cellules infectées. Cette interaction spécifique induit l'exocytose des vésicules contenant perforine et granzyme et, donc, la mort de la cellule infectée. Ces mécanismes moléculaires expliquent la spécificité d'action des lymphocytes Tc démontrée par l'expérience du Doc. 3.

5 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). La réponse immunitaire adaptative cellulaire est une réponse immunitaire spécifique faisant intervenir une catégorie de cellules immunitaires, les Lymphocytes T cytotoxiques. Ils sont capables de détruire spécifiquement les cellules infectées par les virus, comme le virus de la grippe. Leur production par le système immunitaire nécessite un temps de latence. Il s'agit donc d'une réponse **lente** et **spécifique**, ce qui la différencie de la réponse innée.

UNITÉ 4 L'origine des anticorps

[pp. 290-291 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Les défenses adaptatives associées avec les défenses innées permettent normalement d'éliminer la cause du déclenchement de la réaction immunitaire. » « Les cellules de l'immunité adaptative ne deviennent effectrice qu'après une première rencontre avec un antigène grâce aux phénomènes de sélection, d'amplification et de différenciation clonale. »	- Recenser, extraire et exploiter des informations (graphiques, images, schémas, texte) pour : - faire le lien entre immunité innée et adaptative (doc. 1, 2) - mettre en évidence et comprendre le rôle des lymphocytes T auxiliaires dans le déclenchement de la réaction immunitaire adaptative (doc. 2 et 5) - découvrir l'origine des anticorps. (doc. 3, 4 et 5) - Communiquer sous forme de schéma des informations.

Conseils et suggestions

- Cette unité a pour but de mettre en évidence les mécanismes produisant les cellules effectrices du système immunitaire adaptatif humoral, les plasmocytes, produisant les anticorps. Elle a également pour finalité de montrer en quoi les réactions immunitaires innées préparent la mise en route des réactions immunitaires adaptatives. Cette unité permet également de présenter une catégorie de cellules immunitaires fondamentales du système adaptatif, les lymphocytes T4 et ainsi que leur rôle dans le déclenchement de la réaction adaptative humorale. Cette unité permet de comprendre l'origine des effecteurs du système immunitaire adaptatif.
- Dans cette unité, l'exemple choisi est l'activation de la voie humorale et la production de plasmocytes spécifiques. Elle fait donc suite directement aux unités 1 et 2 et indirectement à l'unité 3. La synthèse mettant en place la sélection clonale sera réalisée dans l'unité 5.
- La compréhension des mécanismes de production des plasmocytes est nécessaire à la résolution de plusieurs exercices proposés, comme les **exercices 4, 5 et 7** du chapitre. Les notions abordées permettent également la réalisation des **exercices 2 et 3** page 318.

Exploitation des documents par les activités

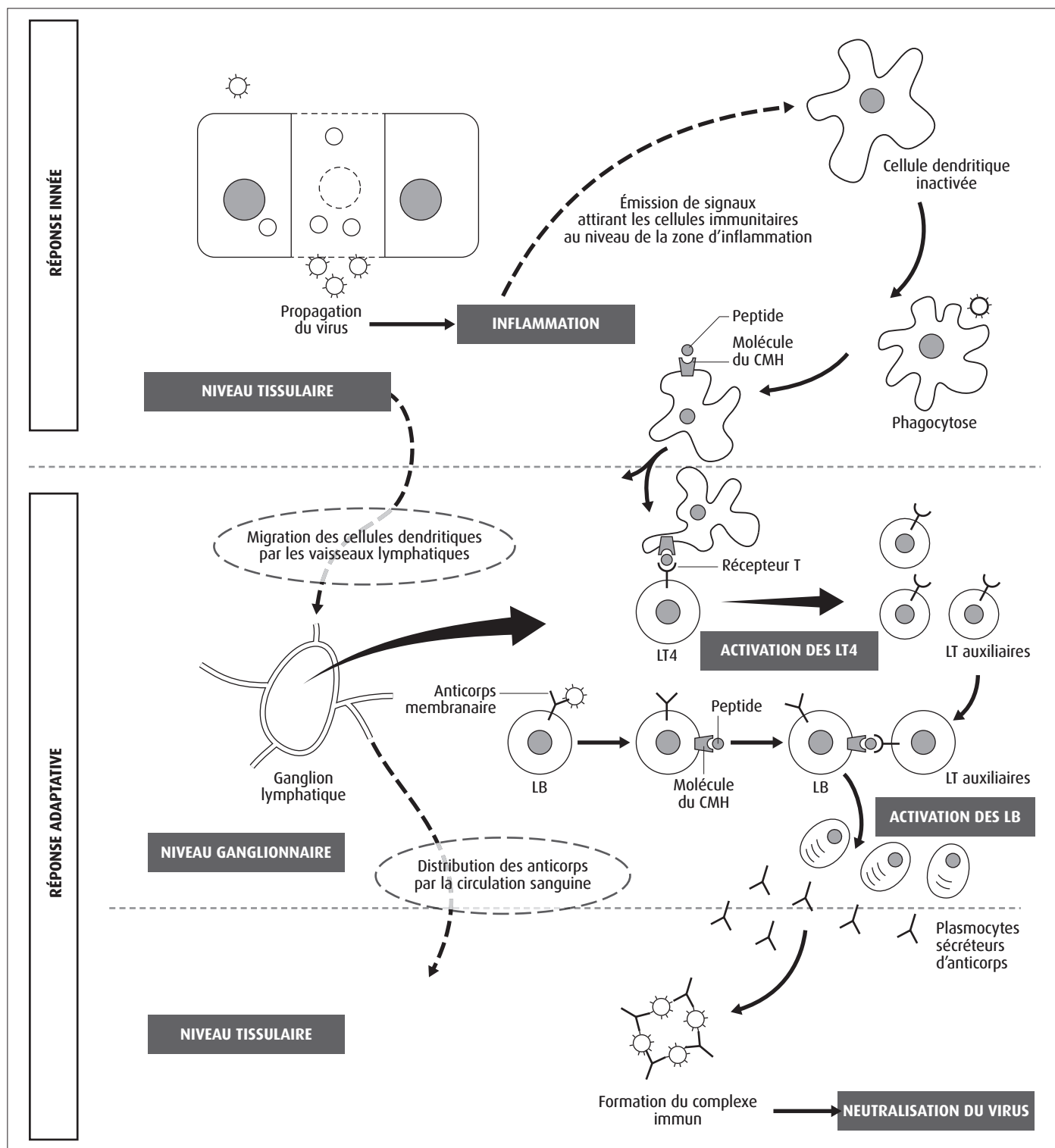
(*Extraire des informations à partir d'observations et de documents, organiser ces informations, communiquer à l'aide d'un schéma*)

Le **DOC. 1** présente l'interaction entre une cellule dendritique et un lymphocyte T au niveau d'un ganglion lymphatique, lieu du déclenchement de la réaction immunitaire adaptative. Cette suite d'image, montre bien la fixation du lymphocyte à la cellule dendritique. Le commentaire des images permet de replacer ce phénomène dans le prolongement de la réponse immunitaire innée (p. 275 du manuel). Ces cellules jouent le rôle de cellules présentatrices de l'antigène aux cellules de l'immunité adaptative. L'interaction entre lymphocytes T et cellules dendritiques fait intervenir les molécules du CMH présentant des peptides antigéniques au niveau des cellules dendritiques (doc. 2). Peptides et CMH sont reconnus par des lymphocytes T CD4 (LT4) naïfs, c'est-à-dire n'ayant jamais rencontré le déterminant antigène pour lequel ils sont spécifiques. Cette interaction et la production de molécules, les interleukines, induisent l'activation des LT4, leur prolifération et leur différenciation en cellules effectrices : les lymphocytes T

auxiliaires, présentant la même spécificité de reconnaissance que le lymphocyte naïf de départ.

Le doc. 3 permet de comparer l'organisation d'un plasmocyte, cellule différenciée sécrétant des anticorps, et un lymphocyte B, cellule immunitaire, produisant et présentant à sa surface des anticorps d'une spécificité donnée. Ce document permet également de présenter les caractéristiques d'une cellule sécrétrice de protéines. L'analyse des doc. 4 et 5 permet de comprendre l'origine des plasmocytes : la différenciation d'un Lymphocyte B. Lorsqu'un

LB interagit avec un antigène par l'intermédiaire de son anticorps membranaire, il va devenir une cellule présentatrice d'antigène et pouvoir se lier à un lymphocyte T auxiliaire spécifique du déterminant antigénique reconnu par le récepteur B, par liaison CMH-peptide et Récepteur T. Cette interaction induit la libération de molécules. L'association des deux mécanismes permet l'activation, la prolifération et la différenciation du lymphocyte B en plasmocyte sécrétant. Les anticorps produits ont la même spécificité que le récepteur B du lymphocyte B ayant interagit avec le LT auxiliaire.



Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Les cellules de l'immunité adaptative, d'une grande diversité, sont produites aléatoirement par des mécanismes génétiques complexes qui permettent potentiellement de répondre à une multitude de molécules. La maturation du système immunitaire résulte d'un équilibre dynamique entre la production de cellules et la répression ou l'élimination des cellules autoréactives. »	- Extraire et exploiter des informations (interviews, schémas et/ou résultats expérimentaux) pour : - comprendre la production de cellules immunitaires spécifiques (doc. 1, exercices 4 et 5 p. 302-303); - comprendre la répression ou l'élimination des cellules autoréactives (doc. 2 à 4).

Conseils et suggestions

- Dans les deux unités précédentes, l'existence et le rôle des cellules effectrices de la réponse adaptative ont été montrés. Il s'agit ici de comprendre comment ces cellules spécifiques de l'agent pathogène sont produites en grand nombre (théorie de la sélection clonale) et comment les éventuelles cellules autoréactives formées dans les organes lymphoïdes primaires peuvent être mises hors d'état de nuire.
- Le Dossier Pour La Science sur le thème des défenses de l'organisme (dossier hors-série, octobre 2000) rassemble de nombreuses informations sur les dysfonctionnements de ces mécanismes, comme les maladies auto-immunes (exemple du diabète de type 1); ceci peut faire l'objet d'un exercice.
- La chronologie des événements cellulaires, notamment lors de la sélection clonale, est mise en animation dans le logiciel « Immunologie » téléchargeable gratuitement sur internet: <http://svt67.free.fr/immuno.htm>. Ceci permet de donner une vision schématique synthétique des différentes phases de la réaction immunitaire.
- La compréhension de la théorie de la sélection clonale est nécessaire à la résolution de plusieurs exercices proposés, comme les **exercices 4, 5 et 7** du chapitre. C'est aussi la base du principe du vaccin thérapeutique contre le cancer développé dans l'**exercice 2** p. 318.
- La sélection clonale est aussi à la base de la théorie historique des chaînes latérales d'Ehrlich, proposées à l'étude dans l'**atelier « Histoire des sciences »** p. 320.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (Mettre en relation des informations et raisonner).

Dans le schéma construit dans l'unité 4, on a montré une chronologie d'événements conduisant à la production d'anticorps anti-grippe lors d'une infection grippale. Le **doc. 1** permet ici de compléter cette chronologie: les LT CD4 et les LB qui se différencient respectivement en LT auxiliaires et en plasmocytes le font suite à une sélection parmi une population nombreuse de lymphocytes naïfs: seuls les lymphocytes présentant des récepteurs de surface (récepteurs T pour les LT, anticorps membranaires pour les LB) complémentaires à un antigène viral (présentés par le CMH dans le premier cas, ou libres dans le second cas) vont pouvoir se multiplier et se différencier en cellules effectrices.

2 DOC. 2 À 4 (Comparer des résultats expérimentaux pour extraire des informations et raisonner).

Les souris transgéniques HY présentées dans le **doc.3** ne produisent que des LT CD8 portant un récepteur T spécifique de la protéine HY, produites par les mâles (car codée par un gène du chromosome Y). Or l'étude microscopique de leur thymus montre une différence de phénotype tissulaire entre mâles et femelles: les lymphocytes T en voie de maturation sont mourants chez les mâles, alors qu'elles survivent chez les femelles, ce qui explique que l'on ne retrouve ces LT dans les ganglions lymphatiques que chez les femelles. D'après le **doc.2**, les LT du mâle HY sont des cellules potentiellement autoréactives car elles sont capables de réagir contre un antigène de l'organisme. On en déduit qu'un premier mécanisme de protection de l'organisme contre les cellules autoréactives est la mort de ces cellules lors de leur formation dans les organes lymphoïdes primaires. Par ailleurs, le **doc.4** présente des cellules transgéniques MBP produisant uniquement des LT CD8 spécifiques de la MBP, protéine du cerveau. Les études phénotypiques montrent que les LT en question sont bien produits par le thymus et qu'ils circulent efficacement dans les ganglions lymphatiques, mais que contre toute attente ils ne déclenchent pas de réaction immunitaire dans le cerveau, là où se trouve l'antigène reconnu. L'étude *in vitro* permet de préciser le mécanisme en jeu: les lymphocytes auto-réactifs sont inactifs dans les conditions théoriques d'activation, c'est-à-dire incapables de se multiplier et de se différencier en cellules effectrices
N.B. Les mécanismes de mort cellulaire et d'anergie mis en évidence ici ne sont pas développés, conformément au programme qui demande de ne pas détailler les processus cellulaires en jeu.

3 EN CONCLUSION (Communiquer en rédigeant une synthèse).

Le système immunitaire produit en continu, avant toute infection, un grand nombre de lymphocytes naïfs de spécificités variées. Ce répertoire naïf peut potentiellement reconnaître toute molécule, qu'elle soit d'origine infectieuse ou propre à l'organisme, et engendrer des cellules immunitaires effectrices suite à la reconnaissance d'une telle molécule. Ce mécanisme, appelé sélection clonale, permet de répondre à une très grande variété d'agents infectieux. Les cellules potentiellement réactives aux molécules de l'organisme lui-même sont, avant toute activation, mises hors d'état de nuire grâce à deux processus principaux: une destruction très précoce de ces cellules lors de leur formation, ou bien une inactivation qui les rend incapables de subir la sélection clonale. Ainsi, l'intégrité de l'organisme est préservée.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• L'exemple d'une infection virale (grippe), fait comprendre la mise en place des défenses adaptatives et comment, en collaboration avec les défenses innées, elles parviennent à l'élimination du virus. On insistera sur la réponse adaptative à médiation humorale. On profitera de cette étude pour signaler le mode d'action du VIH et la survenue de maladies opportunistes dans le cas du SIDA.	• Recenser, extraire et exploiter des informations, y compris expérimentales, sur les cellules et les molécules intervenant dans l'immunité adaptative

Conseils et suggestions

- Dans le prolongement des unités précédentes, l'élève connaissant l'essentiel du fonctionnement du système immunitaire, nous abordons le cas du sida où le système immunitaire est directement la cible d'un virus.
- Dans une première partie, nous rappelons quelques données sur l'infection par le VIH (doc.1) sans aller jusqu'à l'étude du cycle viral (hors-programme).
- Nous faisons le point sur l'évolution de la pandémie (doc.2), à partir des dernières données du rapport l'ONUSIDA (voir le site internet : <http://www.unaids.org/fr/resources/publications/2011/>).
- L'interview du professeur Leibowitch (doc.3) permet de comprendre comment évolue le sida chez les malades sans traitement, mais aussi de faire le point sur les trithérapies actuelles.
- Le problème des maladies opportunistes est abordé par un tableau des caractéristiques de trois d'entre-elles (doc.4).
- Les exercices 6 p. 303 et 7 p. 304 se réfèrent à cette unité. L'éventualité d'un vaccin contre le VIH est discutée dans l'exercice 6 p. 317.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 3 (*Extraire et organiser des informations à partir de différents documents*). Le SIDA se caractérise par une augmentation inéluctable de la charge virale du VIH en parallèle avec l'effondrement du taux de LT CD4, au bout d'une dizaine d'années. Après transmission par voie sanguine, rapports sexuels non protégés ou transmission materno-fœtale, le VIH va infecter principalement les lymphocytes T CD4. Si quelques semaines après la contamination, le taux de VIH chute, c'est que l'ensemble du système immunitaire (et en particulier les LT CD4) réagit efficacement, sans pour autant pouvoir éliminer totalement les VIH de l'organisme.

2 DOC. 2 ET 3 (*Organiser des informations*). La baisse des nouvelles infections (depuis la fin des années 90) est le fruit des mesures de prévention des populations (utilisation du préservatif, informations sur le sida...) et de l'utilisation des trithérapies. La baisse des décès (depuis le milieu des années 2000) est liée à l'utilisation croissante de trithérapies efficaces. Paradoxalement, le nombre de personnes vivant avec le VIH augmente rapidement à partir du milieu des années 2000, alors même que le nombre de nouvelles infections décroît. On peut l'expliquer parce que les malades, mieux soignés, vivent plus longtemps !

3 DOC. 3 ET 4 (*Extraire et organiser des informations à partir de différents documents*). Les maladies opportunistes ont de nombreuses causes, essentiellement microbiennes ; certains cancers se développent aussi plus fréquemment chez les malades du sida. Les organes les plus touchés sont en contact avec les nombreux microbes de notre environnement (poumons, peau, muqueuse) ou liés plus ou moins directement avec la présence de VIH dans leurs cellules (affinités du VIH pour les neurone). Elles apparaissent au bout de nombreuses années de lutte du système immunitaire avec le VIH, lorsque les défenses de l'organisme commencent à faiblir (taux de LT CD4 faible < 350 LT4/μL) alors même que la charge virale ne cesse d'augmenter...

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*) Lors de la primo-infection, le système immunitaire se défend contre la présence du virus en produisant, entre autre, des anticorps contre le VIH. Le système adaptatif est insuffisant pour éliminer le virus, qui va rester latent pendant des années dans les LT_{CD4} et provoquer des infections chroniques affaiblissant l'organisme d'années en années, jusqu'au déclenchement du syndrome d'immunodéficience, caractérisé par l'apparition de maladies opportunistes fatal pour l'individu.

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « Une fois formés, certains effecteurs de l'immunité adaptative sont conservés grâce à des cellules-mémoires à longue durée de vie. Cette mémoire immunitaire permet une réponse secondaire à l'antigène plus rapide et quantitativement plus importante qui assure une protection de l'organisme vis-à-vis de cet antigène. »	• Recenser, extraire et exploiter des informations pour : – mettre en évidence la mémoire immunitaire (doc. 1 à 3). – comprendre les mécanismes de la mémoire immunitaire (doc. 4 à 6).

Conseils et suggestions

– On peut envisager, pour introduire ce troisième chapitre, d'utiliser les acquis de la classe de troisième sur la vaccination : « La vaccination permet à l'organisme d'acquérir préventivement et durablement une mémoire immunitaire relative à un microorganisme déterminé grâce au maintien dans l'organisme de nombreux leucocytes spécifiques ». L'image d'un enfant se faisant vacciner p. 305 peut être utilisée dans ce sens. La vaccination, traitée dans l'unité 2, repose sur l'existence d'une mémoire immunitaire (objet de l'unité 1) et est une composant de l'évolution du phénotype immunitaire (unité 3).

– Cette unité, dans un premier temps, permet de mettre en évidence l'existence d'une mémoire immunitaire en reprenant un type de graphique déjà utilisé dans le chapitre 2, présentant l'évolution de certains paramètres immunitaires au cours du temps après une infection. Il s'agit ici de comparer une réponse primaire et une réponse secondaire, en se basant sur l'exemple au programme, le virus de la grippe. Cette démarche est complétée par l'étude de documents sur les pandémies de grippe, permettant de faire le lien entre l'importance d'une épidémie et la nouveauté de l'agent infectieux pour la population. L'exercice 4 p. 316 reprend ces notions à travers l'exemple d'une épidémie grippale récente, peut-être connue des élèves, celle de la souche H1N1/09 de 2009.

– Dans un second temps, des résultats d'études expérimentales sur des souris permettent de comprendre que la mémoire immunitaire met en jeu à la fois des cellules immunitaires à longue durée de vie, mais aussi des plasmocytes mémoire permettant de maintenir un taux détectable d'anticorps spécifiques dans le sérum d'un individu immunisé.

– Cette démarche suivie dans l'unité peut être abordée grâce à une modélisation de la mémoire immunitaire par le logiciel NetBioDyn. Le logiciel ainsi que deux modèles utilisables pour cette démarche, sont disponibles sur le site de l'ENS Lyon :

<http://acces.ens-lyon.fr/acces/ressources/sante/reponse-immunitaire/ressources/biodyn/>.

– La modélisation de la réponse immunitaire humorale peut aussi être menée grâce au logiciel gratuit Immsim, qui permet d'afficher des graphes montrant l'évolution des effectifs de certaines cellules ou molécules au cours de la réponse immunitaire humorale consécutivement à l'injection d'un antigène : <http://www.immsim.org/>.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 À 3 (*Recenser, extraire et organiser des informations, Raisonner*). Lors d'une réponse immunitaire secondaire, l'apparition de LTC et d'anticorps est plus rapide (avant 5 jours), plus importante (facteur 8 pour la quantité de LTC et facteur 2 pour la quantité d'anticorps) et plus durable que pour une réponse primaire. Ceci peut expliquer que la concentration en virus dans le sang diminue rapidement, dès l'infection, dans le cas d'une réponse secondaire (**doc.1**). On peut supposer que le système immunitaire, qui répond plus vite et plus efficacement lors d'une seconde infection, a été modifié par la première infection, et en a gardé une « trace » que l'on pourrait nommer mémoire immunitaire. Les **doc.2 et 3** montrent que les épidémies et pandémies grippales sont dues à la propagation du virus de la grippe dans une population, avec des proportions variables de personnes infectées (proportion très forte pour une pandémie). Les pandémies sont dues à des souches virales nouvelles, portant des antigènes de surface jamais rencontrés par la population. Les épidémies, fréquentes, sont dues à une recirculation de souches dans une même population, avec des antigènes de surface légèrement différents (mutations). Ainsi, on peut établir un lien entre la gravité d'une épidémie et la nouveauté des protéines antigéniques du virus concerné : là encore, cela suggère l'idée d'une mémoire immunitaire : la population qui a déjà rencontré un type de virus y sera par la suite plus résistante. La légende du **doc.3** confirme cette hypothèse puisque « le sang de certains survivants d'une pandémie contient des anticorps spécifiques » de la souche virale responsable de la pandémie, traces de cette mémoire immunitaire.

2 DOC. 1, 4 ET 6 (*S'informer à partir de résultats expérimentaux pour proposer une explication*). L'expérience du **doc. 4** montre

que des lymphocytes prélevés sur une souris un an après sa rencontre avec la toxine cholérique permettent à une souris receveuse « naïve » (n° 2) de produire 10 fois plus d'anticorps contre cette toxine 6 jours après l'injection de cette dernière que dans des conditions témoin (même protocole, mais avec des lymphocytes obtenus à partir d'une souris n'ayant jamais rencontré la toxine cholérique). On en déduit que les anticorps produits rapidement et en grand nombre par la souris n° 2 sont issus des lymphocytes qui lui ont été injectés et qui se sont rapidement différenciés en plasmocytes. Ces lymphocytes issus de la souris n° 1 sont donc des LB spécifiques de la toxine cholérique, qui ont persisté pendant un an après la rencontre avec la toxine. Ceci correspond à la définition de LB mémoire qui est donnée dans le **doc.6**.

L'existence de ces LB mémoire permet d'expliquer la rapidité de la production d'anticorps spécifiques lors de la réponse secondaire (**doc.1**).

3 DOC. 3 ET 5 (*S'informer à partir de résultats expérimentaux pour proposer une explication*). Dans l'expérience du **doc.5**, les souris dont on suit la concentration en anticorps anti-virus ont été irradiées, et de ce fait ne possèdent plus les lymphocytes mémoire produits lors de la réponse immunitaire primaire (à $t=0$). Pourtant,

on remarque que durant la période du suivi, ces souris produisent encore des anticorps anti-virus: ces anticorps sont donc produits par des cellules mémoire qui ont résisté à l'irradiation, c'est-à-dire des plasmocytes mémoire. Ce nouvel aspect de la mémoire immunitaire explique que suite à la pandémie de « grippe espagnole » certains survivants présentaient encore des anticorps spécifiques du virus 90 ans après l'infection (**doc.3**).

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Lors d'un deuxième contact avec un antigène, la réponse du système immunitaire (réponse secondaire) est plus rapide et plus efficace que lors du premier contact avec ce même antigène (réponse primaire). Ceci traduit l'existence d'une mémoire immunitaire. Suite à une réaction primaire des cellules mémoires à longue durée de vie sont produites: lymphocytes mémoire mais aussi plasmocytes permettent la production d'anticorps spécifiques longtemps après l'infection. Ces cellules sont activées rapidement en cas de deuxième contact avec l'antigène qu'elles reconnaissent spécifiquement; ceci explique les caractéristiques de la réponse secondaire. L'existence de la mémoire immunitaire assure ainsi une meilleure protection de l'organisme contre les antigènes déjà rencontrés.

UNITÉ 2 La vaccination

[pp. 308-309 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« La vaccination déclenche une telle mémorisation, l'injection de produits immunogènes mais non pathogènes (particules virales, virus atténués, etc.) provoque la formation d'un pool de cellules mémoires dirigées contre l'agent de la maladie. L'adjuvant du vaccin déclenche la réaction innée indispensable à l'installation de la réaction adaptative. »	- Extraire et exploiter des informations (interviews, schémas et/ou résultats expérimentaux) pour : - comprendre la base biologique de la vaccination (doc. 1 à 6) - comprendre le rôle des adjuvant ajoutés aux vaccins (doc. 7 et 8).

Conseils et suggestions

- Le but de cette activité est de présenter le principe de fonctionnement d'un vaccin. Elle utilise directement les données mises en place par l'unité 1. Ainsi la notion de réponse secondaire à un antigène et la présence des cellules mémoires sont réutilisées pour comprendre l'action d'un vaccin.
- Cette unité débute par l'étude de la composition de vaccins, dont le vaccin de la grippe H1N1 et celui de la fièvre jaune. Ces documents permettent de montrer qu'un vaccin contient l'agent infectieux, sous une forme non-pathogène, mais immunogène. L'histoire du vaccin contre la fièvre jaune (doc 4) permet de mettre en place la notion d'atténuation des souches virales (ou bactériennes) permettant la synthèse de nombreux vaccins.
- Cette unité montre l'importance de l'immunité innée par l'intermédiaire des adjuvants qui potentialise l'effet de la vaccination.

Cette présentation des adjuvants permet de présenter les bases scientifiques de l'utilisation de substances qui font polémique. Certains adjuvants sont soupçonnés de causer des effets secondaires indésirables et dommageables.

- La compréhension du fonctionnement d'un vaccin est nécessaire à la résolution de plusieurs exercices proposés, comme les **exercices 5 et 6** du chapitre. C'est aussi la base du principe du vaccin contre le cancer développé dans l'**exercice 2** p. 318.
- Le Dossier Pour La Science sur le thème des défenses de l'organisme (dossier hors-série, octobre 2000) rassemble des informations sur les vaccins, notamment les vaccins anticancéreux et le vaccin contre le VIH.

(...)

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 À 3-(Recenser, extraire et organiser des informations). Les différents exemples de vaccin présentés peuvent être classés en deux catégories. Ils peuvent, contenir un agent pathogène vivant (tel celui de la fièvre jaune contenant le virus responsable de la maladie, vivant). Différents traitements rendent les agents non virulents tout en conservant leur caractère immunogène. L'agent pathogène est alors qualifié d'atténué. Le vaccin contre la fièvre jaune rentre donc dans la catégorie des vaccins vivants atténués. En revanche, certains vaccins contiennent l'agent infectieux mort (vaccin contre la polyomyélite contenant le virus responsable de la maladie, tué) ou des fragments de l'agent infectieux possédant des propriétés immunogène, donc capables de déclencher une réaction immunitaire primaire (Grippe H5N1, Diphtérie, tétanos...). Ils rentrent dans la catégorie des vaccins inertes.

1 DOC. 5 ET 6 (Extraire des informations, pratiquer une démarche scientifique).

Dans un vaccin, la forme de l'agent infectieux est incapable de tuer la personne vaccinée, mais déclenche une réaction immunitaire primaire (doc. 5), ce qui permet la production d'anticorps ou de LTc, effecteurs de la réponse primaires. Des personnes vaccinées possèdent beaucoup plus de lymphocytes mémoires que des personnes non vaccinées. Ainsi, une vaccination induit la production de lymphocytes mémoires qui pourront lors de la rencontre avec l'agent pathogène réellement virulent déclencher rapidement une réaction secondaire, beaucoup plus efficace.

1 DOC. 7 ET 8 (Extraire des informations d'un graphe et d'un texte, raisonner).

La présence d'adjuvant dans un vaccin permet d'augmenter l'effet immunogène de l'agent pathogène (doc 7). L'effet des adjuvants

reste encore mal connu. Ils potentialiseraient la phase de présentation de l'antigène en stimulant soit la phagocytose par les cellules présentatrice soit en améliorant leur recrutement sur les lieux de l'infection. Etant donné leur effet, certains adjuvants en augmentant la réaction innée, nécessaire à la mise en route de la réaction adaptative, peuvent causer des effets secondaires indésirables.

1 DOC. 3, 4, 7 ET 8 (Communiquer en rédigeant une synthèse). Les vaccins vivants sont souvent plus efficaces car ils déclenchent plus efficacement la production d'anticorps et de LTc. En revanche certains pathogènes, comme les bactéries du tétanos et de la Diphtérie qui produisent des toxines mortelles pour le fonctionnement de l'organisme ne peuvent pas être utilisés sous forme atténuée. Pour d'autres pathogènes, la production de formes atténuées n'est pas possible. Il faut recourir alors à des formes vaccinales faisant intervenir des fragments du pathogène ou la toxine elle-même.

5 EN CONCLUSION (Communiquer dans un langage scientifique approprié)

Un vaccin efficace doit répondre à plusieurs critères :

- Il doit être sûr, c'est-à-dire ne doit pas causer une maladie ou la mort.
- Il doit être protecteur, c'est-à-dire protéger contre la maladie induite par une exposition au pathogène vivant.
- Il doit fournir une protection de longue durée, c'est-à-dire que la protection contre la maladie doit durer plusieurs années.
- Il doit induire des anticorps neutralisants et induire la production de Lymphocytes T effecteurs.
- Il doit induire la production de cellules mémoires.

Son action peut être amplifié par ajout d'adjuvant.

UNITÉ 3 L'évolution du phénotype immunitaire

[pp. 310-311 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « Le phénotype immunitaire d'un individu se forme au gré des expositions aux antigènes et permet son adaptation à l'environnement. La vaccination permet d'agir sur ce phénomène. La production aléatoire de lymphocytes naïfs est continue tout au long de la vie mais, au fil du temps, le pool des lymphocytes mémoires augmente »	• Recenser, extraire et exploiter des informations (graphiques, images, schémas, texte) pour : – étudier l'évolution du phénotype immunitaire au cours de la vie (doc. 1,2) – faire le lien entre rencontre avec un antigène et protection d'un individu et des populations (doc. 3,4 et 5)

Conseils et suggestions

– Cette unité permet de faire la synthèse des deux autres unités en étudiant l'évolution du phénotype immunitaire au cours de la vie d'un individu. Elle montre l'effet des rencontres, naturelles ou artificielles (vaccination), avec l'antigène sur la présence dans un

organisme des cellules mémoires, pivot de la réponse immunitaire secondaire et sur leur affinité vis à vis de ces pathogènes.

– Cette unité permet également de replacer la vaccination dans un cadre sanitaire, et montrer l'effet protecteur de la vaccination sur

des populations à risque (enfants) et montrer que la vaccination a participé à la diminution de l'incidence de certaines maladies comme la polyomyélite. Il s'agit donc d'aborder un cadre plus large, pour faire comprendre avant tout les enjeux sanitaires de la vaccination : je me vaccine pour protéger les autres.

Exploitation des documents par les activités

(Recenser, extraire et organiser des informations, Reasonner).

Au cours de la vie d'un individu, le nombre de lymphocytes B naïfs diminue au profit du nombre de lymphocytes B mémoire (doc. 1). Il y a donc une évolution quantitative des lymphocytes mémoires dont la proportion augmente parmi les lymphocytes sanguins au cours du temps. Cette évolution s'explique si on considère les multiples rencontres artificielles ou naturelles que contracte l'organisme au cours de sa vie. Chacune d'entre elles induit une réaction immunitaire puisant dans le stock de lymphocytes naïfs et produisant des lymphocytes mémoires.

Le pool de lymphocytes B mémoire change aussi qualitativement au cours du temps. En effet, parmi l'ensemble des lymphocytes mémoires, la proportion de lymphocytes B mémoire spécifique d'un antigène donné dépend des rencontres de l'organisme avec

ces antigènes suite à une infection ou lors de la vaccination.

L'analyse du doc. 3, montre que, plus le nombre d'infections à rotavirus déjà subies est important, plus la concentration en anticorps contre cet agent augmente. On peut donc penser qu'une mémoire immunitaire (plasmocyte mémoire) spécifique du rotavirus s'est mise en place au cours des infections successives. Le deuxième graphique établit que la majorité des infections répertoriées concernent des individus présentant un taux d'anticorps anti-rotavirus faible (individus n'ayant jamais été infectés d'après le premier graphique). Ceci montre que la mémoire immunitaire mise en place et dont témoigne la présence d'anticorps, protège les individus contre une nouvelle infection. Cette protection, à l'échelle individuelle permet de lutter contre la propagation des épidémies et assure donc une protection à l'échelle de la population entière (doc. 4 et 5). Ainsi, l'apparition du vaccin contre la poliomyélite en 1958, puis son obligation en 1964 sont corrélées à une diminution importante du nombre de l'incidence de cette maladie (de 90 cas par millions d'habitants en 1958 à seulement quelques cas en 1969) (doc. 4). Menée à l'échelle mondiale, une campagne de vaccination peut éventuellement permettre l'éradication d'une maladie (doc. 5).



EXERCICES DU THÈME 5

Les corrigés des exercices des rubriques «Évaluer ses connaissances» et «S'entraîner avec un exercice guidé» se trouvent à la fin du manuel (p. 366).

Chapitre 1 [pp. 280-282 du manuel]

⑤ LES OBSERVATIONS D'ILYA METCHNIKOV

Utiliser des observations historiques et les mettre en relation avec ses connaissances

Notions abordées : [L'immunité innée] repose sur des mécanismes [...] d'action très conservés au cours de l'évolution. C'est une première ligne de défense qui agit d'abord seule puis se prolonge pendant toute la réaction immunitaire. Elle prépare le déclenchement de l'immunité adaptative.

Réponses attendues :

Document 1 : on distingue une cellule de grande taille possédant un noyau plurilobé et dont la membrane plasmique présente des prolongements. Le cytoplasme de cette cellule renferme une vésicule à l'intérieur de laquelle on distingue deux cellules en forme de bâtonnet sans noyau (probablement des bactéries en cours de

division) : il s'agit donc d'une cellule immunitaire en train de réaliser le processus de phagocytose.

Ce processus intervient dans l'élimination des agents pathogènes. Il permet à la cellule d'ingérer l'élément étranger puis de le digérer grâce à des enzymes. Cette digestion est totale ou partielle.

Les observations de Metchnikov, réalisées à la fin du 19^e siècle, et les dessins qu'il en a tirés, permettent de retrouver l'essentiel des caractéristiques de la phagocytose. Grâce aux observations qu'il a réalisées chez les Amphibiens mais aussi chez de très nombreux autres organismes (échinodermes, spongiaires...), il a pu établir sa théorie phagocytaire discutée et mise en regard de la théorie des chaînes latérales d'Ehrlich dans l'atelier « Histoire des Sciences » p. 320 du manuel de l'élève.

Document 2 : Le document correspond à l'observation d'un vaisseau sanguin dont la paroi est légendée. Ce vaisseau contient des hématies, cellules de forme ovale (4 ou 5 cellules selon le dessin). On distingue par ailleurs une autre cellule (granulocyte) dont la forme et la position changent. La membrane de cette cellule présente des prolongements. Initialement contenue dans le vaisseau, cette cellule possède un prolongement qui sort dans les tissus

(...)

autour du vaisseau. Sur le second dessin, la plus grande partie de la cellule se trouve à l'extérieur du vaisseau, seule une petite partie est encore contenue à l'intérieur.

Le phénomène observé ici est la diapédèse, mécanisme par lequel une cellule immunitaire peut quitter les vaisseaux sanguins pour gagner les tissus environnants. Ce phénomène intervient lors de l'amplification de la réponse immunitaire innée, lorsque des cellules immunitaires sont recrutées, grâce à l'intervention de différents médiateurs de l'inflammation, sur les sites d'infection.

⑥ LA MALADIE GRANULOMATEUSE CHRONIQUE

Analyser des données et les mettre en relation avec ses connaissances pour raisonner

Notions abordées : L'immunité innée repose sur des mécanismes [...] d'action très conservés au cours de l'évolution. [Elle] met en jeu des molécules à l'origine de symptômes stéréotypés.

Réponses attendues :

Les macrophages sont capables de réaliser la phagocytose. Au cours de ce processus, des substances toxiques produites par les cellules phagocytaires et contenues dans les lysosomes ou libérées par la cellule peuvent entrer en contact avec les éléments phagocytés et les détruire (voir unité 4 p 274). Les agents bactéricides tels que la défensine (peptide antimicrobien) ont déjà été cités mais il apparaît ici un nouvel agent antibactérien : l'ion superoxyde O_2^- mis en évidence par la coloration au NBT.

Chez l'individu témoin, la totalité des cellules observées est capable de produire l'ion O_2^- puisque toutes les cellules sont colorées. La présence de cet ion peut être corrélée avec une absence de symptômes : l'individu est capable de se défendre contre les agents infectieux. Chez les autres individus atteints de façon plus ou moins sévères par la maladie et donc partiellement incapables de lutter contre les agents infectieux, seules une fraction mineure des cellules phagocytaires est colorée par le NBT, donc capable de produire l'ion O_2^- . La sévérité de la maladie est inversement proportionnelle au nombre de cellules capables de produire l'ion O_2^- . L'ion superoxyde intervient donc dans la destruction des éléments pathogènes au cours de la phagocytose. Un déficit de production de cette molécule (à la suite de la mutation d'un gène codant pour une protéine intervenant dans sa fabrication) induit une déficience dans la réponse immunitaire innée et une impossibilité, pour l'individu, de se défendre contre les agents infectieux. On a identifié au moins quatre mutations différentes affectant l'un des éléments du complexe multimoléculaire NADPH oxydase qui peuvent être à l'origine du phénotype décrit sous le terme de Maladie Granulomateuse Chronique, dont l'une liée au chromosome X. Un traitement par l'Interféron Gamma permet d'améliorer la résistance aux infections. Le mécanisme d'action est inconnu.

⑦ LES PROPRIÉTÉS ANTI-INFECTIEUSES DU MIEL

S'informer et raisonner

Notions abordées : L'immunité innée repose sur des mécanismes [...] d'action très conservés au cours de l'évolution. [Elle] met en jeu des molécules à l'origine de symptômes stéréotypés.

L'objectif de cet exercice est double :

– Expliquer sur le plan biologique l'un des mécanismes sur lesquels s'appuie l'apithérapie.

– Montrer le caractère très conservé des mécanismes de la réaction immunitaire innée.

Réponses attendues :

1. On cultive sous la forme d'un tapis continu des bactéries sur un milieu gélosé solide. La destruction potentielle des bactéries se matérialise ainsi sous la forme d'un trou dans le tapis bactérien. On compare l'action de la molécule de défensine extraite du miel avec celle d'une autre molécule antibactérienne bien caractérisée : le lysozyme.

En présence de lysozyme ou de défensine (partie droite du cliché), le tapis bactérien est lysé. La taille de la plage de lyse est identique avec les deux molécules, ce qui permet de quantifier de façon grossière l'efficacité de la défensine. Les deux molécules sont de nature protidique. La Pepsine les détruit donc. On constate alors que les plages de lyse obtenues en présence de lysozyme ou de défensine traitée par la pepsine sont fortement réduites. La lyse bactérienne est donc bien due à l'action de ces molécules. La présence des défensines dans le miel explique ses propriétés antibactériennes.

2. La défensine contenue dans le miel est produite par les Abeilles au moment de la fabrication de celui-ci. Les butineuses puis les receveuses stockent temporairement les produits de la collecte dans leur jabot où lui sont associées différentes substances produites par l'abeille (enzymes de maturation du miel ou défensine par exemple).

Le document 2 permet de montrer que les défensines existent chez de très nombreux organismes. L'absence de défensine chez les souris mutées conduit à l'impossibilité, pour ces animaux, de se défendre contre les infections bactériennes. On démontre ainsi que le rôle de la défensine chez les mammifères est le même que celui observé chez les Insectes.

L'étude de la défensine met donc en lumière la grande conservation évolutive des processus de défense immunitaire innée.

⑧ L'IMMUNITÉ INNÉE CONTRE LA LEGIONELLOSE

Analyser et interpréter des résultats expérimentaux pour éprouver une hypothèse

Notions abordées : [L'immunité innée] est une première lignée de défense qui agit d'abord seule [...]. Elle repose sur des mécanismes [...] d'action très conservés au cours de l'évolution [et] met en jeu des molécules à l'origine de symptômes stéréotypés.

Réponses attendues :

On cherche, à déterminer le rôle de la protéine MIP-2 dans la défense contre la bactérie *Legionella pneumophila*. On sait que cette molécule peut se fixer sur un récepteur (CXCR-2) présent notamment sur les granulocytes. Le rôle de MIP-2 est abordé par une technique d'inhibition de l'interaction entre récepteur et ligand (cas des souris traitées). On cherche à déterminer l'effet de cette inhibition sur le recrutement des granulocytes neutrophiles sur le site de l'infection en dénombrant ces cellules dans le compartiment pulmonaire. Le graphique du document 1 montre que le nombre de neutrophiles présents dans le compartiment pulmonaire est environ 40 fois supérieur chez les souris infectées par rapport aux souris témoin.

non infectées. On peut donc raisonnablement conclure que l'infection induit le recrutement des neutrophiles dans les poumons. Chez les souris traitées et infectées, le nombre de neutrophiles recrutés dans le compartiment pulmonaire est 3 fois inférieur à celui qui a été mesuré chez les souris témoin infectées. L'inhibition de l'interaction entre MIP2 et son récepteur perturbe donc la migration des neutrophiles. On peut donc postuler l'intervention de MIP-2 comme facteur de recrutement des cellules de l'immunité innée sur le site de l'infection. Le fait que l'inhibition de l'interaction MIP-2/CXCR2 n'abolisse pas totalement le recrutement plaide en faveur de l'intervention d'autres facteurs de recrutement.

Le graphique du document 2 permet de faire le lien entre migration des granulocytes neutrophiles sur le site d'infection et la lutte antibactérienne. Le recrutement des neutrophiles sur le site d'infection grâce, notamment, à la présence de MIP-2 permet l'élimination des bactéries. Chez les individus traités, l'absence d'intervention de MIP-2 empêche le recrutement des neutrophiles (comme démontré dans le document 1) et la destruction des bactéries. La prolifération de ces dernières est à l'origine de la mort des individus.

On démontre ainsi le rôle de MIP-2 et, de façon plus globale, des chimiokines dans l'amplification de la réponse immunitaire innée.

Chapitre 2

[pp. 303-304 du manuel]

⑤ L'EXPÉRIENCE DE G. NOSSAL (1959)

Analyser des résultats expérimentaux

Réponses attendues :

1. Le doc. 1 montre que dans chaque puits (contenant un unique plasmocyte) un seul type de *Salmonelle* est immobilisé. Or, l'énoncé précise que « la fixation des anticorps sur les bactéries entraîne leur immobilisation » (action de neutralisation). On en déduit que chaque plasmocyte sécrète un type d'anticorps et un seul.

2. On observe dans le doc.1 que tout plasmocyte isolé à partir de la souris infectée par les deux types de *Salmonelles* est capable de produire des anticorps spécifiques d'un seul des deux types de *Salmonelle*. Par conséquent, on voit que la Souris infectée a produit deux populations de plasmocytes : l'une spécifique de la souche A de bactéries, l'autre de la souche B. D'après nos connaissances, nous pouvons en déduire que suite à l'inoculation des deux souches de *Salmonelle* à la souris, deux types de clones de lymphocytes B naïfs (d'anticorps membranaires spécifiques pour l'un de la souche A, pour l'autre de la souche B) ont subi la sélection clonale, donnant naissance à deux populations de plasmocytes sécrétant pour l'une des anticorps anti-*Salmonelle* A, pour l'autre anti-*Salmonelle* B.

⑥ LES CAUSES D'UNE INFECTION FRÉQUENTE CHEZ LES PERSONNES IMMUNODÉFICIENTES

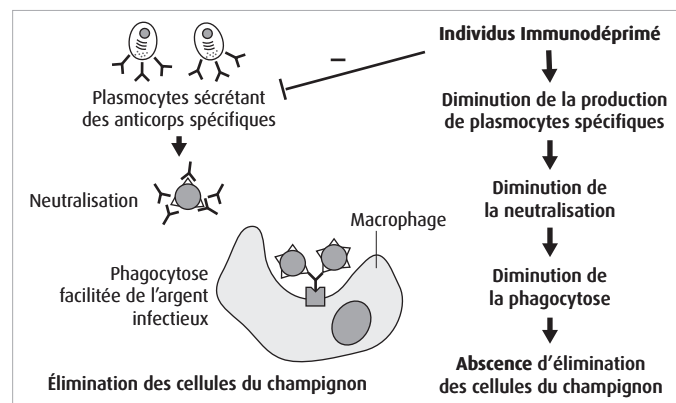
Observer et raisonner

Explicitation des documents :

Document 1 : Lorsque les cellules de champignons ne sont pas incubées en présence d'anticorps spécifiques (expérience témoin), elles restent orange, elles sont donc majoritairement extracellu-

lares. Lorsque les cellules de champignons sont préincubées en présence d'anticorps spécifiques d'une protéine membranaire de *Candida albicans*, elles apparaissent majoritairement vertes, une grande proportion de cellules se retrouvent donc majoritairement à l'intérieur des phagocytes. Le **document 2** indique que la présence d'anticorps spécifiques augmente le pourcentage de phagocytose. L'élimination de l'organisme des cellules du champignon, nécessite la coopération entre les anticorps et les cellules phagocytaires.

Réponse attendue :



⑦ LA RÉPONSE IMMUNITAIRE AU DÉBUT D'UNE INFECTION PAR LE VIH

Raisonner

Réponses attendues :

1. Le test du chrome 51 permet de mesurer la quantité de chrome radioactif libéré par les cellules du patient exprimant à leur surface un antigène du VIH, lorsqu'elles sont mises en présence des LTC du patient. Autrement dit, il s'agit d'une évaluation du taux de lyse cellulaire des cellules infectées par le VIH par les LTC. On l'appelle aussi test de cytotoxicité (évaluation du pouvoir cytotoxique spécifique (dirigé contre les cellules infectées par le VIH) des LTC).

2. D'après le doc.2, les LTC du patient A ont, quelque soit le nombre de jours après la primo-infection, un pouvoir de lyse des cellules infectées 4 à 5 fois plus élevé que celui des LTC du patient B. On peut supposer que les LTC du patient A reconnaissent et se fixent plus efficacement que ceux du patient B sur les complexes CMH-peptides du VIH à la surface des cellules infectées, permettant une élimination plus efficace. Ceci peut expliquer la différence de réponse immunitaire chez ces deux patients : le patient A, qui élimine mieux les cellules infectées, réservoirs de virus, voit sa virémie diminuer plus rapidement que celle du patient B.

⑧ LES EXPÉRIENCES DE J. BORDET SUR LE CHOLÉRA (1888)

Raisonner et construire un schéma.

Réponses attendues :

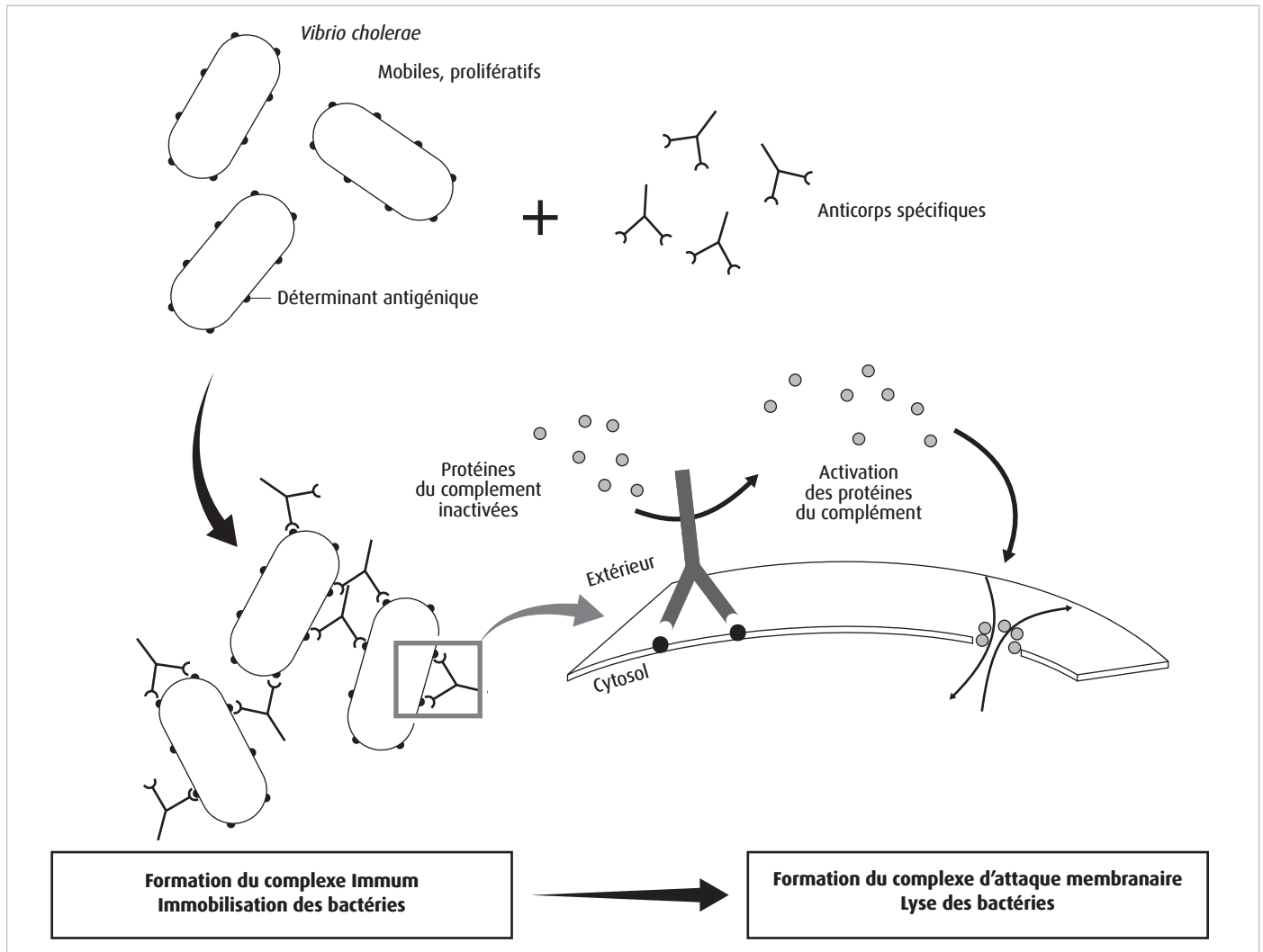
1. La souche de Vibrions étudiée est une souche originaire de Russie. Quel que soit les étapes réalisées, lorsque les lapins sont immunisés contre la souche d'Afrique du Nord, le sérum n'a aucun effet sur les vibrions de la souche de Russie.

(...)

Lorsque les lapins sont immunisés contre la souche Russe, le sérum récupéré, chauffé, induit l'immobilisation des vibriens mais pas leur lyse. Dans ce sérum, les anticorps spécifiques contre les vibriens de la souche de Russie ont formé des complexes immuns, immobilisant les bactéries. Dans le sérum provenant de Lapins immunisés contre la souche d'Afrique du Nord, il n'y a pas d'anticorps spécifiques de la souche de Russie capable de s'y fixer. Le rajout de sérum non chauffé, sans anticorps, induit la lyse des

vibriens. Les protéines du «complément» (**document 2**), thermosensibles, présents dans le sérum et différents des anticorps sont capables de lyser les bactéries en formant des pores dans les membranes plasmiques. Etant donné que l'étape 2 n'induit pas la lyse lorsque le sérum provient de lapin immunisé contre une autre souche, les protéines du «complément» n'agissent que lorsque les bactéries ont été immobilisées préalablement par les anticorps.

2. Schéma attendu :



Activation par les anticorps fixés et action des protéines du «complément».

Chapitre 3

[pp. 316-317 du manuel]

⑤ UNE EXPÉRIENCE HISTORIQUE DE LOUIS PASTEUR

Analyser des données et raisonner

Réponse attendue :

Dans cette expérience historique, Pasteur utilise une vieille culture de bactéries, qui lorsqu'elle est injectée à une poule, n'entraîne pas sa mort, contrairement à une culture fraîche (comparaison des poules A et B). On peut émettre l'hypothèse que la vieille culture de bactérie ne contient plus que des bactéries mortes, donc inoffensives. Il remarque qu'une poule ayant survécu à l'injection d'une vieille culture bactérienne peut ensuite survivre à une injection de culture fraîche, mortelle dans le cas d'une infection primaire.

On peut en conclure que l'inoculation de bactéries mortes, inoffensives, mais capables de présenter les antigènes bactériens induit une réponse primaire puis la mise en place d'une mémoire immunitaire. Ceci confère à la poule injectée une résistance à ce pathogène : c'est le principe de la vaccination.

⑥ UN VACCIN CONTRE LE VIH : DIFFICULTÉ ET PERSPECTIVES

Analyser des données et raisonner

Réponses attendues :

1. L'information génétique du VIH, portée par son ARN, varie chez un même patient au cours de l'infection pour donner de nouveaux variants, qui coexistent chez le patient comme le montre le **doc. 1** :

par exemple pour le patient 1, 6 variants viraux coexistent. Cette variabilité génétique du virus pourrait être responsable d'une variabilité des protéines antigéniques de surface du virus, puisque les protéines virales sont codées par son information génétique. Cet aspect pourrait rendre difficile la mise au point d'un vaccin. En effet, un vaccin efficace devra être dirigé contre tous les variants du virus, que ce soit à l'intérieur d'un même patient ou chez les différents patients susceptibles d'être vaccinés. Ceci implique de cibler des antigènes communs à tous les variants du virus.

2. Les valeurs de l'indice IC_{50} données dans le **doc.2** sont d'autant plus faibles que l'activité de neutralisation est forte (l'indice donné présente en effet une quantité d'anticorps nécessaire pour neutraliser une même activité infectieuse du virus). On remarque dans ce tableau que PG16 présente une meilleure activité de neutralisation que 2G12, quelque soit la souche virale considérée (activité jusqu'à 200 fois plus élevée). Par conséquent PG16 doit se fixer sur un ou des site(s) antigénique(s) cruciaux pour l'infection des cellules cibles par le VIH, et ce pour de nombreux variants viraux. La caractérisation de ces sites antigéniques est donc cruciale pour l'élaboration d'un vaccin efficace contre de nombreux variants viraux, et donc utilisable chez de nombreux patients.

Objectif bac

[p. 318-319 du manuel]

② UN VACCIN THÉRAPEUTIQUE CONTRE LE CANCER :

(Manifester de l'intérêt pour les enjeux de santé publique, manifester curiosité et esprit critique pour comprendre l'intérêt des études cliniques et la nature provisoire du savoir scientifique. Recenser, extraire et organiser des connaissances).

Notions abordées : [L'immunité innée est une première ligne de défense qui agit d'abord seule puis se prolonge pendant toute la réaction immunitaire. Elle prépare le déclenchement de l'immunité adaptative.

Contexte : Parmi les outils de lutte contre les cancers, l'approche vaccinale constitue actuellement un champ de recherche très actif. On peut distinguer deux stratégies principales :

Vaccination préventive consistant à intervenir avant développement des cellules cancéreuses. Elle est possible lorsque le ou les agents responsable(s) du déclenchement de la maladie sont identifiés. C'est le cas du cancer du col de l'utérus lié à une infection par le virus HPV.

Vaccination thérapeutique visant à permettre l'élimination d'une tumeur déjà installée. C'est dans cette seconde catégorie que rentre l'exemple traité ici.

La vaccination consiste à agir sur le système immunitaire par l'intermédiaire des cellules présentatrices de l'antigène, en particulier les cellules dendritiques. Ces cellules sont mises en contact avec les antigènes caractéristiques des cellules cancéreuses pour lesquels elles procèdent à un apprêtement et à une présentation en association avec les molécules du CMH (mécanismes présentés aux pages 275 et 290 du manuel de l'élève). Ainsi activées, ces cellules, réinjectées chez le patient peuvent participer à l'activation des cellules de la réponse adaptative (ici les lymphocytes T CD8⁺)

qui interviennent alors dans l'élimination spécifique des cellules tumorales. On parle donc bien de vaccination du fait de la spécificité de ces mécanismes.

Si, sur le principe, l'idée paraît séduisante, les résultats du document 2 incitent cependant à la prudence. En effet, le bénéfice se manifeste par une longévité accrue de 3 mois chez les patients après 24 mois de traitements, mais ce bénéfice diminue avec le temps, le nombre de décès, avec ou sans traitement étant identique après 5 ans.

Pour en savoir plus sur cette expérience, on pourra consulter les sites suivants : <http://www.provenge.com/advanced-prostate-cancer-therapy.aspx> (site commercial de la société productrice du vaccin), <http://www.romandie.com/infos/news2/100429214517.aketlc4l.asp> (site de la Télévision Suisse Romande permettant d'aborder le traitement médiatique de l'information médicale) et www.cancer.gov/ncicancerbulletin (site du ministère américain de la santé permettant d'aborder le volet institutionnel).

③ LE PHÉNOMÈNE DE MATURATION D'AFFINITÉ .

Le document 1 permet d'apprécier l'évolution de 3 catégories de plasmocytes suite à un contact entre le système immunitaire et un antigène. 6 jours après le contact les plasmocytes produisant des anticorps spécifiques de l'antigène sont majoritairement de faible affinité, plus de 95 %. Plus le temps passe, plus la catégorie de forte affinité augmente en proportion. 21 jours après le contact, 58 % des plasmocytes sont de la catégorie de forte affinité et 38 % de faible affinité. Plus le temps passe après un contact avec un antigène, plus l'affinité des anticorps produits augmente. C'est le phénomène de maturation d'affinité.

Le document 2 propose une explication en étudiant les séquences d'ADN qui codent la partie variable des chaînes légères des anticorps. Plus précisément, ce sont les séquences qui codent les domaines CDR de l'anticorps. Ce sont les domaines qui entrent directement en contact avec le déterminant antigénique. Ce sont donc les parties de l'anticorps directement responsables de la fixation et donc de l'affinité. Le protocole est le même que dans le document 1. Des clones de plasmocytes vont être étudiés au cours du temps après un contact avec un antigène. Plus le temps passe plus le nombre de mutations faux sens dans les séquences d'ADN est important. Au bout du 42^e jour, on dénombre 24 mutations au total sur les 4 clones étudiés, dont seulement 4 sont silencieuses. De plus, on remarque que ces mutations se concentrent au niveau des séquences CDR. Ces mutations pourraient être responsables de la maturation d'affinité en faisant évoluer les domaines de fixation à l'antigène.

Le document 3 présente les constantes d'affinité des anticorps produits par les clones étudiés au document 2. Les clones du 7^e jour (portant peu de mutations dans les séquences d'ADN codant la partie variable des chaînes légères des anticorps) présentent des constantes de fixation faibles, traduisant une faible affinité. En revanche les clones du 42^e jour présentent en moyenne des

(...)

constantes plus grandes. Ainsi le clone 42.4, qui accumule beaucoup de mutations, notamment dans la séquence CDR1, présente une constante de fixation très forte, donc une forte affinité.

Il est donc tout à fait possible de faire le lien entre les mutations survenant dans les séquences d'ADN et l'amélioration de l'affinité au cours du temps.

Le document 4 présente l'importance biologique du phénomène de maturation d'affinité. Le taux de survie de souches de souris soumises à la bactérie de la peste est évalué au cours de temps en fonction de la présence de mutations dans les séquences des anticorps produits. Il est rappelé que les mutations augmentent l'affinité. Définissons le t_{50} , qui est le temps pour avoir une survie de 50 %. Ce temps est une bonne estimation de la capacité des souches à résister. Plus le t_{50} est grand, plus les souches sont résistantes. La souche 1, qui ne produit pas d'anticorps, a un t_{50} de 3,5 jours; la souche 2, qui produit des anticorps non mutés, a un t_{50} de

5 jours et la souche 3, qui produit les anticorps mutés, a un t_{50} de 7 jours. Ainsi, plus le nombre de mutations portées par l'anticorps fabriqué par une souche donnée, plus la survie de cette souche est bonne.

En conclusion, le phénomène de maturation d'affinité repose sur l'apparition de mutations au niveau des gènes codant les parties variables des anticorps, séquences codant les domaines de fixation à l'antigène. Ces mutations permettent la production d'anticorps présentant une meilleure affinité. Ces anticorps sont responsables d'une élimination plus efficace des antigènes.

BIBLIOGRAPHIE

« Immunobiologie » (Janeway et al. Editions De Boeck)

« Cas cliniques en immunologie » (Rosen et Geha, Editions De Boeck)

« Immunologie » (Roitt, Brostoff, Male, Editions De Boeck)

« Pour en finir avec le sida » (J. Leibowitch - Ed. Plon - 2011)

THÈME 6 NEURONE ET FIBRE MUSCULAIRE : LA COMMUNICATION NERVEUSE

CHAPITRE 1

Les réflexes myotatiques, un exemple de commande nerveuse du muscle

UNITÉ 1 Les caractéristiques d'un réflexe myotatique

[pp. 328-329 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « Le réflexe myotatique est un réflexe monosynaptique. Il met en jeu différents éléments qui constituent l'arc réflexe. »	• Recenser, extraire et exploiter des informations, afin de caractériser un réflexe myotatique (doc. 1 à 5) • Effectuer une expérience pour tester le réflexe myotatique au sein du groupe classe (doc. 2)

Conseils et suggestions

- La page d'ouverture du chapitre peut fournir une occasion de faire le point sur les acquis des élèves (programme de 4^e) en ce qui concerne les composants de la commande volontaire du mouvement : récepteurs sensoriels, système nerveux central et périphérique, muscles. Une évaluation sous forme de schéma peut être envisagée pour apprécier de manière plus précise ces acquis.
- L'objectif de ce chapitre est double. L'étude du réflexe myotatique est intéressante en soi, en ce qu'elle permet de préciser le fonctionnement du système neuromusculaire (vu en seconde) et de comprendre un test médical couramment utilisé. Mais elle doit aussi permettre de poser les bases du fonctionnement, au niveau cellulaire, du neurone et de la synapse. C'est dans cet esprit que les différentes unités ont été construites.
- Les trois premiers documents de l'unité 1 visent à permettre une séance pratique utilisant l'EXAO avec enregistrement direct des électromyogrammes des élèves pendant une expérience de réflexe myotatique. Le dispositif expérimental présenté est celui utilisé pour le réflexe achilléen mais le réflexe myotatique rotulien peut également être étudié, en plaçant les électrodes sur le quadriceps et en produisant un choc rotulien avec le marteau réflexe.
- Les trois documents suivants mettent en lumière le centre nerveux impliqué dans le réflexe myotatique : la moelle épinière. Il peut être intéressant, dès ce moment de la progression, de tester les connaissances des élèves sur la moelle épinière et les arguments scientifiques montrant l'organisation topographique de celle-ci. On discutera alors des différentes lésions et de leurs conséquences suivant le niveau atteint (paraplégie, tétraplégie...).

Exploitation des documents par les activités

- 1 DOC. 1 ET 4** (*Recenser, extraire et organiser des informations*). Le document 1 indique que les médecins utilisent les réflexes myotatiques pour s'assurer du bon fonctionnement neuromusculaire. En effet, une lésion de la moelle épinière, par exemple, provoque des troubles de ces réflexes. Le document 4 met en évidence l'absence de réflexe chez un animal dont le muscle n'est plus innervé. Le réflexe est donc bien sous contrôle nerveux.
- 2 DOC. 2 ET 3** (*Recenser, extraire et organiser des informations*). Le document 3 permet de comparer les électromyogrammes obtenus lors d'un réflexe achilléen et lors de la contraction volontaire. Le temps de latence (entre le choc du marteau ou le signal sonore et la réponse) est de 20 ms pour le réflexe achilléen et de 60 ms pour la contraction volontaire. Or, ce temps est celui qui est nécessaire au message nerveux pour parcourir les circuits nerveux impliqués dans l'une et l'autre des réponses. Cette différence de temps de parcours suggère donc que ces circuits nerveux sont différents (il serait plus long pour le mouvement volontaire).
- 3 DOC. 4 ET 5** (*Recenser, extraire et organiser des informations*). Soumis aux expériences de Sherrington (doc. 4), un animal dont la moelle épinière a été sectionnée sous l'encéphale présente encore une extension réflexe du muscle de la patte arrière. Après section, le muscle n'est plus en contact nerveux avec l'encéphale : seule la moelle épinière peut jouer le rôle de centre nerveux. On peut donc en conclure que le centre nerveux responsable du réflexe est la moelle épinière. À l'inverse, l'encéphale n'est pas impliqué dans le réflexe. On peut donc supposer que les voies empruntées par le message nerveux sensoriels remontent du muscle vers la moelle épinière le long des nerfs périphériques puis redescendent vers le muscles avec l'information motrice.
- 4 EN CONCLUSION** (*Réaliser un schéma fonctionnel*). Voir schéma unité 3 p 338.

UNITÉ 2 Les voies nerveuses d'un réflexe myotatique

[pp. 330-331 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « Le réflexe myotatique est un réflexe monosynaptique. Il met en jeu différents éléments qui constituent l'arc réflexe. »	• Recenser, extraire et exploiter des informations, afin d'identifier les voies nerveuses du réflexe (doc. 1 à 4).

Conseils et suggestions

– Cette unité donne l'occasion d'aborder anatomiquement l'étude des voies nerveuses du réflexe myotatique par l'observation microscopique de coupes de moelle épinière et de nerfs rachidiens. Elle peut être jumelée avec l'unité 3 qui présente les fuseaux neuromusculaires et les plaques motrices.

– Il peut être intéressant de mettre en place des ateliers mosaïque pour les élèves où chaque groupe travaille sur une partie de l'arc réflexe qu'il faut construire. Ainsi un groupe peut travailler sur la moelle épinière et l'aspect monosynaptique du réflexe, un autre sur la structure du nerf rachidien et sa capacité à transporter des messages sensoriels et moteurs, un autre sur la plaque motrice et la distribution de l'information nerveuse aux fibres musculaires, etc. L'important sera de mettre à jour le lien entre structure et fonction et d'assurer une mise en commun permettant à chaque élève une vision complète et globale de l'arc réflexe.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*Recenser, extraire et organiser des informations*). La moelle épinière est reliée aux nerfs rachidiens par des racines ventrales et dorsales (visibles sur le document 1). Le document 2, grâce aux expériences de Magendie, nous permet de déduire le sens des messages nerveux le long de ces racines. Les sections

montrent que la racine dorsale joue un rôle dans la sensibilité de la région innervée quand la racine ventrale est impliquée dans sa motricité. Les stimulations confirment que le message sensoriel remonte le long de la racine dorsale puis que la réponse motrice emprunte la racine ventrale pour communiquer le message moteur.

2 DOC. 3 ET 4 (*Réaliser un schéma fonctionnel, Recenser, extraire et organiser des informations*). Le schéma du nerf doit permettre de mettre en évidence sa structure complexe (fibres nerveuses regroupées en différentes unités entourées par du conjonctif). Voir le **schéma unité 4 p 339** pour le schéma du neurone. Le neurone est dit polarisé car il comprend une partie afférente qui reçoit les informations (arbre dendritique) et une partie efférente qui envoie des informations (axone et terminaisons axonales). Entre les deux se trouve le corps cellulaire qui intègre les informations.

3 DOC. 3 (*Recenser, extraire et organiser des informations*). Le document nous montre que le nerf est constitué de nombreuses fibres nerveuses (neurones) réparties en différentes unités délimitées par du tissu conjonctif. Cette organisation laisse penser qu'à l'intérieur du même nerf, dans des unités distinctes, on peut avoir des messages transitant dans des sens opposés et donc des informations à la fois sensorielles remontant vers la moelle épinière et des informations motrices descendant vers les muscles.

4 EN CONCLUSION (*Réaliser un schéma fonctionnel*). Voir **schéma unité 3 p 338**.

UNITÉ 3 Les neurones impliqués dans un réflexe myotatique

[pp. 332-333 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « Le réflexe myotatique est un réflexe monosynaptique. Il met en jeu différents éléments qui constituent l'arc réflexe. »	• Recenser et exploiter des informations afin de mettre en évidence les neurones impliqués dans le réflexe myotatique

Conseils et suggestions

Comme suggéré pour l'unité précédente, il semble intéressant de combiner les unités 2 et 3 et de mettre au point une séance sous forme d'atelier mosaïque comprenant des observations microscopiques et des analyses documentaires sur les différents acteurs de l'arc réflexe.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 À 3 (*Recenser, extraire et organiser des informations*). L'analyse du document 1 montre que le centre de la moelle épinière (substance grise) contient des corps cellulaires de neurones, alors que sa périphérie (substance blanche) ne contient que des prolongements (axones). On peut alors penser que les corps cel-

lulaires des neurones sensoriels et moteurs se trouvent dans la substance grise. Le document 2 permet d'infirmer cette hypothèse. D'après l'unité précédente, le message nerveux sensoriel emprunte la racine dorsale. Lorsqu'une section est réalisée au niveau de la racine dorsale, seule la partie comprenant le ganglion rachidien ne dégénère pas. On peut donc en conclure que le corps cellulaire du neurone sensoriel est localisé dans le ganglion rachidien. Ce neurone est ainsi en forme de T : il possède des prolongements cellulaires dirigés vers le centre de la moelle épinière (axones visibles dans la substance blanche) et des prolongements cellulaires (dendrites) rejoignant le nerf rachidien. Les terminaisons dendritiques, localisées au niveau du muscle, entourent des fibres musculaires modifiées pour former un fuseau neuromusculaire, sensible à l'étiement du muscle. Ce sont des récepteurs sensoriels.

2 DOC. 1, 2 ET 4 (*Recenser, extraire et organiser des informations*). D'après l'unité précédente, le message nerveux sensoriel emprunte la racine ventrale. Lorsqu'une section est réalisée au niveau de la racine dorsale, seule la partie dirigée vers la moelle épinière ne dégénère pas. On peut donc conclure que le corps cellulaire du neurone moteur se trouve au niveau de la moelle épinière, donc dans la substance grise (d'après le doc. 1). Les neurones moteurs sont des neurones de forme plus « classique » dont les prolongements (axones) traversent la substance blanche et convergent au niveau du nerf rachidien. À l'extrémité de l'axone, les terminaisons synaptiques du neurone moteur forment, au contact avec différentes fibres musculaires, les plaques motrices (synapses neuromusculaires). Cette distribution assure la contraction simultanée des cellules musculaires en réponse à un message nerveux.

3 EN CONCLUSION (*Réaliser un schéma fonctionnel*). Voir schéma unité 3 p 338.

UNITÉ 4 Nature et transmission du message nerveux

[pp. 334-335 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « Le neurone moteur conduit un message nerveux codé en fréquence de potentiels d'action. »	• Recenser et exploiter des informations afin de mettre en évidence la nature du message nerveux.

Conseils et suggestions

- Cette unité, dont le but est de faire comprendre aux élèves les bases électriques de la transmission d'un message nerveux le long d'un axone, donne une place importante à l'histoire des sciences. On découvre les expériences princeps de l'électrophysiologie. Il peut donc être intéressant d'utiliser cet exemple pour montrer aux élèves que les avancées techniques dans le champ de la physique ou de la chimie ont des répercussions directes sur l'évolution des connaissances en biologie et en médecine.
- L'utilisation du logiciel de simulation Sherrington permet d'aborder la loi du tout ou rien et du codage en fréquence de l'information nerveuse de manière expérimentale et ludique.

Exploitation des documents par les activités

- 1 DOC. 1** (*Recenser, extraire et organiser des informations*). L'intérêt de l'axone de calmar est relativement simple : il est de taille nettement supérieure à la moyenne ce qui a permis aux physiologistes de l'époque de pouvoir étudier ses caractéristiques.
- 2 DOC. 1 A 3** (*Recenser, extraire et organiser des informations*). Le document 1 présente les expériences de Hodgkin et Huxley. En absence de stimulation, le neurone présente une différence de potentiel entre le cytoplasme et la face externe de la cellule : ce

potentiel de repos est normalement stable et négatif. En réponse à une stimulation, on observe une inversion transitoire de la polarité électrique du neurone. Cette inversion de polarité, le potentiel d'action, ne s'atténue pas avec la distance parcourue le long de l'axone (document 2). Enfin, le document 3 nous apprend que cette inversion de polarité n'est déclenchée qu'en dessus d'une valeur seuil de stimulation. Au dessus de cette valeur, l'inversion sera toujours identique, quelque soit l'intensité de stimulation. C'est la loi du « tout ou rien ».

3 DOC. 3 ET 4 (*Recenser, extraire et organiser des informations*). Lorsqu'on modifie l'intensité de la stimulation, on observe que le nombre de répétitions de potentiels d'action par unité de temps est modifié (document 4). Plus la stimulation est forte, plus la fréquence des potentiels d'action est élevée. Ainsi, ce n'est pas le potentiel d'action lui-même qui porte le message, étant par nature stéréotypé, mais la fréquence des potentiels d'action et leur distribution temporelle précise qui sera porteuse d'information : le message nerveux est codé en fréquence de potentiels d'action.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Le message nerveux qui se propage le long d'un neurone est de

(...)

nature électrique. Il s'agit d'inversions transitoires et stéréotypées du potentiel de membrane, appelées potentiels d'action. Ces potentiels d'actions sont déclenchés au delà d'une valeur seuil de stimulation et se régénèrent le long du neurone. Au delà de cette

valeur seuil, plus la stimulation est forte, plus la fréquence des potentiels d'action est élevée. Le message nerveux est donc codé en fréquence de potentiels d'action.

UNITÉ 5

Le fonctionnement de la synapse neuromusculaire

[pp. 336-337 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « La commande de la contraction met en jeu le fonctionnement de la synapse neuromusculaire. »	• Recenser et exploiter des informations afin de mettre en évidence la transduction du message nerveux en contraction musculaire.

Conseils et suggestions

Cette unité, comme la précédente, présente des notions et des concepts importants malgré la faible part qui lui est attribuée dans le programme de terminale. Il conviendra donc de faire ressortir les éléments importants de la manière la plus claire possible en un minimum de temps. Pour ce faire, une solution peut être un travail de groupe : sur le curare pour certains et sur le botulisme pour d'autres. Cela permettra, après la mise en place par l'observation microscopique de la structure mise en jeu, de passer plus de temps sur la compréhension du fonctionnement au travers d'exemples historiques et médicaux.

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Recenser, extraire et organiser des informations, Effectuer un calcul*). D'après le document 1, on peut mesurer un délai de 4 ms entre la stimulation et l'enregistrement de la réponse à savoir le potentiel d'action musculaire. Les potentiels d'action se propagent à une vitesse de 50 m.s^{-1} : s'ils étaient seuls responsables de la transmission du message entre le point de stimulation et le muscle, la distance de parcours serait donc de 20 cm. Cette distance est nettement supérieure à la distance réelle entre les deux électrodes. Cela implique donc que le message transitant entre le point de stimulation et l'électrode d'enregistrement n'est pas uniquement électrique.

2 DOC. 2 A 5 (*Recenser, extraire et organiser des informations*). Le document 2 nous montre que la synapse neuromusculaire est constituée de deux éléments (nerveux et musculaire) séparés par un espace inférieur à un micron, la fente synaptique. La stimulation du motoneurone entraîne une relocalisation des vésicules

présynaptiques qui fusionnent avec la membrane et déversent leur contenu dans la fente synaptique. Ce contenu est très riche en une substance appelée acétylcholine. Le document 3 nous montre qu'il existe à la surface des fibres musculaires, des récepteurs spécifiques pour cette substance, les récepteurs à l'acétylcholine. On notera que pour obtenir l'image présentée en doc. 3, les récepteurs ont été marqués spécifiquement en utilisant la bungarotoxine couplée à la rhodamine (fluorescence rouge). La bungarotoxine est une toxine protéique présente chez certains serpents venimeux (du genre *Bungarus*). Elle se fixe sur le même site que l'acétylcholine et empêche ainsi la fixation du ligand naturel. Cette liaison entraîne donc une paralysie musculaire, provoquant de fait un arrêt des fonctions pulmonaires et la mort. Les documents 4 et 5 décrivent les modes d'action de deux autres toxines : la toxine botulique et le curare. Elles provoquent toutes deux des paralysies musculaires. Elles agissent à des niveaux différents de la transmission du message nerveux au muscle. En effet, la toxine botulique empêche l'exocytose des vésicules présynaptiques (doc. 4). Le curare empêche la fixation de l'acétylcholine sur son récepteur, en se fixant sur les récepteurs de l'acétylcholine, de la même façon que la bungarotoxine précédemment décrite (doc. 5). Ce sont deux étapes clé de la transmission du message nerveux.

3 DOC. 6 (*Recenser, extraire et organiser des informations*). Le document 6 nous montre la relation entre l'intensité de la stimulation et la quantité d'acétylcholine libérée dans la fente synaptique. On peut constater que plus la stimulation est intense, plus la quantité d'acétylcholine augmente. Ainsi, à ce niveau le message est chimique et codée en concentration de neurotransmetteur.

4 EN CONCLUSION (*Réaliser un schéma fonctionnel*). Voir schéma unité 5 p 339.

UNITÉ 1

La commande volontaire du mouvement

[pp. 346-347 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « L'exploration du cortex cérébral permet de découvrir les aires motrices spécialisées à l'origine des mouvements volontaires »	• Recenser, extraire et exploiter des informations, afin de caractériser les aires motrices cérébrales (doc. 1 à 6).

Conseils et suggestions

– La page d'ouverture du chapitre peut fournir une occasion de faire le point sur les acquis des élèves (programme de 4^e) en ce qui concerne les composants de la commande volontaire du mouvement : récepteurs sensoriels, système nerveux central et périphérique, muscles.

– Les trois premiers documents ont trait à la localisation et à la localisation fonctionnelle de l'aire motrice primaire. Ils peuvent être précédés ou complétés par une activité mettant en œuvre le logiciel EduAnatomist en utilisant la banque de données NeuroPeda, disponible sur le site : http://accs.ens-lyon.fr/accs/ressources/neurosciences/Banquedonnees_logicielneuroimagerie/eduanatomist.

Les données relatives aux sujets 13111 et 13112 permettent d'obtenir les cartes motrices de la main gauche et de la main droite pour les deux sujets. Le réglage de contraste peut servir d'entrée à une discussion sur les aires cérébrales mises en jeu lors d'un mouvement volontaire et leur nécessaire coopération.

– Les trois documents suivants présentent d'autres aires corticales impliquées dans la commande volontaire du mouvement. En accord avec le programme, l'exhaustivité n'a pas été recherchée, on pourra cependant mentionner l'implication d'autres aires corticales (cortex préfrontal) ainsi que d'autres régions du cerveau (ganglions de la base, cervelet ; http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_06/d_06_cr/d_06_cr_mou/d_06_cr_mou.html).

– L'unité peut également être explorée sous l'angle de l'histoire des sciences, notamment à travers les travaux de Fritsch et Hitzig ou encore W. Penfield (<http://www.pbs.org/wgbh/aso/tryit/brain/cortexhistory.html>).

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 À 3 (Recenser, extraire et organiser des informations).

Le document 1 indique que la tumeur, localisée à proximité de l'aire M1, perturbe la réalisation des mouvements volontaires, mais

pas celle des mouvements réflexes. Il apparaît donc que l'aire M1 est nécessaire à la réalisation des mouvements volontaires. On constate sur le document 2 que la zone responsable du mouvement des muscles de l'index au sein de M1 est localisée plus haut que la zone contrôlant les mouvements de la mâchoire. Il apparaît donc que l'aire M1 est organisée en zones contrôlant des groupes de muscles différents. Cette idée est explicitée dans le document 3 qui indique que l'aire M1 est organisée en zones adjacentes au sein du cortex cérébral, les zones inférieures contrôlant les muscles du visage et les zones supérieures les muscles situés en position plus basse sur le corps. Les zones au sein de M1 sont d'autant plus étendues que les muscles contrôlés sont nombreux et nécessitent une motricité fine et coordonnée (par exemple le visage et les doigts). Par ailleurs la partie de M1 localisée dans l'hémisphère gauche contrôle la partie droite du corps et la partie située dans l'hémisphère droit la partie gauche.

2 DOC. 3 A 6 (Recenser, extraire et organiser des informations).

D'après le document 3, il apparaît que M1 est responsable de la commande motrice. Le document 4 précise que l'APM et l'AMS sont nécessaires à la réalisation de certains mouvements volontaires, en particulier lorsqu'il y a nécessité d'un choix. On peut donc penser que ces aires interviennent lors de la phase de préparation du mouvement. Plus précisément, le document 4 montre que l'APM s'active essentiellement lors de la phase de préparation motrice qui précède un mouvement déclenché par une information externe (indice visuel ici). En revanche l'AMS ne s'active que lors de la phase de préparation d'un mouvement déclenché par une information interne (séquence motrice mémorisée). Il apparaît sur le document 5 que des stimulations de l'AMS ou de l'APM entraînent des mouvements inconscients, alors que des stimulations du cortex pariétal entraînent des intentions motrices et des illusions de mouvements. Il apparaît donc que le cortex pariétal est impliqué dans les intentions motrices.

3 EN CONCLUSION (Réaliser un schéma fonctionnel). Voir schéma unité 1 p 354.

UNITÉ 2 Les voies motrices : du cortex aux muscles

[pp. 348-349 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« Les messages nerveux moteurs qui partent du cerveau cheminent par des faisceaux de neurones qui descendent dans la moelle jusqu'aux motoneurones. C'est ce qui explique les effets paralysants des lésions médullaires. Le corps cellulaire du motoneurone reçoit des informations diverses qu'il intègre sous la forme d'un message moteur unique et chaque fibre musculaire reçoit le message d'un seul motoneurone. »	Recenser, extraire et exploiter des informations, afin de caractériser les aires motrices cérébrales (doc. 1 à 6).

Conseils et suggestions

- Cette unité donne l'occasion d'aborder l'étude des voies motrices à travers des exemples médicaux de lésions de la moelle épinière (voir aussi : <http://www.radiologyassistant.nl/en/49021535146c5>) et/ou de pathologies liées à la motricité (**exercice 5**).
- Il est possible de profiter de ce thème pour informer les élèves sur les orientations post-bac en lien avec les métiers de la motricité, comme suggéré dans un atelier du chapitre.
- Le trajet de la voie pyramidale (**doc. 3**) peut être relié à la latéralisation des cartes motrices vue dans l'unité précédente.
- Le rôle intégrateur des motoneurones (**doc. 5**) peut être traité en remobilisant les connaissances acquises au chapitre précédent sur le réflexe myotatique (voir aussi **exercice 1 objectif bac**).
- L'analyse du document 5 peut être avantageusement complétée par l'utilisation du logiciel NERF (téléchargement libre sur le site de l'académie de Toulouse).

Exploitation des documents par les activités

- 1 DOC. 1 À 3** (*Avoir une bonne maîtrise de son corps, recenser, extraire et organiser des informations*). Les documents 1 et 2 nous montrent qu'une lésion de la moelle épinière au niveau

cervical cause une tétraplégie, une lésion plus bas une paraplégie. On peut donc supposer que les nerfs qui contrôlent les membres empruntent la moelle épinière. Lorsque cette dernière est lésée, la transmission du message nerveux du cerveau vers les muscles est altérée : le contrôle volontaire des mouvements devient impossible. Le document 3 confirme cette hypothèse. Les axones des neurones pyramidaux passent tous par le bulbe rachidien, puis se distribuent à différents niveaux de la moelle épinière où ils sont connectés avec des motoneurones.

2 DOC. 4 ET 5 (*Recenser, extraire et organiser des informations*). Les motoneurones reçoivent différentes afférences, en particulier des neurones pyramidaux et des neurones sensoriels. L'arrivée d'un train de potentiels d'actions dans la terminaison synaptique des neurones provoque l'exocytose de vésicules contenant des neuromédiateurs qui sont alors libérés dans la fente synaptique. Ces derniers se fixent sur des récepteurs spécifiques situés sur la membrane du motoneurone. Celui-ci émet alors au niveau de son axone, en fonction des informations qu'il aura donc intégrées, un unique message nerveux.

3 EN CONCLUSION (*Réaliser un schéma fonctionnel*). Voir schéma unité 2 p 354.

UNITÉ 3 Plasticité cérébrale et apprentissage moteur

[pp. 350-351 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
« La comparaison des cartes motrices de plusieurs individus montre des différences importantes. Loin d'être innées, ces différences s'acquièrent au cours du développement, de l'apprentissage des gestes et de l'entraînement. »	Recenser et exploiter des informations afin de mettre en évidence la plasticité du cortex moteur.

Conseils et suggestions

- Cette unité prend appui sur deux techniques majeures dans l'étude des fonctions cérébrales : l'imagerie par résonance magné-

tique fonctionnelle (IRMf) et la stimulation magnétique transcrânienne (SMT).

- On pourra en particulier présenter l'IRM aux élèves en lien avec l'item du programme de physique-chimie de terminale S : ondes et matière/analyse spectrale/spectres RMN du proton.
- Les images obtenues par IRMf (**doc.1**) sont tirées du logiciel *EduAnatomist* en utilisant la banque de données *NeuroPeda*, disponible sur le site de l'INRP. Les données relatives aux sujets 13111 et 13112 ont été utilisées avec une amplitude de contraste 75-100.
- Le logiciel *EduAnatomist* permet la mise en œuvre d'une démarche scientifique. Il propose une banque de données d'IRM anatomiques et d'IRM fonctionnelles correspondantes lors de la réalisation de certaines tâches. À l'élève d'ouvrir les fichiers à partir de la banque *NeuroPeda*, de superposer les images anatomiques et fonctionnelles, d'effectuer les réglages de contraste, puis de localiser les zones actives.
- Il s'agit ici de montrer dans un premier temps (**doc. 1**) que la carte motrice de la main droite présente des différences importantes chez deux individus différents. On cherche ensuite à relier ces différences aux apprentissages moteurs (**doc. 2**) et à caractériser la plasticité mise en jeu (**doc. 3, 4**).

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 (*Percevoir le lien entre sciences et techniques, recenser, extraire et organiser des informations, émettre une hypothèse*). On constate des différences de localisation des régions actives sur les cartes motrices de la main droite chez les sujets 13111 et 13112. On peut proposer que ces différences résultent de différences génétiques et/ou de différences environnementales au sens large, liées par exemple à des apprentissages moteurs spécifiques sollicitant la main droite.

2 DOC. 2 (*Éprouver une hypothèse*). On constate sur les IRMf que les violonistes professionnels présentent une augmentation de l'activation de l'aire motrice primaire lors des mouvements de la main gauche, alors que chez des amateurs l'activation corticale est plus diffuse et étendue à d'autres aires corticales comme l'APM et l'AMS. Il apparaît donc ici que les différences entre les cartes motrices des professionnels et des amateurs est due essentiellement à leur pratique de l'instrument, et donc aux apprentissages moteurs. Ces différences ont donc été acquises au cours de leur entraînement et témoignent de la plasticité du cortex moteur.

3 DOC. 3 ET 4 (*Percevoir le lien entre sciences et techniques, recenser, extraire et organiser des informations*). Les expériences mettent en évidence deux types de modifications corticales liées à l'entraînement. D'une part les cartes motrices des différents muscles de doigts présentent une surface croissante pour la main entraînée d'un jour sur l'autre (expérience 1) et d'une semaine sur l'autre (expérience 2). On peut parler d'apprentissage et de plasticité à long terme. D'autre part on constate que la surface des cartes motrices est également croissante après 20 minutes d'entraînement. Ceci témoigne d'un apprentissage et d'une plasticité à plus court terme.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Ainsi, il apparaît que les différences de cartes motrices interindividuelles peuvent essentiellement s'expliquer par les apprentissages moteurs. Ces apprentissages sont permis par une plasticité du cortex moteur, qui s'exerce à court terme ou à plus long terme. Un apprentissage moteur doit donc être répété régulièrement et sur une longue durée pour entraîner des modifications corticales durables.

UNITÉ 4 Plasticité cérébrale et médecine

[pp. 352-353 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme	Capacités et attitudes mises en œuvre dans l'unité
• « Cette plasticité cérébrale explique aussi les capacités de récupération du cerveau après la perte de fonction accidentelle d'une petite partie du cortex moteur. Les capacités de remaniements se réduisent tout au long de la vie, de même que le nombre de cellules nerveuses. C'est donc un capital à préserver et entretenir. »	• Recenser et exploiter des informations afin de mettre en évidence la plasticité du cortex moteur.

Conseils et suggestions

- Cette unité conçue sous une perspective médicale est l'occasion de développer le chapitre dans sa dimension d'éducation à la santé. Elle fournit également l'occasion d'informer les élèves sur les orientations post-bac en lien avec les métiers de la motricité, comme suggéré dans un atelier du chapitre.
- On peut, dans ce cadre, envisager de faire travailler les élèves en groupe en confrontant chaque groupe à un cas clinique différent,

ou à une étude clinique différente, puis de réaliser une synthèse en fin de séance intégrant les différentes informations.

- L'étude des documents 1 et 2 permet de laisser l'opportunité aux élèves de faire preuve d'attitude critique face aux ressources documentaires. Il est envisageable dans ce cadre de fournir aux différents groupes des documents contradictoires.

(...)

Exploitation des documents par les activités

1 DOC. 1 ET 2 (*Recenser, extraire et organiser des informations, Être capable d'attitude critique face aux ressources documentaires*). Chez des individus âgés de 20 ans, l'amplitude de la contraction musculaire du pouce est globalement plus élevée immédiatement après l'entraînement qu'avant. Elle est légèrement inférieure 30 minutes plus tard. Ces résultats témoignent certainement de l'apprentissage moteur et de la plasticité cérébrale qui lui est associée. Chez les individus âgés de 70 ans, le document 1 ne montre pas de différence significative entre les trois conditions, ce qui tend à témoigner de l'absence d'apprentissage moteur et de plasticité associée. On pourrait donc penser que les capacités de remaniement se réduisent tout au long de la vie, peut-être en lien avec une dégradation des cellules cérébrales.

Le document 2 module fortement ces conclusions. D'après Catherine Vidal, la perte de neurones est mineure avec l'âge (-10 %), même si l'observe une diminution de la connectivité du réseau. De plus certaines expériences montrent au contraire une persistance avec l'âge des capacités de remaniement cortical.

2 DOC. 3 (*Recenser, extraire et organiser des informations, Avoir une bonne maîtrise de son corps*). On constate qu'après leur AVC, les patients récupèrent progressivement leur force motrice au cours du temps: on passe ainsi de 60 % après 2 jours à 75 % après 10 jours. Les IRMf des patients présentent des modifications des cartes

motrices de la main droite (par rapport à une absence de modification pour la main gauche non affectée). On constate une extension des zones corticales mobilisées et en particulier le recrutement de zones situées au sein de l'hémisphère opposé. Ce phénomène témoigne de la plasticité du cortex moteur.

3 DOC. 4 (*Recenser, extraire et organiser des informations, Avoir une bonne maîtrise de son corps*). Suite à une greffe des deux mains, on constate chez le patient un décalage vers le haut des cartes motrices de la main gauche et de la main droite. On peut penser que l'amputation des deux mains avait modifié les cartes motrices en les décalant vers le bas, et que la greffe a restauré les cartes motrices originales. Il s'agit ici encore d'un témoignage de la plasticité cérébrale du cortex moteur.

4 EN CONCLUSION (*Communiquer en rédigeant une synthèse*). Le vieillissement entraîne une légère perte du nombre de neurones et de connexions cérébrales. Il n'est en revanche pas certain que ces modifications entraînent une diminution des capacités de remaniements puisque les résultats de différentes études divergent sur ce point.

Il est en revanche très clair que la plasticité cérébrale est essentielle à la récupération motrice dans les cas d'AVC ou d'amputations suivies de greffes. Le patient est alors confronté à un nouvel apprentissage moteur qui grâce à la plasticité cérébrale permet la récupération motrice.

EXERCICES DU THÈME 6

Les corrigés des exercices des rubriques « *Évaluer ses connaissances* » et « *S'entraîner avec un exercice guidé* » se trouvent à la fin du manuel (p. 366).

Chapitre 1

[pp. 342-344 du manuel]

⑤ LE RÉFLEXE PUPILLAIRE

Utiliser ses connaissances.

Réponses attendues:

1. La réaction de modification du diamètre de la pupille est dépendante d'un stimulus extérieur (la quantité de lumière) rapide, stéréotypée et inconsciente. On peut donc bien la qualifier de réflexe et parler de « réflexe pupillaire ».

Les différents acteurs sont l'œil (récepteur), les muscles constricteurs de l'iris (effecteur), les nerfs oculomoteur (nerf moteur) et optique (nerf sensoriel) et le tronc cérébral (centre nerveux). Le message nerveux sensoriel remonte du nerf optique vers le

tronc cérébral puis une réponse motrice est envoyée aux muscles constricteurs de l'iris via le nerf oculomoteur.

2- Si l'on compare les voies nerveuses des réflexes pupillaire et myotatique, on peut voir dans les deux cas la présence de nerfs sensoriels et moteurs ainsi que d'un centre nerveux. Cependant, neurones sensoriels et moteurs n'empruntent pas les mêmes voies dans le cas du réflexe pupillaire et le centre nerveux diffère (tronc cérébral et non moelle épinière). De plus deux neurones supplémentaires font partie de l'arc réflexe pupillaire, l'un au niveau du tronc cérébral et l'autre à proximité des muscles effecteurs: ainsi ce réflexe implique trois synapses (contre une seule dans le cas du réflexe myotatique, réflexe monosynaptique).

⑥ L'ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT DU NEURONE GRÂCE À UN VER MUTANT

Raisonner.

Réponse attendue:

D'après le document 1, une stimulation des motoneurones de la corde ventrale (centre nerveux) induit un courant mesuré au niveau

de la membrane plasmique du muscle. Ce courant témoigne de mouvements d'ions associés au potentiel d'action musculaire. Il y a donc bien eu dans ce cas, transmission du message nerveux du motoneurone vers le muscle. Lorsque la même expérience est réalisée chez le mutant *unc-13*, aucun courant n'est enregistré : il y a un défaut de la transmission du message nerveux entre le motoneurone et le muscle. Les chercheurs ont quantifié le nombre de vésicules pré synaptiques après stimulation. (doc. 2). Le nombre de vésicules dans la terminaison chez le témoin est bien plus faible (30 environ) que celui du contrôle (80). On peut l'expliquer ainsi : la stimulation a déclenché l'exocytose de la plupart des vésicules chez le témoin et pas chez le mutant. Ainsi, le défaut de la transmission synaptique observée chez le mutant *unc-13* s'explique par l'absence ou le déficit d'exocytose de neurotransmetteur suite à une stimulation. On peut supposer que le gène *unc-13* est impliqué dans le processus cellulaire d'exocytose.

⑦ UNE MALADIE NEUROMUSCULAIRE : LA MYASTHÉNIE

Observer et raisonner.

Réponse attendue :

Les personnes myasthéniques souffrent de fatigue musculaire, de diplopie et de ptosis. L'ensemble de ces problèmes laisse penser à un problème neuromusculaire. En comparant les électroneurographies d'un sujet sain et d'un patient myasthénique, on s'aperçoit que ces derniers présentent un moins grand nombre de récepteurs à l'acétylcholine. Cette différence de nombre de récepteurs pourrait expliquer le fait que leurs muscles soient plus facilement fatigables que ceux des sujets sains. En effet, elle pourrait être responsable d'une moins bonne efficacité des plaques motrices des patients myasthéniques et expliquer les troubles neuromusculaires observés.

⑧ LA HERNIE DISCALE

Raisonner et construire un schéma.

Réponse attendue :

Les patients atteints de hernie discale présentent une saillie au niveau du nucleus pulposus. Celui-ci peut alors appuyer, comme le document le montre, sur les racines des nerfs rachidiens à proximité de la moelle épinière. Or ce sont ces racines qui participent au bon déroulement du réflexe achilléen. La racine dorsale fait remonter les informations sensorielles et la racine ventrale envoie le message moteur aux muscles. Le fait que le nucleus pulpeus appuie potentiellement sur les racines des nerfs peut entraîner une altération du réflexe normal voire une absence totale de celui-ci si les informations nerveuses sont complètement bloquées par la hernie.

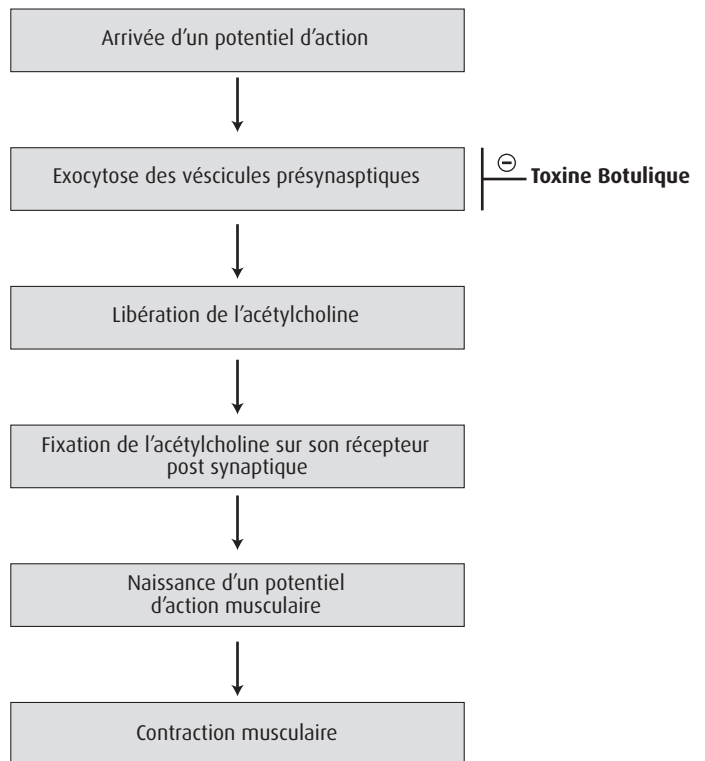
⑨ LE MYSTÈRE DE LA TOXINE BOTULIQUE

Réaliser un schéma fonctionnel.

Réponse attendue :

En présence de la toxine botulique, l'acétylcholine n'est plus libérée par exocytose : le message nerveux n'est pas transmis à la cellule musculaire et sa contraction est inhibée. Ceci explique donc que la toxine botulique puisse inhiber des mouvements anormaux ou contrecarrer l'hypertonie. De même, en inhibant les muscles de la peau, la toxine botulique peut permettre de lutter contre les rides.

Mais, la toxine possède un spectre d'action très large, et tous les muscles du corps y sont sensibles, c'est pourquoi elle peut entraîner la mort par paralysie (c'est un des poisons les plus puissants, 140 000 fois plus puissant que le curare). Aussi chacune de ces applications médicales implique un traitement très local (par injection) et l'utilisation de doses très faibles de toxine.



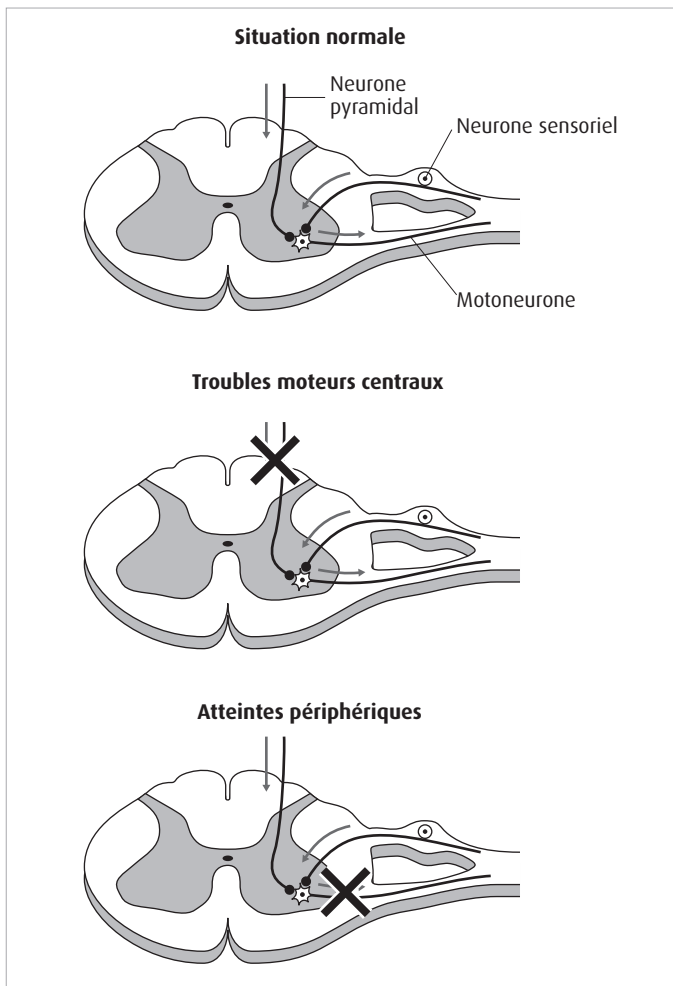
(...)

⑤ UNE GRAVE MALADIE DU SYSTÈME MOTEUR

Mettre en relation des observations avec ses connaissances.

Réponses attendues :

1.



2. Les atteintes périphériques sont dues à la dégénérescence des motoneurones. Or les motoneurones permettent les mouvements musculaires volontaires et réflexes. La diminution du nombre de motoneurones entraîne donc une baisse des réflexes et du tonus musculaire, une faiblesse et à terme une atrophie musculaire.

Les troubles moteurs centraux sont dus à une dégénérescence des neurones pyramidaux. Or ces neurones sont responsables du contrôle des mouvements volontaires. Il est donc logique de constater une faiblesse musculaire chez les patients, lors des mouvements volontaires. Cependant, les mouvements réflexes et le tonus musculaire sont accrus, ce qui empêche certainement l'atrophie des muscles. Il semble donc que les neurones pyramidaux exercent une influence globalement inhibitrice sur les motoneurones, qui disparaît lors de leur dégénérescence. Les motoneurones intègrent donc des informations d'au moins deux sources différentes : les neurones pyramidaux et les neurones sensoriels impliqués dans les réflexes.

⑥ LE FONCTIONNEMENT D'UN NEURONE DE L'AIRE PRÉMOTRICE

Analyser une expérience.

Réponses attendues :

1. Le premier carré lumineux qui apparaît en (1) ne sert qu'à focaliser l'attention du singe. Ce n'est que le second carré (2) qui lui indique dans quel sens réaliser le mouvement. La phase de préparation du mouvement intervient donc à partir du moment (2) et jusqu'à son exécution (3).

2. Lorsqu'un carré vert apparaît, requérant un mouvement vers la droite, le neurone étudié émet entre 25 et 50 potentiels d'actions par seconde. Si un carré rouge apparaît, demandant un mouvement vers la gauche, son activité est quasiment nulle. Ainsi, le neurone de l'aire prémotrice étudié semble spécialisé dans la préparation des mouvements dirigés vers la droite.

Objectif BAC

[pp. 360-361 du manuel]

1. Le réflexe myotatique, un outil diagnostique

Éléments attendus :

- Définition du réflexe myotatique
- Neurones sensoriels : localisation des corps cellulaires et des prolongements, connexions (fuseau neuromusculaire)
- Motoneurones : localisation des corps cellulaires et des prolongements, connexions (synapses avec neurones sensoriels, plaque motrice, notion d'unité motrice), rôle intégrateur
- Fonctionnement de l'arc réflexe
- Influence des neurones pyramidaux

Exemples de plan :

I- Les éléments constitutifs de l'arc réflexe

II- Le réflexe myotatique et l'intégrité du système neuromusculaire
OU

I- Diagnostic du système récepteur (fuseau neuromusculaire - neurone sensoriel)

II- Diagnostic du système intégrateur et du système de commande (motoneurone - afférences des neurones pyramidaux)

III- Diagnostic du système effecteur (motricité musculaire)

2. Les expériences historiques de Claude Bernard sur le curare

Exploiter des résultats expérimentaux.

Réponses attendues :

1- d

2- c

3- b

3. Le syndrome de la main étrangère

Résoudre un problème scientifique.

Réponses attendues :

Doc. 1. Lorsque le patient P réalise un mouvement volontaire de la main gauche, l'APM, l'AMS et M1 sont actives.

Doc. 2. Lorsque le patient P réalise un mouvement étranger de la main gauche, seule l'aire M1 semble être active.

Doc. 3. Le document 3 confirme que l'activation de M1 est identique (3UA) dans les deux cas, en revanche, l'activation de l'APM est très inférieure lors d'un mouvement étranger : 0,5UA contre 6UA pour un mouvement volontaire.

Doc. 4. L'aire M1 est activée de façon globalement similaire lors d'un mouvement volontaire et lors d'un mouvement étranger.

Conclusion.

On peut ainsi formuler l'hypothèse que les mouvements étrangers du patient P sont dus à une activité « automatique » de M1, due au manque d'activation de l'APM. On peut également supposer que c'est l'AVC subi par le patient qui a fortement perturbé la commande volontaire du mouvement.

BIBLIOGRAPHIE

– Kandel ER. *et al.*

Principles of neural science Mc GRAW HILL

– Marieb EN.

Anatomie et physiologie humaine PEARSON

– Purves et al.

Neurosciences DE BOECK

THÈME 1

Chapitre 1

Caryotypes	http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/svt/format/qualif/capesint98/cintbio98.htm	Tableau récapitulant le nombre de chromosomes dans le caryotype de différents êtres vivants
Drosophile	http://www.yale.edu/ynhti/curriculum/units/1996/5/96.05.01.x.html	Quelques données sur la drosophile
Coupe d'anthère de lis	www.ac-grenoble.fr/disciplines/svt/file/TS_Fich-antheres-lis.doc	Protocole pour réaliser une coupe d'anthère de Lis en classe
Préparation testicules criquet-1	www.ac-grenoble.fr/disciplines/svt/file/TS_Fich-criquet.doc	Protocole pour réaliser une préparation microscopique de testicules de criquets fraîchement tués.
Préparation testicules criquet-2	http://espace-svt.ac-rennes.fr/applic/meiose/criquet1/criquet03.htm	Protocole pour réaliser une préparation microscopique de testicules de criquets fraîchement tués.
Ovocyte de souris en anaphase I	http://igdr.univ-rennes1.fr/equipes/recherche_equipe.php?domaine=&equipe=44&resp_equipe=	Une photo d'ovocyte de souris en anaphase I
La méiose chez le Criquet	http://jean-jacques.auclair.pagesperso-orange.fr/banque/banq.htm#meiose	Des photos de méiose chez le Criquet
Une animation de méiose	http://genet.univ-tours.fr/gen000100_fichiers/meiose.HTM	
Le test du Khi-deux	http://www.statistix.fr/IMG/pdf/drosophiles-caen3.pdf	Application du test du Khi-deux : Test-cross et adéquation à une loi de probabilité équirépartie
Drososfly	http://www.inforef.be/swi/drosolab.htm	Aide à l'utilisation du logiciel Drososfly
Fécondation oursin	http://www.snv.jussieu.fr/vie/dossiers/oursin/oursinfec.htm	Observation en microscopie optique d'une fécondation réalisée chez l'oursin.
Fécondation in vitro	http://www.fivfrance.com/	Informations et video sur la FIV

Chapitres 2 et 3

Duplication des gènes - évolution	http://www.larecherche.fr/content/recherche/article?id=25131	Un article de la Recherche précisant l'importance de la duplication des gènes dans l'évolution des génomes
Base de données UNIPROT	http://www.uniprot.org/	UniProt (base de données universelle de protéines) est la plus grande des bases de données informatique pour les protéines de tous les organismes vivants et des virus.

Chapitre 4

Caryotypes	http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/svt/program/fichacti/fichs/chromo/debut.htm	Exercice de comparaison des caryotypes de l'Homme et du chimpanzé
Homme et chimpanzé	http://www.canal-u.tv/video/universite_de_tous_les_savoirs/l_homme_et_le_singe_michel_morange.3800	La question des différences génétiques entre l'Homme et le chimpanzé : une conférence en ligne du Pr. Morange
Le logiciel «Lignée humaine»	http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/lycee/perez/evolution/ligsomm.htm	Étude virtuelle des caractères crâniens logiciel « Lignée humaine » (Perez et Guchereau)

La bipédie	http://www.inrp.fr/Acces/biotic//evolut/homme/html/bipedie.htm	Nombreuses informations sur la bipédie et sur ses origines
La diversité des homo	www.hominides.com	Informations et dossiers sur la diversité passée des primates de la lignée humaine
Le logiciel HOMININES dans Google earth	http://www.svt.ac-versailles.fr/spip.php?article304	Banque de données, permet à l'élève de parcourir, sur une carte du monde, les sites de découverte des fossiles d'Homininés et d'analyser les données disponibles.

THÈME 2

Chapitre 2

La morphogénèse végétale	http://www.inrp.fr/Acces/biotic/morpho/html/phmutarab.htm	
Arabidopsis thaliana	http://www.versailles-grignon.inra.fr/serre_expo/expo_temporaire/expo/fiches_plantes/fiche_arabidopsis	Site de l'INRA présentant Arabidopsis thaliana et son utilisation en recherche
Le modèle ABC	http://accs.ens-lyon.fr/accs/ressources/dyna/developpement/enseigner/morphogenese-vegetale/morphogenese-florale/le-modele-abc/	Exemple de quatre activités d'enseignement autour du modèle ABC proposé sur le site d'Acces
Germination du grain de pollen	http://svt.ac-reunion.fr/ressources/regionales/site_apoi/apoi4/4ch5_seq1_act2/4ch5_seq1_act2.htm	Protocole de germination du grain de pollen in vitro et observations
Pollinisation de la sauge	http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Pollinisation/sauge1.htm	Démonstration expérimentale du mécanisme de dépôt du pollen sur le corps des insectes
Coévolution - PLS	http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/f/fiche-article-coevoluer-pour-survivre-21182.php	Un article de Pour la Science sur la notion générale de coévolution
Dissémination des graines	http://www.larecherche.fr/content/recherche/article?id=8999	Un article de La Recherche, présentant différentes stratégies de dissémination des graines ou fruits

THÈME 3

Chapitre 1

Remontée du bouclier scandinave	http://whc.unesco.org/fr/list/898	Des données sur l'archipel de Kvarken (Finlande) et la Haute Côte (Suède), situés dans le golfe de Botnie
Données GPS	http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html	Des données GPS des différentes stations
Traiter des données GPS	http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/biologie/spip.php?article179	Une fiche qui explique comment traiter des données GPS avec Excel
Modélisation de l'isostasie	http://www.geo.cornell.edu/hawaii/220/PRI/isostasy.html	Une modélisation numérique de l'isostasie, utilisable avec les élèves sur le site de l'université de Cornell
La mesure du temps en géologie	http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-sgf-2004-Labrousse.xml	Une conférence en ligne sur le temps et sa mesure proposée par Loïc Labrousse
Rb/Sr - granite du Massif Central	http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-datations-massif-central.xml	Des données sur les rapports isotopiques Rb/Sr de divers échantillons de granites du Massif Central

Chronorad	http://www.labosvt.com/download-file-10.html	Logiciel permettant de calculer l'âge d'échantillons de roche par la méthode de la droite isochrone
Séismes et Moho	http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/biologie/spip.php?article176	Données sur des séismes dans les Alpes (permettant le calcul de la profondeur du Moho)

Chapitre 2

Un atlas géologique des Alpes françaises	http://www.geol-alp.com/	Panorama très complet des Alpes (des extraits de cartes géologiques sont disponibles)
Le Haut lieu tectonique suisse Sardona	http://whc.unesco.org/fr/list/1179	Site de l'UNESCO présentant l'intérêt géologique du Haut lieu tectonique suisse Sardona
Sardona	http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/topics/geology/viageoalpina/VGA_Sardona.html	Des informations complémentaires sur Sardona sur le site de l'Office fédéral de Topographie Swisstopo
Nappes et chevauchements	http://cirquedebarroza.free.fr/formpyr1.htm	Des informations sur les principales nappes et chevauchements dans les Alpes ou les Pyrénées, avec photos et schémas
Microscope polarisant	http://www.ac-grenoble.fr/svt/SITE/prof/outils/mineralo/menuprincipal.htm	Des conseils techniques pour l'utilisation du microscope polarisant
Centre Briançonnais de Géologie Alpine	http://cbga.net	
Le site de Christian Nicollet	http://christian.nicollet.free.fr	De nombreuses photos de roches et de paysages
Détermination des roches	www.lithotheque.site.ac-strasbourg.fr	Une clé de détermination des roches
Détermination des minéraux	http://www.ac-grenoble.fr/svt/SITE/prof/outils/mineralo/menuprincipal.htm	Une clé de détermination des minéraux observés au microscope polarisant
Un atlas des minéraux	http://webmineral.brgm.fr:8003/mineraux/main.html	
La coésite de l'Himalaya	http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/objets/img_sem/XML/db/planetterre/metadata/LOM-Img41-2003-05-12.xml	Analyse minéralogique et reconstitution historique
Un profil sismique interprété des Pyrénées	http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/geoltheque/pages/lhers/plusloin6-1.htm	

Chapitre 3

La convection mantellique	http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planet-terre/metadata/LOM-convection-mantellique-tectonique-plaques.xml	« La convection mantellique, moteur de la tectonique des plaques, si souvent évoquée, si souvent mal comprise » par Pierre Thomas
La tectonique des plaques	http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planet-terre/metadata/LOM-tectonique-plaques-1970-2011.xml	« La tectonique des plaques de 1970 à 2011 : qu'est-ce qui a changé dans le modèle et n'a pas (assez) changé dans sa transmission depuis l'époque des pères fondateurs » par Pierre Thomas et Olivier Dequincey
Le Batholithe de la Sierra Nevada	http://christian.nicollet.free.fr/page/enseignement/LicenceSN/SNevada.html	
Les granitoïdes	http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/search_exist?SearchableText=granite&fuzzy=0	
Vallée Yosemite -1	http://virtual.yosemite.cc.ca.us/ghayes/geology.htm	Carte géologique de la vallée Yosemite
Vallée Yosemite -2	http://virtual.yosemite.cc.ca.us/ghayes/roadside.htm	Un itinéraire géologique virtuel de la vallée Yosemite

Chapitre 4

La croûte continentale	http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planet-terre/metadata/LOM-croissance-continentale1.xml	Un article d'Hervé Martin sur la formation et la destruction de la croûte continentale
-------------------------------	---	--

Cartes topographiques françaises	http://www.cartes-topographiques.fr/France.htm	Permet d'obtenir des profils topographiques
Géodynamique de l'arc alpin	http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00008598/en/	La thèse de Sébastien Delacou traitant de la géodynamique actuelle de l'arc alpin
Alpes - tectonique actuelle : rôle de l'extension	http://www.delacou-bkd.net/Geol_Alpes_TectoActu.html	Page réalisée sur la base de la thèse de doctorat de Bastien Delacou

THÈME 4

Chapitre 1

La centrale pilote de Soultz	http://www.geothermie-soultz.fr/	Site sur la centrale pilote de Soultz ; propose des supports pédagogiques
Échanges de chaleur à la surface terrestre	http://uwacadweb.uwyo.edu/JSHINKER/animations/global/	Site anglais présentant de nombreuses animations sur le climat global
La convection	http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosgeol/01_decouvrir/03_convection/02_lab0/00a.htm	Site du CNRS présentant des modèles d'étude de la convection en laboratoire

THÈME 5

Chapitre 1

Cellule dendritique et phagocytose	http://wn.com/A_dermal_dendrite_cell_containing_multiple_vacuoles_capturing_an_Leishmania_parasite	Extrait de l'article Migratory Dermal Dendritic Cells Act as Rapid Sensors of Protozoan Parasites. Lai Guan Ng <i>et al.</i> PLoS Pathogens. Vol. 4, no. 11 (2008).
Rhumatisme inflammatoire	http://www.cri-net.com/	Le site du CRI (Le Club Rhumatismes et Inflammations) dont le but est de favoriser la diffusion des connaissances en matière d'affections rhumatologiques inflammatoires et immunologiques
TLR3	http://www.youtube.com/watch?v=qT6PVR5MNE	Structure animée du récepteur TLR3
TLR4	http://www.youtube.com/watch?v=t_0pt7QIE2U	Structure animée du récepteur TLR4
La migration des leucocytes	http://www.youtube.com/watch?v=yKW4F0Nu-UY	Animation issue du site Inner Life Of A Cell
Les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin	http://www.inserm.fr/thematiques/circulation-metabolisme-nutrition/dossiers-d-information/les-maladies-inflammatoires-chroniques-de-l-intestin-mici	Dossier réalisé par l'INSERM (syndrome, traitements, recherches)
Les anti-TNFalpha.	http://www.lesantitnf.fr/	Source d'informations sur le médicament anti-TNFalpha pour les malades et les médecins
Rhumatologie	http://sfr.larhumatologie.fr	Site de la SFR (société française de rhumatologie)

Chapitre 2

Ouchterlony	http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/ATP/immu2.htm	Le protocole complet de la méthode de double diffusion en gel d'Ouchterlony
GenBank	www.ncbi.nlm.nih.gov/protein	Le site GenBank : permet de se procurer les séquences peptidiques de différents anticorps anti-grippe

Le logiciel ClustalW2	www.ebi.ac.uk/Tools/msa/clustalw2	Logiciel permettant de réaliser l'alignement des séquences peptidiques et leur comparaison
1QFU.pdb	http://www.rcsb.org/pdb/explore.do?structureId=1QFU	Le site du NCBI permettant de télécharger le fichier pdb 1QFU.pdb
Le logiciel Rastop	http://www.inrp.fr/Access/biotic/rastop/accueil.htm	Un logiciel de visualisation des molécules en 3D
Le logiciel « Immunologie »	http://svt67.free.fr/immuno.htm	Présente la chronologie des événements cellulaires, notamment lors de la sélection clonale, est mise en animation
Rapport ONUSIDA	http://www.unaids.org/fr/resources/publications/2011/	Le point sur l'évolution de la pandémie de sida

Chapitre 3

Le logiciel NetBioDyn	http://acces.ens-lyon.fr/acces/ressources/sante/reponse-immunitaire/ressources/biodyn/	NetBioDyn est un environnement permettant la modélisation et la simulation de mécanismes biologiques complexes
Le logiciel gratuit Immsim	http://www.immsim.org/	Permet d'afficher des graphes montrant l'évolution des effectifs de certaines cellules ou molécules au cours de la réponse immunitaire humorale consécutivement à l'injection d'un antigène
Un vaccin contre le cancer	http://www.provenge.com/advanced-prostate-cancer-the-rapy.aspx	Site commercial de la société productrice du vaccin contre le cancer (provenge)
Bulletin du National Cancer Institute	www.cancer.gov/ncicancerbulletin	Site du ministère américain de la santé permettant d'aborder le volet institutionnel

THÈME 6

Chapitre 1

Le logiciel Sherrington	http://www.ac-nice.fr/svt/productions/fiche.php?numero=25	Logiciel basé sur l'expérience de Sherrington
--------------------------------	---	---

Chapitre 2

La cartographie cérébrale	http://www.cerebromente.org.br/n18/history/stimulation_i.htm	Historique de la stimulation électrique du cerveau et de la cartographie cérébrale
Penfield	http://www.pbs.org/wgbh/aso/tryit/brain/cortexhistory.html	Historique de la cartographie du cortex moteur + activité animée retraçant les expériences de W. Penfield
Le cerveau (McGill)	http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_06/d_06_cr/d_06_cr_mou/d_06_cr_mou.html	Le site de l'université de McGill sur le cerveau, très riche en documents et en liens
La SMT	http://groups.csail.mit.edu/vision/medical-vision/surgery/tms.html	Page fournissant des précisions sur la technique de SMT
Les aires motrices corticales	http://imedecin.com/Article443.htm	Organisation des aires motrices corticales
La plasticité cérébrale	http://campus.neurochirurgie.fr/richmedias/rmp.php?congres=200711_jne&cible=list_duffau	Conférence en ligne de Hugues Duffau sur les applications neurochirurgicales de la plasticité cérébrale
Des lésions de la moelle épinière	http://www.radiologyassistant.nl/en/49021535146c5	Une variété d'exemples de lésions de la moelle épinière

l'IRMf et ses limites	http://classic.the-scientist.com/article/display/14229/	Article sur les limites de l'IRMf dans l'étude du cerveau
La motricité	http://www.peterdeli.com/uni/wiki/index.php?title=Cours_71102_du_mardi_2011.05.17&redirect=no	Cours de médecine sur la motricité
Logiciel Eduanatomist	http://acces.ens-lyon.fr/acces/ressources/neurosciences/Banquedonnees_logicielneuroimagerie/eduanatomist	Logiciel de visualisation des données de neuroimagerie
Logiciel Nerf	http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/lycee/perez/PP_logo/logiciels.htm	Permet de visualiser diverses formes de codage du message nerveux

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

La plupart des articles scientifiques utilisés dans le manuel sont disponibles gratuitement et téléchargeables au format pdf. Pour les retrouver, vous pouvez utiliser les moteurs de recherche bibliographique suivant :

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>

<http://scholar.google.fr/>

THÈME 1 Génétique, diversification et évolution du vivant

CHAPITRE 1 Brassage génétique et diversification des génomes

Unité 2

Doc. 2 p. 21

Counting cross-overs: characterizing meiotic recombination in mammals. Hassold T, Sherman S, Hunt P. *Hum. Mol. Genet. Vol. 9, No 16, pp. 2409-2419 (2000).*

Doc. 3 p. 21

Active role of lagging chromosomes in spindle collapse as revealed by live phase contrast and tubulin immunostaining in grasshopper spermatocytes. E. Rebollo and P. Arana. *Chromosoma, Vol. 110, No 4, pp. 292-304 (2001).*

Unité 5

Doc. 1 p. 26

Drosophila I-R hybrid dysgenesis is associated with catastrophic meiosis and abnormal zygote formation. Orsi GA, Joyce EF, Couble P, McKim KS, Loppin B. *J Cell Sci. Vol 123, pp. 3515-24 (2010).*

Unité 6

Doc. 4 p. 29

Cytogenetic analyses of human oocytes provide new data on non-disjunction mechanisms and the origin of trisomy 16. Garcia-Cruz R. et al. *Human Reproduction, Vol. 25, No.1 pp. 179-191 (2010).*

Doc. 5 p. 29

Âge maternel et anomalies chromosomiques dans les ovocytes humains. Pellestor F. *Med. Sci. (Paris). Vol. 20, No 6-7, pp. 691-696 (2004).*

Exercices

Exercice 7 p. 38

Proof That Bar Changes to Not-Bar by Unequal Crossing-Over. L. V. Morgan *PNAS. Vol. 17, No 5, pp. 270-272 (1931).*

The Effects of Unequal Crossing over at the Bar Locus in Drosophila. Sturtevant AH. *Genetics. Vol. 10, No 2, pp. 117-47 (1925).*

CHAPITRE 2 La diversification du vivant

Unité 1

Doc. 2 p. 40

Mutations in HOXD13 Underlie Syndactyly Type V and a Novel Brachydactyly-Syndactyly Syndrome. *The American Journal of Human Genetics. Vol. 80 (2007).*

Doc. 5 et 6 p. 41

Bmp4 and Morphological Variation of Beaks in Darwin's Finches. *Science. Vol. 305 (2004).*

Unité 2

Doc. 1 p. 42

Syncytin is a captive retroviral envelope protein involved in human placental morphogenesis. *Nature. Vol 403 (2000).*

Unité 5

Doc. 1 p. 48

Newly-acquired pre-cultural behavior of the natural troop of Japanese monkeys on Koshima Islet. Kawai M. *Primates. Vol. 6, pp. 1-30 (1965).*

Doc. 3 et 4 p. 49

Culturally Transmitted Patterns of Vocal Behavior in Sparrows. Peter Marler, Miwako Tamura, *Science, Vol. 146, No 3650, pp. 1483-1486 (1964).*

Exercices

Exercice 7 p. 56

High-frequency conjugative transfer of antibiotic resistance genes to *Yersinia pestis* in the flea midgut. B. Joseph Hinnebusch et al. *Molecular Microbiology. Vol 2, pp. 349-354 (2002).*

CHAPITRE ③ De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité

Unité 1

Doc. 1 p. 58

An Experimental Study of Interaction between Genetic Drift and Natural Selection. Theodosius Dobzhansky and Olga Pavlovsky. *Evolution*. Vol. 11, No 3, pp. 311-319 (1957).

Doc. 4, 5, 6 et 7 p. 59

What Darwin's Finches Can Teach Us about the Evolutionary Origin and Regulation of Biodiversity. B. R. Grant and P. R. Grant. *BioScience*. Vol. 53, No 10 (2003).

Unité 3

Doc. 5 p. 63

Experiments on Sexual Isolation in *Drosophila*. Reproductive Isolation Between *Drosophila Pseudoobscura* and *Drosophila Persimilis* Under Natural and Under Laboratory Conditions Theodosius Dobzhansky. *PNAS*. Vol. 37, No 12, pp. 792-796 (1951).

Exercices

Ex. 8 p. 70

Genetic consequences of sequential founder events by an island-colonizing bird. Sonya M. Clegg, Sandie M. Degnan, Jiro Kikkawa, Craig Moritz, Arnaud Estoup, and Ian P. F. Owens. *PNAS*. Vol. 99, No 12, pp. 8127-8132 (2002).

CHAPITRE ④ Un regard sur l'évolution de l'homme

Unité 3

Doc. 2 p. 76

Initial sequence of the chimpanzee genome and comparison with the human genome. The Chimpanzee Sequencing and Analysis Consortium. *Nature*. Vol. 437, pp. 69-87 (2005).

Doc. 4 p. 77

Evolution of primate gene expression. Philipp Khaitovich, Wolfgang Enard, Michael Lachmann & Svante Pääbo. *Nature Reviews Genetics*. Vol. 7, pp. 693-702 (2006).

Parallel Patterns of Evolution in the Genomes and Transcriptomes of Humans and Chimpanzees. Khaitovich, et al. *Science*. Vol. 309, pp. 1850-1854 (2005).

Doc. 5 p. 77

Transcriptional neoteny in the human brain. *PNAS*. Vol. 106, No 14, pp. 5743-5748 (2009).

Unité 4

Doc. 2 p. 78

Sox9 is required for determination of the chondrogenic cell lineage in the cranial neural crest. Yuko Mori-Akiyama et al. *PNAS*. Vol. 100, No 16, pp 9360-9365 (2003).

Doc. 6 p.79

L'Homme, le Singe et l'outil : question de culture ? Christophe Boesh, in Aux origines de l'Humain, Vol. 2, pp170-199, Editions Fayard, (2001)

Unité 7

Doc 2 p. 85

A new small-bodied hominin from the Late Pleistocene of Flores, Indonesia. Brown P. et al. *Nature*. Vol. 431, pp. 1055-61 (2004).

Archaeology and age of a new hominin from Flores in eastern Indonesia. Morwood MJ et al. *Nature*. Vol. 431, pp. 1087-91 (2004).

The primitive wrist of *Homo floresiensis* and its implications for hominin evolution. Tocheri MW et al. *Science*. Vol. 317, pp. 1743-5 (2007).

Craniometric ratios of microcephaly and LB1, *Homo floresiensis*, using MRI and endocasts. Robert C. Vannucci, Todd F. Barron and Ralph L. Holloway. *PNAS*. Vol. 108, No 34, pp. 14043-1404 (2011).

Doc. 3 p. 85

A draft sequence of the neandertal genome. Richard E. Green et al. *Science*, Vol. 328, pp. 710-722 (2010)

Exercices

Exercice 3 p. 90

Gene-culture coevolution between cattle milk protein genes and human lactase genes. *Nature Genetics*. Vol. 35, No 4 (2003).

The ADH1B Arg47His polymorphism in East Asian populations and expansion of rice domestication in history. Peng et al. *BMC Evolutionary Biology*. Vol. 10, No 15 (2010).

Exercice 5 p. 91

Support from the relationship of genetic and geographic distance in human populations for a serial founder effect originating in Africa. Sohini Ramachandran et al. *PNAS*, Vol 102, pp. 15942-15947 (2005)
Phonemic diversity support a serial founder effect model of language expansion from Africa. Quentin D. Atkinson. *Science*, Vol. 322, pp. 346-349 (2011).

Unité 2

Doc. 5 et 6 p. 105

The role of nutrient availability in regulating root architecture. Jose Lopez-Bucio, Alfredo Cruz-Ramirez and Luis Herrera-Estrella. *Current*

Relation entre organisation et mode de vie des plantes à fleur

CHAPITRE 1 Organisation des plantes à fleurs et vie fixée

Opinion in Plant Biology. Vol. 6, pp. 280–287 (2003).

Different Pathways Are Involved in Phosphate and Iron Stress-Induced Alterations of Root Epidermal Cell Development. Wolfgang Schmidt and Adam Schikora. *Plant Physiology. Vol. 125, pp. 2078–2084 (2001).*

Unité 3

Doc. 3 p. 106

A xylem sap retrieval pathway in rice leaf blades: évidence of a role for endocytosis? C. E. J. Botha et al. *Journal of Experimental Botany. Vol. 59, No 11, pp. 2945–2954 (2008).*

Doc. 5 p. 107

52 Fe Translocation in Barley as Monitored by a Positron-Emitting Tracer Imaging System (PETIS): Evidence for the Direct Translocation of Fe from Roots to Young Leaves via Phloem Takashi Tsukamoto et al. *Plant Cell Physiol. Vol. 50, No 1, pp. 48–57 (2009).*

Unité 4

Doc. 1 p. 108

Mortalities in kudu (*Tragelapbus strepsiceros*) populations related

to chemical defence in trees. Wouter van HOVEN. *Journal of African Zoology. Vol. 105, pp. 141–145 (1991).*

Exercices

Exercice 5 p. 115

Flavonoids Can Protect Maize DNA from the Induction of Ultraviolet Radiation Damage.

Ann E. Stapleton and Virginia Walbot. *Plant Physiol. Vol. 105, pp. 881–889 (1994).*

Exercice 6 p. 115

Systemin activates synthesis of wound-inducible tomato leaf polyphenol oxidase via the octadecanoid défense signaling pathway C. Peter Constabel et al. *PNAS. Vol. 92, pp. 407–411 (1995).*

Exercice 8 p. 116

Estimating Starch Content in Roots of Deciduous Trees-A Visual Technique. Philip M. Wargo. *Res. Pap. NE-313. Upper Darby, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station (1975).*

CHAPITRE 2 Reproduction des plantes à fleurs et vie fixée

Unité 1

Doc. 3 p. 119

Function and regulation of the Arabidopsis floral homeotic gene PISTILLATA. K Goto and E M Meyerowitz. *Genes Dev. Vol. 8, pp. 1548–1560 (1994).*

Unité 3

Doc. 6 p. 123

The geographical mosaic of coevolution in a plant-pollinator mutualism. Bruce Anderson and Steven D. Johnson. *Evolution. Vol. 62, No 1, pp. 220–225 (2007).*

Exploitation of a specialized mutualism by a deceptive orchid. Bruce Anderson, Steven D. Johnson and Clinton Carbutt. *American Journal of Botany. Vol. 92, No 8, pp. 1342–1349 (2005).*

Unité 4

Doc. 1 p. 124

Seed Dispersal and Spatial Pattern in Tropical Trees. Tristram G. Seidler, Joshua B. Plotkin. *PLoS Biol. Vol. 4, No 11 (2006).*

Exercices

Exercice 4 p. 130

Hormone and Seed-Specific Regulation of Pea Fruit Growth. Jocelyn A. Ozga, Rika van Huizen, and Dennis M. Reinecke. *Plant Physiology. Vol. 128, pp. 1379–1389 (2002).*

Exercice 6 p. 131

A key role for floral scent in a wasp-pollination system in *Eucomis* (Hyacinthaceae). A. Shuttleworth and S. D. Johnson. *Annals of Botany. Vol. 103, pp. 715–725 (2009).*

Objectif BAC

Exercice 3 p. 132

Seed odor mediates an obligate ant-plant mutualism in Amazonian rainforests. Youngsteadt E, Nojima S, Häberlein C, Schulz S, Schall C. *PNAS. Vol. 105, No 12, pp. 4571–5 (2008).*

Exercice 4 p. 133

Role of Endogenous Abscissic Acid in Potato Microtuber Dormancy. J. C. Suttle and J. F. Hultstrand. *Plant Physiol. Vol. 105, No 3, pp. 891–896 (1994).*

THÈME 2

Le domaine continental et sa dynamique

CHAPITRE 1 Caractérisation du domaine continental

Unité 1

Doc. 3 p. 144

Geodetic constraints on glacial isostatic adjustment in Europe. Nocquet et al. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L06308, doi:10.1029/2004GL022174 (2005).

CHAPITRE 2 La formation des chaînes de montagnes

Unité 4

Doc. 2 p. 170

Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma. Chang Li et al. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 274, pp. 157-168 (2008).

Exercices

Exercice 6 p. 179

On the relative importance of the driving forces of plates motion. Forsyth D. et Uyeda S. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* Vol. 43, pp. 163-200 (1975).

CHAPITRE 3 La production de nouveaux matériaux continentaux

Unité 4

Doc. 1 p. 188

Dynamic Magma Systems, Crustal Recycling, and Alteration in the Central Sierra Nevada Batholith : the Oxygen Isotope Record. Lackey J. S. et al. *J. Petrology*. Vol. 49, No 7, pp. 1397-1426 (2008).

Exercices

Exercice 5 p. 197

Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. Martin H. *Geology*. Vol. 14, pp. 753-756 (1986).

THÈME 4

Enjeux planétaires contemporains

CHAPITRE 2 La plante domestiquée

Unité 1

Doc. 5 p. 243

Contrasting Patterns in Crop Domestication and Domestication Rates: Recent Archaeobotanical Insights from the Old World. D. Q Fuller. *Annals of Botany*. Vol. 100, pp. 903-924 (2007).

Doc. 2 et 3 p. 245

Genetics and geography of wild cereal domestication in the near east. Salamini F. et al. *Nat Rev Genet*. Vol. 3, No 6, pp. 429-41 (2002).

Unité 3

Doc. 1, 2 et 3 p. 246 :

Key Impact of Vgt1 on Flowering Time Adaptation in Maize: Evidence From Association Mapping and Ecogeographical Information. Sébastien Ducrocq et al. *Genetics*. Vol. 178, pp. 2433-2437 (2008).

Unité 2

Doc. 1 p. 244

Cereal breeding takes a walk on the wild side. Catherine Feuillet et al. *Trends in Genetics*. Vol. 24, No 1 (2007).

Objectif Bac

Exercice 4 p. 256

From Means to QTL: The Illinois Long-Term Selection Experiment as a Case Study in Quantitative Genetics J.W. Dudley. *Crop Sci. Vol. 47 No 53, S20-S31 (2007).*

Ninety generations of selection for oil and protein in maize. Dudley, J.W., and R.J. Lambert. *Maydica Vol. 37, pp. 1-7 (1992).*

100 generations of selection for oil and protein in corn. Dudley, J.W., and R.J. Lambert. *Plant Breed. Rev. Vol. 24, pp. 79-110 (2004).*

THÈME 5 Le maintien de l'intégrité de l'organisme

CHAPITRE 1 La réaction inflammatoire, une manifestation de l'immunité innée

Unité 1

Doc. 1 p. 268

Telethermographic findings after uncomplicated and septic total knee replacement. C.L. Romanò et al. *Knee, Vol. 19, No 3, pp. 193-197 (2012).*

Unité 2

Doc. 3 p. 270

Migratory Dermal Dendritic Cells Act as Rapid Sensors of Protozoan Parasites. Lai Guan Ng et al. *PLoS Pathogens. Vol. 4, No 11 (2008).*

Doc. 5 p. 271

Cutting Edge: TLR2-Mediated Proinflammatory Cytokine and Chemokine Production by Microglial Cells in Response to Herpes Simplex Virus. Aravalli R. N. et al. *J Immunol. Vol. 175, No 7, pp. 4189-93 (2005).*

Unité 3

Doc. 1 p. 272

Atrial natriuretic peptide protects against histamine-induced endothelial barrier dysfunction in vivo. Fürst R et al. *Mol Pharmacol. Vol. 74, No 1, pp. 1-8 (2008).*

Doc. 3 p. 272

Ursolic acid and oleanolic acid, members of pentacyclic triterpenoid acids, suppress TNF- α -induced E-selectin expression by cultured umbilical vein endothelial cells. K. Takada et al. *Phytomedicine. Vol. 17, No 14, pp. 1114-1119 (2010).*

Doc. 7 p. 273

Development of anti-TNF therapy for rheumatoid arthritis. Marc Feldmann. *Nat Rev Immunol. Vol. 2, No 5, pp. 364-371 (2002).*

Unité 4

Doc. 3 p. 274.

High-Resolution Dissection of Phagosome Maturation Reveals Distinct Membrane Trafficking Phases. D. Gotthardt et al. *Mol. Biol. Cell. Vol. 13, pp. 3508-3520 (2002).*

Doc. 4 p. 274.

Ontogeny and behaviour of early macrophages in the zebrafish embryo. Herbolme P, Thisse B, Thisse C. *Development. Vol. 126, No 17, pp. 3735-3745 (1999).*

Exercices

Exercice 4 p. 280

Heritability estimates of innate immunity: an extended twin Study. AJM de Craen et al. *Genes and Immunity. Vol. 6, pp. 167-170 (2005).*

Exercice 7 p. 282

How honey kills bacteria. Paulus H. S. Kwakman et al. *The FASEB Journal. Vol. 24 (2010).*

Exercice 8 p. 282

Chemokine-Dependent Neutrophil Recruitment in a Murine Model of Legionella Pneumonia: Potential Role of Neutrophils as Immunoregulatory Cells. Kazuhiro Tateda et al. *Infect Immun. Vol. 69, No 4, pp. 2017-2024 (2001).*

CHAPITRE 2 L'immunité adaptative

Unité 2

Doc. 4 p. 287

Variation and infectivity neutralization in influenza. Knossow M., Skehel JJ. *Immunology. Vol. 119, No 1, pp. 1-7 (2006).*

Unité 3

Doc. 1 p. 288

Frequency, specificity, and sites of expansion of CD8⁺ T cells during primary pulmonary influenza virus infection. Lawrence CW, Ream RM, Braciale TJ. *J Immunol. Vol. 174, No 9, pp. 5332-5340 (2005).*

Doc. 2 p. 288

Secretory mechanisms in cell-mediated cytotoxicity. Stinchcombe JC, Griffiths GM. *Annu Rev Cell Dev Biol.* Vol. 23, pp. 495-517 (2007).

Unité 5

Doc. 3 p. 293

Deletion of autospecific T cells in T cell receptor (TCR) transgenic mice spares cells with normal TCR levels and low levels of CD8 molecules. H. Teh, H. Kishi, B. Scott, H. Von Boehmer. *J Exp Med.* Vol. 169, No 3, pp. 795-806 (1989).

Doc. 4 p. 293

In situ tolerance within the central nervous system as a mechanism for preventing autoimmunity. Brabb T et al. *J Exp Med.* Vol. 192, No 6, pp. 871-880 (2000).

Exercices

Exercice 4 p. 302

CD4 effector T cell subsets in the response to influenza: heterogeneity, migration, and function.

Román E et al. *J Exp Med.* Vol. 196, No 7, pp. 957-968 (2002).

CHAPITRE 3 Le phénotype immunitaire au cours de la vie

Unité 1

Doc. 1 p. 306

Influenza and the challenge for immunology. Peter C Doherty, Stephen J Turner, Richard G Webby & Paul G Thomas. *Nature Immunology.* Vol. 7, pp. 449-455 (2006).

Doc. 3 p. 306

Neutralizing antibodies derived from the B cells of 1918 influenza pandemic survivors. Xiacong Yu et al. *Nature.* Vol. 455, No 7212, pp. 532-536 (2008).

Unité 2

Doc. 5 p. 309

A new DTPw-HB/Hib combination vaccine for primary and booster vaccination of infants in Latin America. Miguel Tregnaghi et al. *Rev. Panam. Salud Publica.* Vol. 19, No 3 (2006).

Unité 3

Doc. 1 p. 310

B Cell Subsets in Healthy Children: Reference Values for Evaluation of B Cell Maturation Process in Peripheral Blood. Barbara Piatosa et al. *Cytometry B Clin Cytom.* Vol. 78, No 6, pp. 372-81 (2010).

Doc. 2 p. 310

Clonal dissection of the human memory B-cell repertoire following infection and vaccination. Debora Pinna et al. *Eur. J. Immunol.* Vol. 39, pp. 1260-1270 (2009).

Exercice 5 p. 303

Antibody Production by Single Cells. IV: Further Studies on Multiply Immunized Animals G. J. V. Nossal. *Br J Exp Pathol.* Vol. 41, No 1, pp. 89-96 (1960).

Exercice 6 p. 303

Enhanced Phagocytosis of Candida Species Mediated by Opsonization with a Recombinant Human Antibody Single-Chain Variable Fragment. Melanie Wellington et al. *Infect Immun.* Vol. 71, No 12, pp. 7228-7231 (2003).

Exercice 7 p. 304

Virus-specific CD8+ cytotoxic T-lymphocyte activity associated with control of viremia in primary human immunodeficiency virus type 1 infection. Borrow P et al. *J Virol.* Vol. 68, No 9, pp. 6103-10 (1994).

Exercice 8 p. 304

Les leukocytes et les propriétés actives du sérum chez les vaccinés [in French] Bordet J. *Ann Inst Pasteur.* Vol. 9, pp. 462-506 (1895).

Doc. 3 p. 311

Serum Antibody as a Marker of Protection against Natural Rotavirus Infection and Disease. F. Raul Velazquez et al. *The Journal of Infectious Diseases.* Vol. 182, pp. 1602-1609 (2000).

Exercices

Exercice 4 p. 316

Preexisting antibody response against 2009 pandemic influenza H1N1 viruses in the Taiwanese population. Chi CY et al. *Clin Vaccine Immunol.* Vol. 17, No 12, pp. 1958-1962 (2010).

Exercice 6 p. 317

Broad and Potent Neutralizing Antibodies from an African Donor Reveal a New HIV-1 Vaccine Target. Laura M. Walker, et al. *Science* Vol. 326, No 285 (2009).

Objectif Bac

Exercice 3 p. 319

Evolutionary and somatic selection of the antibody repertoire in the mouse. Rajewsky K, Förster I, Cumano A. *Science.* Vol. 238, No 4830, pp. 1088-94 (1987).

The extent of affinity maturation differs between the memory and antibody-forming cell compartments in the primary immune response. Smith KG et al. *EMBO J.* Vol. 16, No 11, pp. 2996-3006 (1997).

Origin of antibody variation. Brenner S, Milstein C. *Nature.* Vol. 211, No 5046, pp. 242-3 (1966).

Somatic mutation and the maturation of immune response to 2-phenyl oxazolone. Griffiths GM, Berek C, Kaartinen M, Milstein C. *Nature*. Vol. 312, No 5991, pp. 271-5 (1984).

Molecular events during maturation of the immune response to oxazolone. Berek C, Griffiths GM, Milstein C. *Nature*. Vol. 316, No 6027, pp. 412-8 (1985).

Kinetic maturation of an immune response. Milstein C. *Nature*. Vol. 352, No 6335, pp. 530-532 (1991).

Affinity maturation of an anti-V antigen IgG expressed in situ through adenovirus gene delivery confers enhanced protection against *Yersinia pestis* challenge. Van Blarcom TJ et al. *Gene Ther*. Vol. 17, No 7, pp. 913-921 (2010).

THÈME 6

Neurone et fibre musculaire : la communication nerveuse

CHAPITRE ① Les réflexes myotatiques, un exemple de commande nerveuse du muscle

Unité 1

Doc. 4 p. 329

Sir Charles Sherrington's The integrative action of the nervous system: a centenary appreciation

Robert E. Burke. *Brain*. Vol. 130, pp. 887-894 (2007).

Unité 5

Doc. 1 p. 336

Bernard Katz, quantal transmitter release and the foundations of presynaptic Physiology. George J. Augustine and Haruo Kasai. *J Physiol* Vol. 578, No 3, pp. 623-625 (2007).

Doc. 3 p. 337

Ex vivo imaging of motor axon dynamics in murine triangularis sterni explants. Martin Kerschensteiner et al. *Nat Protoc*. Vol. 3, No 10, pp. 1645-1653 (2008).

Doc. 4 p. 337

Synaptic vesicle movements monitored by fluorescence recovery after photobleaching in nerve terminals stained with FM1-43. Henkel AW et al. *J Neurosci*. Vol. 16, No 12, pp. 3960-3967 (1996).

Doc. 6 p. 337

Acetylcholine release evoked by single or a few nerve impulses in the electric organ of Torpedo. Y Dunant, L Eder, and L Servetiadis-Hirt. *J Physiol*. Vol. 298, pp. 185-203 (1980).

Exercices

Exercice 4 p. 342

Physiological and morphological identification of photosensitive neurons in the opisthosomal ganglia of *Limulus polyphemus*. Mori K, Saito T, Kuramoto T. *Biol Bull*. Vol. 207, No 3, pp. 209-216 (2004).

Exercice 6 p. 343

C. elegans: des neurones et des gènes. Christelle Gally, Jean-Louis Bessereau. *Medecine/Sciences* Vol. 19, pp. 725-34 (2003).

UNC-13 is required for synaptic vesicle fusion in *C. elegans*. Janet E. Richmond, Warren S. Davis, and Erik M. Jorgensen. *Nat Neurosci*. Vol. 2, No 11, pp. 959-964 (1999).

Exercice 7 p. 343

Morphologic and immunopathologic findings in myasthenia gravis and in congenital myasthenic syndromes. A. G Engel. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. Vol. 43, No 7, pp. 577-589 (1980).

Ultrastructural localization of the acetylcholine receptor in myasthenia gravis and in its experimental autoimmune model. Engel AG et al. *Neurology*. Vol. 27, No 4, pp. 307-15 (1977).

CHAPITRE ② Motricité, volonté et plasticité cérébrale

Unité 1

Doc. 4 p. 347

Neuronal Activity in the Primate Premotor, Supplementary, and Precentral Motor Cortex During Visually Guided and Internally Determined Sequential Movements. Mushiaki et al. *Journal of neurophysiology*. Vol. 66, No 3, pp. 705-718 (1991).

Doc. 5 p. 347

Movement Intention After Parietal Cortex Stimulation in Humans. Desmurget M. et al. *Science*. Vol. 324, pp. 811-813 (2009).

Unité 3

Doc. 2 p. 350

The musician's brain: functional imaging of amateurs and professionals during performance and imagery. Lotze M et al. *Neuroimage*. Vol. 20, No 3, pp. 1817-29 (2003).

Doc. 4 p. 351

The Plastic Human Brain Cortex. Pascual-Leone A. et al. *Annu. Rev. Neurosci.* Vol. 28, pp. 377-401 (2005).

Unité 4

Doc. 1 p. 352

Corticomotor plasticity and learning of a ballistic thumb training task are diminished in older adults. Nigel C. Rogasch et al. *J Appl Physiol.* Vol. 107, pp. 1874-1883 (2009).

Doc. 3 p. 353

The role of the contralesional motor cortex for motor recovery in the early days after stroke assessed with longitudinal FMRI. Rehme AK et al. *Cereb Cortex.* Vol. 21, No 4, pp. 756-68 (2011).

Doc. 4 p. 353

Cortical reorganization in motor cortex after graft of both hands. Giraux P. et al. *Nature.* Vol. 4, No 7, pp. 691-692 (2001).

Re-emergence of hand-muscle representations in human motor cortex after hand allograft

Vargas CD. et al. *PNAS.* Vol. 106, No 17, pp. 7197-7202 (2009).

Exercices

Exercice 4 p. 358

Nurture versus nature: long-term impact of forced right-handedness on structure of pericentral cortex and basal ganglia. Klöppel S. et al. *J Neurosci.* Vol. 30, No 9, pp. 3271-3275 (2010).

Exercice 6 p. 359

Le codage de l'action : peut-on dissocier l'attention de l'intention? Boussaoud D. et al. *Médecine sciences.* Vol. 19, No 5, pp. 583-591 (2003).

Objectif Bac

Exercice 3 p. 361

Moving with or without will: functional neural correlates of alien hand syndrome. Assal F, Schwartz S, Vuilleumier P. *Ann Neurol.* Vol. 62, No 3, pp. 301-306 (2007).

Collection A. Duco
SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE



Nouveau programme 2012

LIVRE DU PROFESSEUR

Enseignement de spécialité

Directeur d'ouvrage

Michel Dreyer

Auteurs

Armelle Baldeyrou-Bailly
Fabrice Bertrand
Emmanuel Claerr
Nicole Dewitz
Maryline Gallizia
Catherine Gueth
Céline Mémeteau
Elena Salgueiro
Benoît Thiebaut
Isabelle Wack-Villar

Coordinateur pédagogique

Claude Censier

Directeur de collection

André Duco

SOMMAIRE

THÈME 1	La Terre dans l'Univers, la vie et l'évolution de la vie : énergie et cellule vivante	149
Chapitre 1	La photosynthèse : de l'énergie lumineuse à l'énergie chimique	149
Chapitre 2	Respiration cellulaire, fermentations et production d'ATP	154
Chapitre 3	Consommation et régénération de l'ATP dans la cellule musculaire	157
EXERCICES DU THÈME 1		160
THÈME 2	Enjeux planétaire contemporains : atmosphère, hydrosphère, climats, du passé à l'avenir	169
Chapitre 1	L'évolution climatique et atmosphérique récente	169
Chapitre 2	Le système climatique terrestre et l'effet de serre	174
Chapitre 3	Variations climatiques et atmosphériques à l'échelle des temps géologiques	183
EXERCICES DU THÈME 2		187
THÈME 3	Corps humain et santé : glycémie et diabète	197
Chapitre 1	Les glucides alimentaires et la glycémie	197
Chapitre 2	La régulation de la glycémie	201
Chapitre 3	Les diabètes, des défauts de la régulation de la glycémie	206
EXERCICES DU THÈME 3		211

CHAPITRE 1

La photosynthèse : de l'énergie lumineuse à l'énergie chimique

UNITÉ 1

La cellule chlorophyllienne et la photosynthèse

[pp. 14-15 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

La cellule chlorophyllienne des végétaux verts effectue la photosynthèse grâce à l'énergie lumineuse. Le chloroplaste est l'organe clé de cette fonction.

Conseils et suggestions

– Il s'agit de localiser précisément les cellules chlorophylliennes dans la feuille et de montrer en quoi la feuille est particulièrement adaptée à la fonction photosynthétique.

– Les **doc. 1 et 2** permettent de montrer la dissymétrie entre face supérieure et inférieure, l'une très riche en cellules chlorophylliennes (parenchyme palissadique) et l'autre en stomates. L'existence des stomates, structures de communication entre l'intérieur et l'extérieur de la feuille, et d'une atmosphère interne contenue dans les lacunes du parenchyme lacuneux, permet de rappeler les échanges gazeux photosynthétiques.

La conception du protocole pour la localisation de l'amidon (**doc. 3**) nécessite une explicitation des diverses contraintes expérimentales indiquées et peut être couplée à une observation associant microscope et caméra numérique.

– Le **doc. 5** présente l'expérience classique de Ruben et Kamen, sous une forme proche de ce qui a été effectivement réalisé (enrichissement modéré en isotope lourd en particulier) par ces deux scientifiques.

– Les **doc. 5 et 6** fournissent des outils permettant de déterminer si un atome est oxydé ou réduit lors d'une réaction chimique. Ces outils seront utilisés de nouveau dans le **chapitre 2** sur la respiration et les fermentations. La notion d'électronégativité est présentée au **doc. 6** sous une forme graphique destinée à en faciliter la compréhension. Il en est de même pour la notion de nombre d'oxydation. Ces deux documents peuvent être l'occasion d'un travail transdisciplinaire avec les sciences physiques, de façon à harmoniser le langage et les définitions utilisés dans les deux matières.

– L'**exercice 6 p. 29** prolonge les **doc. 5 à 7** et fournit l'occasion d'appliquer la notion de nombre d'oxydation.

Exploitation des documents par les activités

Concevoir et mettre en œuvre un protocole adapté à l'objectif poursuivi. Effectuer un geste technique en réalisant et observant

une préparation microscopique de feuille d'élodée. Comprendre et exploiter une expérience historique. Utiliser des notions de chimie pour démontrer que la photosynthèse est une oxydoréduction.

① Le tissu chlorophyllien (**doc. 1**) est essentiellement constitué par le parenchyme palissadique, situé sur la face supérieure de la feuille, la plus exposée à la lumière. Ses cellules chlorophylliennes sont en contact avec l'atmosphère interne contenue dans les lacunes du parenchyme lacuneux et font avec elle les échanges gazeux photosynthétiques (et respiratoires). Les lacunes communiquent avec les chambres sous-stomatiques, elles-mêmes en relation avec l'extérieur quand les stomates sont ouverts (**doc. 1 et 2**). Ceux-ci sont situés préférentiellement sur la face inférieure, abritée de la lumière directe et donc de la déshydratation, défavorable à leur ouverture.

② L'analyse des **doc. 1 à 4** permet de localiser précisément la photosynthèse :

– Le parenchyme foliaire réalise des échanges gazeux photosynthétiques, qui se traduisent par des flux de gaz au niveau des stomates. La photosynthèse a donc probablement lieu dans le parenchyme foliaire (**doc. 1 et 2**).

– Au **doc. 1**, on observe que certains organites des cellules du parenchyme foliaire, les chloroplastes, sont colorés en vert : ils contiennent de la chlorophylle, pigment intervenant dans la photosynthèse. Cette observation suggère que les chloroplastes pourraient participer à la photosynthèse.

– Sur l'image du **doc. 3**, on constate que les chloroplastes sont colorés en noir par l'eau iodée, ce qui indique la présence d'amidon à leur niveau (on peut, en classe, montrer un témoin non éclairé, pour établir le lien entre éclairage et stockage d'amidon dans les chloroplastes). L'amidon étant un produit de la photosynthèse (molécule organique), cette observation est elle aussi en faveur d'une participation des chloroplastes à la photosynthèse.

– Mais les chloroplastes sont-ils capables de réaliser toutes les étapes de la photosynthèse ? Ou bien sont-ils le lieu de certaines étapes seulement de la photosynthèse ? Les résultats de l'expérience de Jensen et Bassham (**doc. 4**) apportent un argument fonctionnel pour trancher entre ces deux hypothèses. En effet, ils

(...)

montrent que des chloroplastes isolés, convenablement éclairés, peuvent fixer 20 μmol de CO_2 par mg de chlorophylle, en 9 minutes, soit 2/3 de la quantité de CO_2 fixée dans le même temps par des feuilles entières contenant la même quantité de chlorophylle. Les chloroplastes sont donc capables de réaliser toutes les étapes de la photosynthèse.

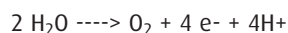
(On peut signaler qu'en améliorant le protocole de Jensen et Bassham, qui date des années 60, on peut aujourd'hui atteindre quasiment 100 % de l'activité photosynthétique, sur des chloroplastes isolés).

(L'exercice 8 page 30, «L'élysée, une kleptomane originale», peut être traité dès ce stade de l'avancement du travail).

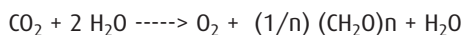
3 Parcours des éléments chimiques C et O au cours de la photosynthèse :

– D'après le **doc. 4**, les atomes de carbone du 14 CO_2 , fixés dans les zones éclairées et chlorophylliennes des feuilles, sont incorporés dans des molécules organiques comme l'amidon. Donc le carbone des molécules organiques synthétisées provient du CO_2 .

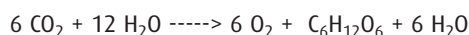
– L'expérience de Ruben et Kamen (**doc. 5**) montre que la teneur en 18O de l' O_2 dégagé est toujours très proche de celle de l'eau et non de celle du CO_2 fourni, ce qui suggère que tous les atomes d'oxygène du dioxygène dégagé proviennent de l'eau, selon la réaction :



Dans l'équation bilan de la photosynthèse telle que l'écrivent Ruben et Kamen, le nombre de molécules d'eau consommées égale le nombre de molécules de dioxygène produites. L'eau consommée ne peut donc fournir suffisamment d'atomes d'oxygène pour former le dioxygène. Pour mettre ce bilan en conformité avec l'origine des atomes d'oxygène de O_2 , on est amené à le modifier de la façon suivante :



Ou bien, en considérant 6 molécules de CO_2 fixées et une molécule de glucose formée :



4 Cas du carbone du CO_2 :

– Avant photosynthèse, dans le CO_2 , l'atome de carbone est lié à deux atomes d'oxygène, plus électronégatifs que lui (**doc. 6**). Les liaisons covalentes sont donc polarisées au bénéfice des atomes d'oxygène, qui attirent à eux des électrons. L'atome de carbone a (partiellement) cédé 4 électrons. On dit que son nombre d'oxydation est +4, il est dans un état oxydé (**doc. 7**) .

– Après photosynthèse, le carbone est incorporé dans des glucides comme le glucose. Dans cette molécule représentée au **doc. 7**, tous les atomes d'hydrogène sont liés à de l'oxygène ou à du carbone, plus électronégatifs qu'eux. Ces 12 atomes ont donc chacun un nombre d'oxydation +1. De même, les 6 atomes d'oxygène sont liés à des atomes moins électronégatifs qu'eux, ce qui correspond pour chacun à un nombre d'oxydation -2. La molécule de glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ étant de charge nulle, la somme des nombres d'oxydation de ses atomes doit valoir zéro. On en déduit que les 6 atomes de carbone du glucose ont, en moyenne, un nombre d'oxydation nul. Donc, l'intégration du carbone du CO_2 dans du glucose, lors de la photosynthèse, a fait passer son nombre d'oxydation de +4 à 0, ce qui correspond à une réduction du carbone.

Cas de l'oxygène de l'eau :

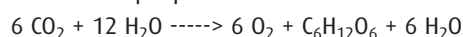
– Dans la molécule d'eau, H_2O , l'atome d'oxygène a un nombre d'oxydation -2, il est dans un état réduit. Dans O_2 , il a un nombre d'oxydation nul. L'oxygène initialement présent dans l'eau est donc oxydé au cours de la photosynthèse.

La photosynthèse peut donc se résumer à une réduction du carbone du CO_2 et à une oxydation de l'oxygène de l'eau.

5 EN CONCLUSION

– L'organite cellulaire de la photosynthèse est le chloroplaste, très abondant dans le parenchyme palissadique de la face supérieure de la feuille.

– Les réactions de la photosynthèse peuvent être résumées par une oxydation de l'oxygène de l'eau, et une réduction du carbone du CO_2 , et son bilan chimique peut s'écrire :



UNITÉ 2 Le chloroplaste, organite de la photosynthèse

[pp. 16-17 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme :

Le chloroplaste est l'organite clé de [la] fonction [photosynthétique]. La phase photochimique [...]. La phase chimique [...]

Conseils et suggestions

– Cette unité vise à distinguer les deux grandes phases du processus photosynthétique (phase photochimique et phase chimique), et à déterminer où ces deux phases se déroulent dans les chloroplastes. Le **doc. 1** permet d'explorer l'organisation d'un chloroplaste en le grossissant progressivement. Les cellules d'hépatique ont été observées à l'aide d'un microscope couplé à une caméra numérique. Sur ce matériel biologique, les thylacoïdes sont visibles en microscopie optique.

Les **doc. 2** à **5** fournissent des arguments expérimentaux en faveur de l'existence de deux phases dans la photosynthèse. On pourra compléter avec l'étude de l'expérience classique d'Emerson et Arnold (snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese-cours/07-doublereaction.htm). L'expérience de Hill (**doc. 3**) est réalisable par ExAO. Elle montre que la libération de dioxygène caractéristique de la photosynthèse peut se produire, à la lumière, en l'absence de CO_2 . Cela suppose la présence d'un oxydant (réactif de Hill). Rappelons qu'il est nécessaire de terminer l'expérience par une phase d'obscurité afin de montrer que le dégagement d' O_2 est bien lié à l'absorption de lumière et non à une simple réaction chimique faisant suite à l'addition du réactif de Hill.

Exploitation des documents par les activités

Recenser, extraire et organiser des informations. Analyser une démarche expérimentale historique. Communiquer dans un langage scientifiquement approprié.

❶ Les chloroplastes sont des organites compartimentés de façon complexe (**doc. 1**). Ils ont une membrane externe et une membrane interne, délimitant d'une part un espace intermembranaire et d'autre part un compartiment interne appelé stroma. Le stroma contient lui-même de nombreux sous-compartiments, les thylacoïdes. Ces derniers forment des empilements, les grana (*granum au singulier*). L'espace intrathylacoïdien est aussi appelé lumen.

❷ Au tout début du 20^e siècle, Frederick Blackman réalise des expériences dans lesquelles il explore l'effet de la température sur la vitesse du processus photosynthétique (**doc. 2**). Il constate que cet effet n'est pas le même selon que la luminosité est limitante ou selon que le taux de CO₂ est limitant (*on peut traiter l'exercice guidé 4 p. 28 à ce stade*). Ces résultats le conduisent à distinguer deux phases dans la photosynthèse : une phase photochimique, indépendante de la température, et une phase chimique, dépendante de la température. C'est lors de cette seconde phase que le CO₂ est intégré à la matière organique. Des expériences ultérieures ont renforcé cette conception, aujourd'hui solidement étayée :

L'expérience de Hill (**doc. 3**) montre que le dégagement d'O₂ est dépendant de la lumière et de la présence d'un oxydant puissant, jouant le rôle d'accepteur d'électrons. En revanche, ce dégagement est indépendant de la réduction du CO₂, puisque l'expérience est réalisée en absence de CO₂. Ces résultats renforcent l'idée de l'existence d'une phase photochimique pendant laquelle le CO₂ n'intervient pas, et pendant laquelle l'O₂ est dégagé. Seule cette phase photochimique se déroule pendant l'expérience de Hill, le réactif de Hill permettant de la découpler de la phase chimique pendant laquelle le CO₂ est fixé. On peut penser qu'en temps normal, la phase photochimique produit un réducteur.

L'expérience de Gaffron (**doc. 4**) montre que, après une longue période d'éclairement, la fixation de CO₂ peut persister quelques instants (15 secondes environ) après le passage à l'obscurité. La fixation du CO₂ ne dépend donc pas directement de la lumière. Elle a lieu pendant la phase chimique. Mais la phase chimique doit consommer des produits de la phase photochimique, rapidement épuisés, et non renouvelés en l'absence de lumière. Il y a donc un couplage obligatoire entre phase photochimique et phase chimique.

❸ L'expérience d'Arnon (**doc. 5**) permet de préciser la localisation des deux phases de la photosynthèse dans les chloroplastes, organites à plusieurs niveaux de compartimentation (**doc. 1**) :

- expérience 1 : les thylacoïdes isolés et éclairés ne peuvent pas fixer le CO₂

- expérience 2 : à l'obscurité, le stroma peut fixer une faible quantité de CO₂ (4000 cps/min).

- expérience 3 : l'association avec des thylacoïdes préalablement éclairés permet au stroma de fixer le CO₂ (96 000 cps/min, soit 24 fois plus que dans l'expérience 2).

Donc le stroma possède l'équipement lui permettant de fixer le CO₂ à l'obscurité (phase chimique) mais son fonctionnement est conditionné par l'éclairement des thylacoïdes (phase photochimique).

❹ EN CONCLUSION

Les thylacoïdes captent l'énergie lumineuse et la convertissent en énergie chimique sous forme de molécules réduites. Ils sont le lieu de la phase photochimique, qui produit probablement un réducteur. Le stroma peut fixer le CO₂ et synthétiser des molécules organiques, en utilisant les produits de la phase photochimique. Il est le lieu de la phase chimique. Il y a un couplage fonctionnel obligatoire entre les deux compartiments du chloroplaste.

UNITÉ 3 La conversion de l'énergie lumineuse pendant la phase photochimique

[pp. 18-19 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme :

La phase photochimique produit des composés réduits RH₂.

Conseils et suggestions

Dans cette unité, on cherche à élucider le mécanisme d'absorption et de conversion de l'énergie lumineuse en une première forme d'énergie chimique, lors de la photosynthèse.

- On commence par identifier les pigments foliaires après séparation par chromatographie (**doc. 1**). Le protocole proposé permet de fabriquer une solution de chlorophylle brute utilisable également dans le spectroscope à main ou le spectrophotomètre (**doc. 2**). Cependant, on obtient des chromatogrammes plus lisibles (car plus concentrés en pigments) en écrasant tout simplement des fragments foliaires à l'aide d'un agitateur en verre, pour former le dépôt initial. Le **doc. 3**

aborde le mécanisme de conversion d'énergie à l'échelle moléculaire. Une électrochromographie illustre ce document et montre une disposition géométrique des photosystèmes dans la membrane des thylacoïdes (toutefois, d'autres clichés MET, dont un est fourni en complément pédagogique, montrent une organisation moins régulière).

- Une animation montrant les divers états d'une molécule de chlorophylle à la suite de la capture d'un photon est consultable sur le site snv.jussieu.fr/vie/dossiers/metabo/photosynthese/014pigments.htm#excit

- L'utilisation du DCPIP (**doc. 4**) montre la capacité de chloroplastes lésés à réduire un oxydant artificiel. L'objectif visé est le même que pour la réaction de Hill (**unité 2, doc. 3**), mais ne nécessite pas de dispositif ExAO. Cependant, le DCPIP est d'approvisionnement difficile et assez onéreux (laboratoires Merck).

Exploitation des documents par les activités

Concevoir un protocole expérimental et le mettre en œuvre, mettre en relation des informations, tester une hypothèse.

❶ Le spectre d'absorption est le graphique qui quantifie l'absorption de l'énergie lumineuse dans chaque longueur d'onde du spectre visible (*On peut signaler que le spectre est à réaliser sur une solution de pigments suffisamment diluée pour que l'absorption soit inférieure à 100% à toutes les longueurs d'onde. Si la solution de pigments est trop concentrée, le spectre d'absorption est « saturé », et ne peut plus être comparé au spectre d'action photosynthétique.*)

La solution de pigments foliaires (chlorophylle brute) est verte par transparence car elle n'absorbe pratiquement pas les radiations vertes, qui sont donc transmises (cf. comparaison des spectres d'absorption du solvant seul et du mélange de pigments foliaires) et parviennent jusqu'à l'œil de l'observateur.

❷ L'activité photosynthétique est élevée dans la partie gauche du spectre (supérieure à 80% de l'activité maximale, entre 400 et 500 nm, supérieure à 60% entre 500 et 520 nm) et dans la partie droite du spectre (supérieure à 60% entre 620 et 700 nm).

Or, les deux chlorophylles absorbent préférentiellement dans ces deux parties du spectre, et les caroténoïdes absorbent entre 400 et 550 nm. On retrouve les pics d'absorption des différents pigments dans le spectre d'action (en particulier vers 650 et 680 nm, où la chlorophylle b et la chlorophylle a ont des pics d'absorption respectifs).

Les longueurs d'onde efficaces pour la photosynthèse sont donc justement celles qui sont absorbées par les pigments foliaires. On peut donc penser que ces pigments foliaires sont des pigments photosynthétiques, et que l'énergie lumineuse captée par ces différents pigments intervient dans la réalisation de la photosynthèse.

❸ Le **doc. 3** nous informe que les photosystèmes assurent la collecte d'énergie lumineuse, à l'origine d'une ionisation de la chlorophylle a piège (oxydation). Les électrons perdus par la chlo-

rophylle (et qui lui sont restitués par oxydation de l'eau), sont cédés à un premier accepteur, qui lui-même doit les céder, jusqu'à un accepteur final. On cherche à localiser l'accepteur final d'électrons de la phase photochimique, noté par convention RH_2 . On utilise pour cela une suspension de chloroplastes lésés, dans lesquels les thylacoïdes sont intacts et le stroma dilué. On y ajoute du DCPIP, un oxydant soluble. À la lumière (mais pas à l'obscurité), le DCPIP est réduit, comme en témoigne sa décoloration. On peut donc proposer que le DCPIP a « pris la place » du RH_2 , qui aurait été éliminé (ou en tout cas dilué) par la lésion des chloroplastes, ce qui est en faveur d'une localisation de RH_2 dans le stroma.

❹ Le **doc. 5B** nous montre l'amidon en place dans le site actif d'une enzyme bactérienne, la CGTase. Deux acides aminés du site actif, les phénylalanines 183 et 259, sont particulièrement proches du substrat. Le **doc. 5C** montre que par rapport à une CGTase non mutée, la substitution de l'une ou l'autre ou de ces deux phénylalanines entraîne une diminution de l'activité de formation de cyclo-dextrines, et accroît l'activité d'hydrolyse de l'amidon. En quelque sorte, les CGTases mutées sont « transformées » en amylases. Ces expériences de mutagenèse dirigée montrent donc que la spécificité d'action d'une enzyme donnée est intimement liée à la structure et à la composition en acides aminés de son site actif.

❺ EN CONCLUSION

Un photon est capté par un pigment d'une antenne collectrice et excite un électron qui transmet son énergie à une molécule piège de chlorophylle a.

Celle-ci transmet par photochimie cet électron excité à un accepteur d'une chaîne de transfert d'électrons située dans la membrane thylacoïdienne en association avec les photosystèmes.

L'accepteur final se trouve dans le stroma et passe à l'état réduit RH_2 .

La chlorophylle est restaurée dans son état initial par les électrons issus de l'oxydation de l'eau qui alimente ainsi le flux passant dans la chaîne de transfert d'électrons.

UNITÉ 4 Le bilan de la phase photochimique

[pp. 20-21 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme :

La phase photochimique produit des composés réduits RH_2 et de l'ATP.

Conseils et suggestions

Cette unité, qui complète l'unité 3, vise à établir le bilan de la phase photochimique, et à préciser les conditions de formation de l'ATP.

La première partie associe des résultats expérimentaux (**doc. 1**) et des données biochimiques (**doc. 2** et **3**) sur les produits de la phase photochimique. Le **doc. 2** présente la structure et les propriétés de la molécule d'ATP (réinvesties dans les chapitres suivants du thème 1). La formule semi-développée de l'ATP, qui n'est pas à mémoriser, permet de donner du sens à son nom. Seule la réaction de phosphorylation de l'ADP est figurée, car c'est elle qui se produit

lors de la phase photochimique. La perspective d'une hydrolyse ultérieure de l'ATP est signalée dans la légende. Le **doc. 3** fournit pour information la formule développée du composé R (il n'est pas question de demander la mémorisation de cette formule), ce qui permet aux élèves de réaliser que ses propriétés ont une base chimique.

La seconde partie aborde les conditions de synthèse de l'ATP (**doc. 4**), par l'exploitation des expériences de Jagendorf, dites du « bain acide ». Les sites suivants fournissent des détails sur ces expériences : www.nature.com/emboj/journal/v18/n15/full/7591827a.html et www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese-cours/14-ATP.htm. La notion de chaîne photosynthétique, déjà abordée dans l'unité précédente, est précisée par le **doc. 5**. Le **doc. 6** peut servir de support au schéma de synthèse demandé en conclusion.

Exploitation des documents par les activités

Pratiquer une démarche scientifique afin de déterminer les conditions de la synthèse d'ATP. Réaliser un schéma de synthèse de la phase photochimique.

❶ Le **doc. 1** suggère que l'ATP et le RH_2 sont des produits de la phase photochimique car :

– pour l'ATP : la lumière (modérée ou forte) favorise l'augmentation de la concentration cellulaire d'ATP et la diminution de la concentration d'ADP (donc une augmentation du rapport ATP/ADP dans les cellules d'une feuille d'avoine). C'est exactement ce que l'on s'attend à observer si la photosynthèse permet une phosphorylation d'ADP (**doc. 2**).

– pour R : la lumière (modérée ou forte) provoque une diminution de sa concentration (on n'a malheureusement pas d'information pour savoir si la concentration de RH_2 augmente dans le même temps). Tout se passe donc comme si ADP et R étaient convertis en ATP et RH_2 respectivement, lors de la phase photochimique.

Le RH_2 et l'ATP sont des vecteurs d'énergie car :

– la phosphorylation de l'ADP est une réaction consommatrice d'énergie, stockée dans la liaison chimique entre les groupements phosphate 2 et 3. Cette énergie peut être restituée par hydrolyse de l'ATP (**doc. 2**).

– RH_2 est un réducteur, capable de céder des électrons, donc vecteur d'énergie chimique.

❷ Analyse des résultats :

– expérience A : le pH du lumen est de 4 et celui du stroma de 8 : il y a synthèse d'ATP à l'obscurité.

– expérience B : le pH du lumen est égal au pH du stroma : pas de synthèse d'ATP

– expérience C : le pH du lumen est supérieur au pH du stroma : pas de synthèse d'ATP

La seule différence entre les expériences étant l'existence et le sens du gradient de pH, cela signifie qu'il faut dans le lumen un pH inférieur à celui du stroma pour qu'il y ait synthèse d'ATP.

Dans les conditions physiologiques, la synthèse d'ATP va se réaliser si le stroma a un pH plus élevé que le lumen. Il faut pour cela que les protons s'accumulent dans ce dernier.

❸ L'absorption de la lumière par les photosystèmes (de deux types) déclenche un flux d'électrons dans les chaînes photosynthétiques. Ce flux, alimenté par l'oxydation de l'eau, est associé à des transferts de protons du stroma vers le lumen au niveau de certains transporteurs. Ces transferts d'électrons permettent donc d'accumuler des protons dans le lumen, car la membrane des thylacoïdes leur est très peu perméable. De plus, le système d'oxydation de l'eau est situé sur la face luminale de la membrane des thylacoïdes, si bien que les protons issus de cette oxydation sont libérés dans le lumen. Enfin, la réduction de R en RH_2 s'effectue côté stroma, ce qui consomme des protons du stroma. Ces trois mécanismes (transferts d'électrons, oxydation de l'eau, réduction de R) contribuent à créer une différence de pH (ou gradient de pH) entre les deux compartiments, le lumen devenant plus acide que le stroma.

❹ EN CONCLUSION

Voir le schéma du bilan des **unités 3 et 4 p. 25**.

UNITÉ 5

La synthèse de matière organique au cours de la phase chimique [pp. 22-23 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme :

La phase chimique produit du glucose à partir de CO_2 en utilisant les produits de la phase photochimique.

Conseils et suggestions

L'**unité 3** permet de valider un modèle de la phase chimique (**doc. 4**) à partir de l'analyse de résultats expérimentaux (**doc. 1 à 3**). Les autoradiographies fournies au **doc. 1** sont des documents originaux (Photosynthesis Research 73: 29-49, 2002. Following the path of carbon in photosynthesis : a personal story, Andrew A. Benson). Le **doc. 2** complète les expériences présentées au **doc. 5 p. 17**, avec l'utilisation des deux produits identifiés de la phase photochimique. Le **doc. 3** permet de mettre en relation deux intermédiaires clé du cycle de Calvin. Le **doc. 4** est informatif et présente sous une forme simplifiée les principales étapes de ce cycle, ainsi que le rôle particulier joué par l'enzyme RubisCO.

Exploitation des documents par les activités

Tester un modèle à partir de résultats d'expériences historiques.

Analyse du modèle de phase chimique proposé au **doc. 4** :

Le cycle de Calvin, une suite cyclique de réactions biochimiques, est classiquement subdivisé en trois phases :

– phase 1 : fixation du CO_2 sur le RuBP ou carboxylation, catalysée par la RubisCO, et produisant de l'APG ;

– phase 2 : réduction de l'APG grâce à l'énergie de l'ATP et au pouvoir réducteur des RH_2 issus de la phase photochimique (R est ainsi régénéré), ce qui produit des glucides phosphatés à trois atomes de carbone, puis du glucose ;

– phase 3 : régénération du RuBP à partir de G3P, nécessitant une consommation d'ATP.

Confrontation du modèle de phase chimique avec les résultats d'expériences historiques :

– **doc. 1** : Calvin montre avec son dispositif que chez *Scenedesmus*, la première molécule fortement marquée au ^{14}C après 10 s de photosynthèse en présence de $^{14}\text{CO}_2$ est l'APG (le RuBP et le glucose-P marqués ne sont alors présents qu'à l'état de traces sur l'autoradiographie). Dans le modèle (**doc. 4**), l'APG est bien la première molécule issue de la fixation du CO_2 sur le RuBP. Après 60 s, RUBP est fortement marqué, ainsi que des hexoses-P dont le glucose-P. Cela confirme que RUBP est régénéré à partir des composés ayant fixé le $^{14}\text{CO}_2$, et que des hexoses-P sont produits (on ne voit toutefois pas de glucose).

(...)

– **doc. 2** : dans les expériences 3 et 4 d'Arnon, les quantités de ^{14}C fixé sont proches et importantes. Cela montre que l'absence de thylacoïdes préalablement éclairés (exp. 3) est compensée par l'addition des produits de la phase photochimique, ATP et RH_2 (exp. 4). Or, les phases 2 et 3 du cycle (**doc. 4**) sont dépendantes de la présence d'ATP et RH_2 , c'est le couplage fonctionnel du cycle de Calvin avec la phase photochimique.

– **doc. 3** : en utilisant $^{14}\text{CO}_2$, on montre qu'en absence de lumière, l'APG s'accumule, donc il n'est plus transformé, alors que le RuBP se raréfie, donc il n'est plus régénéré : ce résultat soutient l'idée de

cyclicité de la phase chimique. À la lumière, un équilibre dynamique s'établit, où les concentrations d'APG et de RuBP sont constantes, ces molécules étant produites et consommées au même rythme. L'obscurité provoque une rupture du cycle en interrompant la fourniture d'ATP et RH_2 , d'où l'accumulation d'APG et la disparition du RuBP. – RH_2 est un réducteur, capable de céder des électrons, donc vecteur d'énergie chimique.

EN CONCLUSION

Voir le schéma du bilan des **unités 3 et 4 p. 25**.

CHAPITRE 2

Respiration cellulaire, fermentations et production d'ATP

UNITÉ 1 Le métabolisme du glucose

[pp. 34-35 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

La plupart des cellules eucaryotes (y compris les cellules chlorophylliennes) respirent. À l'aide de dioxygène, elles oxydent la matière organique en matière minérale. [...] Certaines cellules eucaryotes réalisent une fermentation. [...]

Conseils et suggestions

– Cette unité permet de distinguer le métabolisme oxydatif en conditions aérobies (respiration cellulaire) et anaérobies (fermentation), et d'étudier la voie cytoplasmique commune à ces deux types de métabolismes : la glycolyse.

– Les termes «respiration cellulaire» et «fermentation» peuvent, selon le contexte, inclure la glycolyse, ou désigner seulement les étapes propres à la respiration ou aux fermentations. Il est conseillé d'expliciter ce double usage des mêmes termes, et de s'astreindre à toujours préciser si l'on parle des étapes proprement fermentaires ou respiratoires, ou si l'on inclut la glycolyse.

– Pour simplifier, la molécule organique choisie comme source d'énergie est le glucose. D'autres molécules peuvent être oxydées mais toutes ne sont pas fermentescibles et il existe des voies alternatives conduisant au cycle de Krebs, non exigibles.

– La première partie propose une activité expérimentale utilisant des levures (**doc. 1**) et un document informatif permettant de distinguer oxydation complète et incomplète du glucose. Le choix des levures comme matériel biologique s'explique par le fait que ce sont des cellules eucaryotes non photosynthétiques, facilement manipulables, et qui présentent la capacité de se développer et de vivre en conditions aérobies ou anaérobies. Le métabolisme respiratoire et fermentaire peuvent ainsi être étudiés avec le même matériel biologique, ce qui facilite la comparaison.

– Pour le suivi de la culture de levures (**doc. 1**), une observation au microscope avec une lame de comptage peut être utilisée. Il est essentiel de travailler sur des levures dépourvues de réserves intracellulaires, faute de quoi une multiplication cellulaire aura lieu dans les tubes à essais dépourvus de glucose.

– La seconde partie de l'unité traite de la glycolyse, tronc commun de la respiration cellulaire et des fermentations, se déroulant dans le cytoplasme. Cette voie d'oxydation du glucose utilise des composés cytoplasmiques R' , qui sont réduits en $\text{R}'\text{H}_2$. L'activité d'oxydation du glucose par des extraits acellulaires élucidée par Meyerhof (**doc. 4**) est due à la présence d'enzymes cytoplasmiques.

– Il est important d'insister sur le fait que la respiration existe conjointement à la photosynthèse pour les cellules chlorophylliennes. Plusieurs exercices du **chapitre 1** permettent d'installer cette notion (**exercice 5 p. 29** et **exercices 6, 7 et 9 page 31**).

Exploitation des documents par les activités

Manipuler, adopter une démarche explicative, communiquer à l'aide d'un schéma.

① En l'absence de glucose (tubes 2 et 4), l'effectif des levures est inchangé entre le début et la fin de la période d'incubation, alors qu'en présence de glucose (tubes 3 et 5), les levures se multiplient, tout en consommant le glucose fourni. De plus, cette consommation et la multiplication des levures sont plus rapides en milieu aérobie (tube 5) qu'en milieu anaérobie (tube 3). La disponibilité de glucose est donc une condition suffisante à la multiplication des levures (du moins sur une période de 1 h, à plus long terme, d'autres molécules organiques leur sont peut-être nécessaires). L'oxygénation n'est pas indispensable mais permet une multiplication plus rapide des levures.

② En conditions aérobies, l'oxydation d'une molécule de glucose ($C_6H_{12}O_6$) s'accompagne du dégagement de 6 molécules de dioxyde de carbone (CO_2). Tous les atomes de carbone du glucose se retrouvent donc incorporés dans une molécule minérale : le glucose a été totalement dégradé au sens où ses produits de dégradation ne sont pas des molécules organiques. Inversement, en conditions anaérobies, seuls 2 des 6 atomes de carbone du glucose sont perdus sous forme de CO_2 . Les 4 autres atomes de carbone sont intégrés à des molécules organiques.

③ Quarante années de recherches en biochimie ont permis d'élucider la glycolyse, voie cytoplasmique d'oxydation incomplète du glucose (**doc. 4**). La glycolyse est complexe (9 étapes catalysées par différentes enzymes) mais son bilan est simple : une molécule de glucose est dégradée en deux molécules d'acide pyruvique, et cette dégradation s'accompagne de la production de deux molécules d'ATP et de deux composés réduits $R'H_2$.

Les résultats de l'expérience présentée au **doc. 3** peuvent être interprétés à la lumière de ce bilan (attention, l'expérience ne permet pas de construire ce bilan). La glycolyse nécessite des enzymes cytoplasmiques, présentes dans l'extrait de navet. Cet extrait provoque une décoloration du bleu de méthylène (ce qui témoigne de sa réduction, par le composé $R'H_2$ issu de la glyco-

lyse). La décoloration est lente si l'on ne fournit pas de glucose (car l'extrait de navet doit contenir une petite quantité de glucose ou d'autres molécules pouvant subir la glycolyse), et plus rapide si du glucose est fourni (la glycolyse est alors plus active, et davantage de $R'H_2$ est produit). On constate que, si les extraits de navet ont été ébouillantés, aucune décoloration de bleu de méthylène ne se produit. En effet, les enzymes intervenant dans la glycolyse sont alors inactivées.

④ La molécule de glucose a pour formule $C_6H_{12}O_6$, et la molécule d'acide pyruvique a pour formule CH_3COCO_2H . Il s'agit donc de deux molécules organiques (comprenant des liaisons C-H). Les 6 atomes initialement présents dans chaque molécule de glucose se retrouvent incorporés à l'acide pyruvique (2 fois 3 atomes de carbone). La glycolyse ne produit donc pas de CO_2 .

Dans le glucose, le carbone a en moyenne un nombre d'oxydation nul (voir **doc. 7 p. 15**). Dans l'acide pyruvique, le nombre d'oxydation des atomes de carbone est en moyenne de +2/3 (état oxydé). La glycolyse correspond donc à une oxydation du carbone initialement présent dans le glucose.

⑤ EN CONCLUSION

Schéma, voir bilan de l'unité 1, page 40. Les bilans en RH_2 et en ATP ne sont pas établis à ce stade.

UNITÉ 2 La respiration cellulaire

[pp. 36-37 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

La plupart des cellules eucaryotes [...] respirent : à l'aide de dioxygène elles oxydent la matière organique en matière minérale. La mitochondrie joue un rôle majeur dans la respiration cellulaire. L'oxydation du glucose comprend la glycolyse (dans le cytoplasme) puis le cycle de Krebs (dans la mitochondrie) : dans leur ensemble, ces réactions produisent du CO_2 et des composés réduits $R'H_2$. La chaîne respiratoire mitochondriale permet la réoxydation des composés réduits ainsi que la réduction de dioxygène en eau. Ces réactions s'accompagnent de la production d'ATP qui permet des activités cellulaires.

Conseils et suggestions

- Cette unité permet de distinguer le métabolisme oxydatif en conditions aérobies (respiration cellulaire) et anaérobies (fermentation), et d'étudier la voie cytoplasmique commune à ces deux types de métabolismes : la glycolyse.
- Les termes «respiration cellulaire» et «fermentation» peuvent, selon le contexte, inclure la glycolyse, ou désigner seulement les étapes propres à la respiration ou aux fermentations. Il est conseillé d'explicitier ce double usage des mêmes termes, et de s'astreindre à toujours préciser si l'on parle des étapes proprement fermentaires ou respiratoires, ou si l'on inclut la glycolyse.
- Pour simplifier, la molécule organique choisie comme source d'énergie est le glucose. D'autres molécules peuvent être oxydées

mais toutes ne sont pas fermentescibles et il existe des voies alternatives conduisant au cycle de Krebs, non exigibles.

- La première partie propose une activité expérimentale utilisant des levures (**doc. 1**) et un document informatif permettant de distinguer oxydation complète et incomplète du glucose. Le choix des levures comme matériel biologique s'explique par le fait que ce sont des cellules eucaryotes non photosynthétiques, facilement manipulables, et qui présentent la capacité de se développer et de vivre en conditions aérobies ou anaérobies. Le métabolisme respiratoire et fermentaire peuvent ainsi être étudiés avec le même matériel biologique, ce qui facilite la comparaison.
- Pour le suivi de la culture de levures (**doc. 1**), une observation au microscope avec une lame de comptage peut être utilisée. Il est essentiel de travailler sur des levures dépourvues de réserves intracellulaires, faute de quoi une multiplication cellulaire aura lieu dans les tubes à essais dépourvus de glucose.
- La seconde partie de l'unité traite de la glycolyse, tronc commun de la respiration cellulaire et des fermentations, se déroulant dans le cytoplasme. Cette voie d'oxydation du glucose utilise des composés cytoplasmiques R' , qui sont réduits en $R'H_2$. L'activité d'oxydation du glucose par des extraits acellulaires élucidée par Meyerhof (**doc. 4**) est due à la présence d'enzymes cytoplasmiques.
- Il est important d'insister sur le fait que la respiration existe conjointement à la photosynthèse pour les cellules chlorophylliennes. Plusieurs exercices du **chapitre 1** permettent d'installer cette notion (**exercice 5 p. 29** et **exercices 6, 7 et 9 page 31**).

Exploitation des documents par les activités

Interpréter une électronographie. Formuler une hypothèse. Interpréter des résultats expérimentaux. Exploiter des données quantitatives.

① Les levures présentent un plus grand nombre de mitochondries en conditions aérobies, c'est-à-dire lorsque la levure réalise une respiration et non pas une fermentation. Ceci suggère que les mitochondries sont impliquées dans la respiration.

(Noter que la taille de la vacuole et celle du noyau ne sont pas représentatives d'une variation selon les conditions de culture mais dépendent de la section observée).

② Dans le tableau B, seules deux des conditions expérimentales explorées s'accompagnent d'échanges gazeux. (i) la fraction cytosolique dégage du dioxyde de carbone, si du glucose est fourni. (ii) la fraction mitochondriale consomme du dioxygène et libère du dioxyde de carbone, si de l'acide pyruvique est fourni (mais pas si du glucose est fourni). Le tableau C montre que seule la fraction cytosolique est capable de dégrader le glucose en acide pyruvique (c'est à dire de réaliser la glycolyse).

Ces résultats sont en faveur du modèle suivant : la glycolyse, cytosolique, correspond à la dégradation du glucose en acide pyruvique. L'acide pyruvique est ensuite pris en charge par les mitochondries, et son utilisation s'accompagne d'un dégagement de dioxyde de carbone et d'une consommation de dioxygène, échanges gazeux caractéristiques de la respiration.

Cela confirme le rôle des mitochondries dans la respiration, et en particulier dans les étapes de la respiration qui consomment du dioxygène. Les mitochondries nécessitent comme substrat l'acide pyruvique et ne peuvent pas utiliser directement le glucose. La transformation préalable du glucose en pyruvate est réalisée lors de la glycolyse dans le cytosol.

③ Le glucose est d'abord oxydé lors de la glycolyse cytoplasmique produisant de l'acide pyruvique. Ce dernier est ensuite oxydé avant son entrée dans le cycle de Krebs puis au cours du cycle dans la matrice mitochondriale. Les R' sont régénérés à l'entrée de la chaîne respiratoire (à laquelle ils cèdent des électrons). La consommation de dioxygène est interrompue par le cyanure, poison bloquant le transfert d'électrons dans la chaîne respiratoire.

④ Il y a production de 38 molécules d'ATP par molécule de glucose (2 lors de la glycolyse et 36 lors de la respiration cellulaire). Le rendement énergétique est donc :

$$38 \times 30 / 2840 = 40,1 \%$$

⑤ EN CONCLUSION

$C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 + 38 ADP + 38 Pi \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O + 38 ATP$
Les $R'H_2$ n'apparaissent pas dans le bilan car la chaîne respiratoire réoxyde les 12 $R'H_2$ par molécule de glucose produits lors de la glycolyse (2 $R'H_2$ par molécule de glucose) et du cycle de Krebs ($2 \times 5 = 10 R'H_2$ par molécule de glucose).

UNITÉ 3 Les fermentations

Connaissances du programme

Certaines cellules eucaryotes réalisent une fermentation. L'utilisation fermentaire d'une molécule de glucose produit beaucoup moins d'ATP que lors de la respiration. [On se limite aux fermentations alcoolique et lactique].

Conseils et suggestions

– L'unité 1 a montré l'existence des fermentations en absence d' O_2 . Cette unité vise à préciser la nature des métabolismes fermentaires, à partir de l'étude comparative de deux exemples : la fermentation alcoolique (matériel biologique : la levure) et la fermentation lactique (matériel biologique : les bactéries lactiques).

– Le fait que la fermentation soit une dégradation incomplète du glucose permettant l'obtention d'une molécule organique a été établi à l'unité 1 p. 33.

– L'étude de deux exemples montre en complément l'absence de production d'ATP ultérieurement à la glycolyse et la régénération des R' nécessaires à la glycolyse, lors de la phase propre des fermentations.

– Des comparaisons entre les deux exemples de fermentations permettent de dégager leur dénominateur commun.

[pp. 38-39 du manuel de l'élève]

– Les réactions fermentaires réalisées varient selon les cellules concernées et donc selon leur équipement enzymatique. Ceci permet d'expliquer l'incapacité de nombreuses cellules eucaryotes à fermenter en raison de l'absence d'équipement enzymatique adéquat.

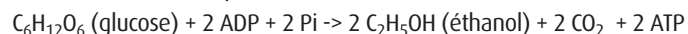
– La moindre production d'ATP lors de la fermentation par rapport à la respiration est à mettre en rapport avec une croissance moindre de la population de levures vue dans l'unité 1 p. 33.

Exploitation des documents pour la réalisation d'une tâche complexe

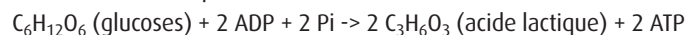
Réaliser une observation microscopique. Exploiter des résultats expérimentaux. Communiquer sous forme de tableau.

– Équations- bilan :

Fermentation alcoolique :



Fermentation lactique :



– Nombre d'oxydation moyen des atomes de C :

Dans l'acide pyruvique, le nombre d'oxydation moyen du carbone est $+2/3$.

Après fermentation alcoolique, en tenant compte du carbone dégagé sous forme de CO_2 et du carbone de l'éthanol, le nombre

d'oxydation moyen du carbone devient 0 (-2 en moyenne dans l'éthanol et +4 dans le dioxyde de carbone). Il y a donc eu, globalement, réduction du carbone pendant les étapes strictement fermentaires. Cette réduction est couplée à la réoxydation de $R'H_2$ en R' .

Après fermentation lactique, dans l'acide lactique produit, le nombre d'oxydation moyen du carbone est 0. Là encore, la fermentation correspond à une réduction du carbone, couplée à la réoxydation de $R'H_2$.

– Rendement énergétique des fermentations (glycolyse incluse) : Dans le cas de la fermentation éthanolique, il y a production de 2 ATP par molécule de glucose et il reste une molécule d'éthanol. En considérant l'éthanol comme un substrat énergétique utilisable ultérieurement (voir l'exercice d'évaluation des compétences expé-

mentales pp. 70-71), le rendement vaut $2 \times 30 / (2840 - 1360) = 4,1 \%$. Si on estime que l'énergie de l'éthanol ne sera jamais utilisée par la suite, le rendement est de $2 \times 30 / 2840 = 2,1 \%$.

Dans le cas de la fermentation lactique, il y a production de 2 ATP par molécule de glucose et il reste une molécule d'acide lactique. Donc le rendement est du même ordre de grandeur que pour la fermentation alcoolique : $2 \times 30 / (2840 - 1200) = 3,6 \%$. Si on estime que l'énergie de l'acide lactique ne sera jamais utilisée par la suite, le rendement est de $2 \times 30 / 2840 = 2,1 \%$.

Ces rendements sont très inférieurs à ceux de la respiration cellulaire calculés à l'unité 2 (40,1 %).

Tableau comparatif des fermentations et de la respiration, voir bilan des unités p. 41.

CHAPITRE 3 Consommation et régénération de l'ATP dans la cellule musculaire

Les mécanismes moléculaires de la contraction musculaire reposent sur l'organisation cytotologique et moléculaire des myocytes squelettiques. Leur étude permettra d'aborder les mécanismes moléculaires de la conversion énergétique ainsi que l'origine et le rôle de

l'ATP. Plusieurs activités pratiques réalisables avec les équipements disponibles dans les établissements (microscopie optique, électrophorèse, exploitation d'électronographies) donnent le support concret des phénomènes.

UNITÉ 1 Des cellules spécialisées dans la contraction musculaire

[pp. 50-51 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

[Les] glissements de protéines les unes sur les autres [...] constituent le mécanisme moléculaire à la base de la contraction musculaire.

Conseils et suggestions

- L'unité 1 permet d'identifier les acteurs de la contraction musculaire, à différentes échelles.
- La première partie de l'unité propose une activité pratique simple (observation de cellules musculaires striées squelettiques), et des électrophorèses. Elle permet de bien distinguer les échelles cellulaire et moléculaire.
- La seconde partie permet de mettre en évidence les principales protéines intervenant dans la contraction, et de montrer que la contraction met en jeu leur glissement relatif (et non leur raccourcissement). L'expérience d'électrophorèse des protéines musculaires est réalisable en classe. Le protocole en est décrit de façon détaillée sur le site jean-jacques.auclair.pagesperso-orange.fr/proteines%20musculaires/intro.htm.
- La striation des myocytes est particulièrement visible sur du muscle provenant d'un animal fraîchement tué. L'observation peut se faire sur des muscles dilacérés de patte de criquet (fémur de

la 3^{ème} paire de pattes). Les criquets peuvent être euthanasiés par un passage de quelques heures (pas plus) au congélateur. L'observation nécessite le fort grossissement du microscope et un éclairage adapté. On peut aussi utiliser du muscle d'animal de boucherie (poisson fraîchement tué, lapin, veau). Le muscle cuit donne également de bons résultats (cuisse de lapin).

– La qualité du résultat de l'électrophorèse dépend là aussi de l'extrême fraîcheur du matériel utilisé. Les protéines des myofibrilles sont très nombreuses mais seules les plus abondantes sont faciles à révéler. La myosine des filaments épais est une protéine de structure quaternaire. La molécule est formée de deux chaînes lourdes identiques et quatre chaînes légères, globulaires, associées à la tête. Le type de myosine présent dans les myocytes squelettiques est la myosine II.

– Les électrophorèses du **doc. 4** ont été obtenues à très fort grossissement, après imprégnation de l'actine ou de la myosine, qui apparaissent en négatif. Les molécules de myosine purifiées s'assemblent spontanément en filaments épais.

– L'organisation du sarcomère est plus complexe que sur la représentation schématique du **doc. 5**, et de nombreuses autres protéines ont été identifiées. En particulier, dans les myofilaments fins, l'actine

(...)

est associée à une protéine fibreuse, la tropomyosine, elle-même liée à la troponine, protéine globulaire formée de 3 sous-unités, dont une qui se lie aux ions calcium. Elles assurent le contrôle de la contraction. La titine, protéine filamenteuse, longue de 1 µm, est liée, par son bout N-terminal, à une strie Z et par son bout C-terminal à la bande centrale du myofilament épais (dépourvue de têtes de myosine) à laquelle elle est fortement attachée. Ayant des propriétés élastiques remarquables, elle maintient les myofilaments épais centrés dans le sarcomère et limite l'étirement du sarcomère. La dystrophine permet l'ancrage des myofibrilles à la membrane cytoplasmique du myocyte, donc son raccourcissement lors de la contraction. Les mutations du gène de la dystrophine, porté par le chromosome X, entraînent des myopathies, dont la plus grave est la myopathie de Duchenne.

– C'est le glissement des myofilaments et non leur raccourcissement, qui permet la contraction. Cette découverte majeure a été faite séparément en 1954 par deux équipes de chercheurs, Jean Hanson et Hugh E. Huxley, d'une part, Andrew F. Huxley et R. Nieder Gerke, d'autre part.

– Les myocytes cardiaques possèdent des myofibrilles dont l'organisation est globalement la même que pour les cellules musculaires squelettiques. Les cellules musculaires lisses (de la paroi des vaisseaux ou d'autres organes internes) ne possèdent pas de myofibrilles.

Exploitation des documents dans le cadre d'une tâche complexe

Manipuler, saisir des informations et les organiser.

Les cellules musculaires squelettiques, très allongées et multinucléées (**doc. 1**, MO) ont un aspect strié en microscopie optique. En microscopie électronique (**doc. 1**, MET), on constate que cette striation transversale correspond à une alternance de bandes sombres et claires (d'opacité différente vis à vis des électrons). Le cytoplasme est occupé par de nombreuses myofibrilles, orientées

dans le sens de la longueur des myocytes. Chaque myofibrille est constituée d'une succession de sarcomères. Un sarcomère couvre une bande sombre, et deux demi-bandes claires.

Les électrographies du **doc. 2** révèlent que les sarcomères n'ont pas la même longueur dans un muscle relâché (environ 2,3 µm entre deux stries Z) et contracté (environ 1,7 µm entre deux stries Z). La contraction musculaire correspond donc à un raccourcissement des myofibrilles, lié à un raccourcissement de chacun des sarcomères qui les constituent.

L'électrophorèse dont les résultats sont présentés au **doc. 3** montre que les myocytes contiennent deux protéines principales : l'actine et la myosine (chaîne lourde et chaînes légères). Sur les électrographies du **doc. 4**, on peut observer un filament d'actine, constitué d'un assemblage en double hélice d'actine globulaire, et une molécule de myosine, comprenant une queue et deux têtes globulaires. L'électrographie du **doc. 5** et son schéma d'interprétation permettent de comprendre comment ces protéines sont assemblées : les molécules de myosine forment des filaments épais, disposés parallèlement les uns aux autres au niveau de la bande sombre de chaque sarcomère. Les filaments d'actine sont fixés de part et d'autre des stries Z. Ils sont seuls présents au niveau des bandes claires. Filaments fins et épais se chevauchent partiellement. Lors de la contraction musculaire, cette zone de chevauchement s'étend : les filaments fins et épais glissent les uns par rapport aux autres, si bien que les sarcomères raccourcissent sans qu'il y ait raccourcissement propre des filaments.

EN CONCLUSION, les unités contractiles élémentaires des myocytes sont les sarcomères, formés de myofilaments fins et épais. Ce sont les protéines de ces myofilaments qui sont responsables de la contraction. Lors de la contraction musculaire, les sarcomères raccourcissent, grâce au glissement des myofilaments. Les bases moléculaires de la contraction sont donc à rechercher dans les interactions entre les protéines des myofilaments.

UNITÉ 2 Conversions énergétiques et contraction musculaire

[pp. 52-53 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

L'hydrolyse de l'ATP fournit l'énergie nécessaire aux glissements de protéines les unes sur les autres qui constituent le mécanisme moléculaire à la base de la contraction musculaire. [...] L'ATP joue un rôle majeur dans les couplages énergétiques nécessaires au fonctionnement des cellules.

Conseils et suggestions

– L'étude des conditions nécessaires à la contraction des myofibrilles permet de montrer le rôle de l'ATP mais aussi des ions calcium dans le travail mécanique de la cellule musculaire. On se penchera plus particulièrement sur les modalités de l'hydrolyse de l'ATP et son couplage avec le mouvement, à savoir le déplacement de l'actine par rapport à la myosine.

– La régénération de l'ATP, intermédiaire énergétique, sera abordé dans l'unité suivante par l'étude des voies de production de l'ATP dans la cellule musculaire.

– De nombreuses animations du cycle actine-myosine sont disponibles sur internet et permettent une approche moléculaire dynamique et très attrayante. Par exemple

www.mrc-lmb.cam.ac.uk/myosin/Motility_%26_Bioc./cyclemovie.gif ou, à partir

d'images de microscopie électronique (sur la myosine V et non pas sur la myosine II), www.fbs.leeds.ac.uk/research/contractility/myosinv/index.htm#

– Dans l'expérience décrite au **doc. 1**, on utilise des myocytes squelettiques « pelés » ou « glycélinés ». Le traitement préalable subi par les cellules entraîne la désorganisation de toutes les membranes, y compris internes. Le mécanisme naturel de contrôle

de la contraction est ainsi « court-circuité ». Le raccourcissement observé, en présence d'ATP exclusivement, prouve que la molécule d'ATP intervient directement dans la contraction des sarcomères. Dans cette expérience, le milieu contient des ions calcium Ca^{2+} . Des films de cette expérience sont accessibles, par exemple, sur jean-jacques.auclair.pagesperso-orange.fr/fibre/atp%20fibres.htm ou sur www.youtube.com/watch?v=BqCj-S6cQgk. L'article suivant décrit la technique d'obtention des cellules musculaires « pelées » : CONTRACTION OF GLYCERINATED MUSCLE FIBERS AS A FUNCTION OF THE ATP CONCENTRATION ROGER COOKE AND WILLIAM BIALEK, BIOPHYS. J. © Biophysical Society .Volume 28 November 1979 241-258.

Exploitation des documents par les activités

Analyser des résultats expérimentaux. Comprendre un modèle des mécanismes de contraction musculaire.

① L'ajout d'ATP aux cellules musculaires glycinées permet la contraction des myofibrilles, et l'ATP est alors hydrolysé en ADP et Pi. Les autres conditions expérimentales décrites au **doc. 1** ne permettent pas la contraction (une décharge électrique, qui aurait pu mimer la commande nerveuse, est sans effet, ainsi qu'un ajout de glucose, substrat énergétique universel, ou que l'ajout de composés oxydants ou réducteurs pourtant fréquemment impliqués dans le métabolisme énergétique). Ces résultats montrent que l'hydrolyse de l'ATP intervient directement dans la contraction des myofibrilles, alors que les autres acteurs de la contraction sont indirects (glucose, commande nerveuse).

② Les filaments d'actine comportent des sites de liaison aux têtes de myosine (**doc. 3**), masqués lorsque la cellule musculaire est au repos. Ces sites se démasquent en présence d'ions calcium. Des ponts d'union entre myofilaments fins et épais peuvent alors se former. Ils sont bien visibles sur l'électronographie du **doc. 2**. Les résultats expérimentaux du **doc. 4** permettent de préciser le rôle des ions calcium et de l'ATP : en présence d'ions calcium, l'ATP permet une contraction des myofibrilles. En l'absence d'ions calcium, l'ATP permet au contraire un relâchement des myofibrilles.

③ Les résultats d'expériences dont le **doc. 5** fournit une synthèse montrent que la myosine a une activité catalytique ATPasique. L'hydrolyse de l'ATP est bien plus rapide (d'un facteur 200) si la myosine est liée à l'actine. De plus, l'ATP permet la dissociation du

complexe actine-myosine. Donc, ce complexe est transitoire, tant que de l'ATP est disponible. L'hydrolyse de l'ATP par les têtes de myosine, en présence d'actine, se traduit donc par une succession de fixations et de détachements entre têtes de myosine et actine. Le caractère transitoire des ponts d'unions paraît essentiel à la contraction musculaire. D'ailleurs, la rigidité cadavérique s'explique par la formation de ponts d'union plus durables que dans une cellule musculaire vivante.

④ La formation de ponts d'union et leur caractère transitoire ne suffisent pas à expliquer la contraction musculaire : il faut que les ponts d'union se fassent et se défassent non pas entre les têtes de myosine et les sites de l'actine les plus voisins au repos, mais entre les têtes de myosine et des sites de l'actine situés plus près des stries Z que ces têtes.

Le modèle de cycle de contraction du **doc. 5**, qui reprend sous une forme dynamique les informations apportées par les **doc. 1** à **5**, permet de montrer comment l'ATP déclenche le détachement de la tête de myosine et de l'actine, et non sa fixation, ce qui peut paraître contre-intuitif. Le couplage énergétique a lieu en deux temps. Lors de l'« activation » de la tête de myosine suite à l'hydrolyse de l'ATP, la molécule change de conformation. La libération, par la tête de myosine fixée à l'actine, des produits d'hydrolyse de l'ATP s'accompagne d'un nouveau changement de conformation de la myosine, qui provoque le mouvement. C'est donc la succession activation / fixation / désactivation / séparation qui fait qu'à chaque cycle de contraction, une tête de myosine interagit avec un site de l'actine situé de plus en plus près de la strie Z voisine. Les nombreuses têtes de myosine effectuent chacune pour leur compte des cycles de contraction, si bien que les myofilaments épais tractent les myofilaments fins vers le cœur de chaque sarcomère.

⑤ EN CONCLUSION

Dans une cellule musculaire, la conversion d'énergie chimique en énergie mécanique se fait grâce à des interactions moléculaires entre myosine, actine et ATP. Ces interactions génèrent le glissement des myofilaments d'actine et de myosine, donc la contraction. L'hydrolyse de l'ATP par la myosine liée à l'actine est une réaction chimique qui libère de l'énergie, ce qui rend possible le glissement relatif des myofilaments donc la production d'énergie mécanique. On parle de couplage chimio-mécanique.

UNITÉ 3

La régénération de l'ATP dans la cellule musculaire

[pp. 54-55 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

La fibre musculaire utilise l'ATP fourni, selon les circonstances, par la fermentation lactique ou la respiration. [Les autres aspects de l'énergie de la fibre musculaire sont exclus]

Conseils et suggestions

– Le détail des réactions de la respiration et de la fermentation est déjà vu par ailleurs (voir **Thème 1, Chap. 2**).

– Il s'agit ici de montrer que, dans les cellules musculaires, interviennent différentes voies de régénération de l'ATP suivant les moments et suivant les types de cellules.

– On rappellera à cette occasion que la source d'énergie exploitée par ces cellules est toujours de l'énergie chimique, présente dans les molécules provenant directement ou indirectement des aliments.

Exploitation des documents par les activités

Analyser des graphiques. Analyser des résultats expérimentaux.

① L'accroissement de la consommation de dioxygène pendant l'effort indique une augmentation de l'intensité de la respiration cellulaire, principale voie de régénération de l'ATP dans ce cas. Cette intensité est plus élevée lorsque l'intensité de l'effort augmente. Pendant les premières minutes, le volume de O_2 consommé augmente progressivement avant d'atteindre un plateau : il y a là un « déficit en dioxygène », puis la puissance d'effort demandée est constante. Pendant cette période, on peut émettre l'hypothèse que d'autres voies de régénération de l'ATP, ne nécessitant pas de dioxygène (anaérobies), interviennent. Après cessation de l'effort, l'intensité respiratoire diminue progressivement et n'atteint le niveau de repos qu'après plusieurs minutes : c'est la phase de récupération pendant laquelle l'organisme paie la « dette d' O_2 » contractée en début d'effort. La respiration assure alors la reconstitution de réserves utilisées pendant l'effort (phosphocréatine et glycogène).

② Dans une course de 100 m après échauffement (**doc. 2**), l'effort est très bref et intense. L'ajustement circulatoire et respiratoire, nécessaire à l'augmentation de l'intensité de la respiration mitochondriale, n'est pas assez rapide pour assurer la prise en charge des besoins en ATP par la respiration.

La diminution observée de la concentration en phosphocréatine dans le muscle pendant le sprint suggère qu'elle participe à la régénération anaérobie de l'ATP utilisé. L'hydrolyse de la phosphocréatine présente dans les cellules musculaires est couplée avec la phosphorylation de l'ADP en ATP (**doc. 3**). L'augmentation de la concentration en acide lactique, produit de la fermentation lactique, indique que cette voie de régénération de l'ATP (cf. **Chap. 2**), anaérobie également, participe au maintien de la concentration constante en ATP. On peut supposer que les réserves de phosphocréatine musculaire sont ensuite reconstituées, ce qui nécessite de

l'ATP (phase de récupération observée au **doc. 1**).

③ Les myocytes de type I sont riches en mitochondries (**doc. 4**) et en enzymes mitochondriales (**doc. 5**), ce qui suggère une activité respiratoire intense. La vitesse d'hydrolyse de l'ATP par la myosine, donc la contraction, est lente, tout comme la mise en route de la régénération de l'ATP par la respiration. La voie principale de régénération de l'ATP dans ces myocytes est la respiration.

À l'inverse, les myocytes de type II sont pauvres en mitochondries et riches en enzymes de la fermentation lactique, ce qui suggère que la fermentation est leur principale voie de régénération de l'ATP. Or, pour une quantité d'ATP produite identique, il faut 18 à 19 fois plus de glucose oxydé par la voie de la fermentation que par la respiration (**chap. 2**). Ainsi dans les myocytes de type II, le glycogène abondant fournit le substrat de la fermentation. La vitesse de l'hydrolyse de l'ATP, donc de la contraction, est rapide, tout comme la régénération de l'ATP qui se fait par une voie métabolique assez courte.

Les muscles squelettiques contiennent des proportions variables de ces différents types cellulaires. (On peut préciser que différents individus ont également des prédispositions à un type d'effort en fonction du rapport entre le nombre de myocytes de type I et II dans leurs muscles).

④ EN CONCLUSION

L'ATP est régénéré dans les cellules musculaires grâce à la respiration, à la fermentation lactique et à l'hydrolyse de la phosphocréatine. L'importance relative de ces différentes voies de régénération dépend, d'une part du moment, de l'intensité et de la durée de l'exercice musculaire, d'autre part du type de cellules musculaires mobilisées dans le mouvement (voir le schéma essentiel **page 59** et le graphique du bilan de l'unité 3 p. 57).

EXERCICES DU THÈME 1

Chapitre 1

[pp. 28-31 du manuel]

Les exercices de la rubrique « **Évaluer ses connaissances** », l'exercice guidé et l'exercice 6 sont corrigés à la fin du manuel élève (pp. 212).

⑤ VOYAGER VERS MARS

Analyser des graphiques

Réponse attendue :

1. Rappel des caractéristiques des différents spectres :

– spectre d'absorption des pigments chlorophylliens : l'énergie lumineuse est absorbée préférentiellement entre 400 et 500 nm

(radiations bleues) et entre 650 et 700 nm (radiations rouges). Le minimum d'absorption est à 550 nm (dans le vert).

– spectre d'action photosynthétique : l'activité photosynthétique est maximale pour autour de 450 nm et 650 nm. Elle est minimale vers 550 nm.

Il y a coïncidence entre le maximum d'absorption des radiations lumineuses dans les longueurs d'ondes bleues et rouges et le maximum de l'activité photosynthétique pour ces mêmes longueurs d'onde. Une activité photosynthétique optimale sera donc obtenue avec un éclairage dans le rouge et le bleu, qui sont les longueurs d'onde apportant l'énergie lumineuse utilisée pour la phase photochimique.

2. On s'intéresse à deux types de lampes potentiellement utilisables pour cultiver des plantes dans le vaisseau spatial (**doc. 2**) :

– La lampe à incandescence délivre une puissance radiative max de 0.7 u.a. vers 700 nm, 0.2 u.a. pour 600 nm et elle rayonne peu en-dessous de 550 nm. Éclairée avec ce type de lampe, la culture ne disposerait pas des radiations efficaces situées dans le bleu.

– La lampe fluorescente éclaire dans l'ensemble du spectre visible mais avec une puissance très irrégulière. Cependant, les deux pics vers 450 et 650-680 nm correspondent à des radiations photosynthétiquement efficaces.

Le **doc. 1** montre des résultats ExAO :

À l'obscurité, les algues consomment du dioxygène (respiration). À la lumière, en plus de respirer, elles réalisent la photosynthèse, ce qui se traduit par une augmentation de la concentration de dioxygène. Le facteur limitant est ici l'intensité de la lumière : la production de dioxygène est plus importante à 10000 lux qu'à 3000 lux.

En conclusion : pour optimiser énergétiquement la gestion des cultures dans le vaisseau, on pourra utiliser une lampe présentant les caractéristiques spectrales de la lampe à fluorescence, avec une intensité lumineuse telle que le rendement soit maximal.

⑦ FEUILLES DE SOLEIL ET FEUILLES D'OMBRE

Adopter une démarche scientifique

Réponse attendue :

On s'intéresse aux adaptations des feuilles dites d'ombre et de lumière du hêtre.

Le **doc. 1** montre que l'intensité de la photosynthèse (quantité de CO₂ fixée par unité de surface foliaire et de temps) augmente lorsque la puissance de l'éclairement augmente, pour la gamme de puissances explorée, pour les deux types de feuilles. Les feuilles d'ombre n'ont besoin que d'un faible éclairement (5 W.m⁻²) pour que la photosynthèse fixe plus de CO₂ que la respiration n'en consomme (voir **exercice 10**, notion de point de compensation), alors que pour les feuilles de lumière, il faut au minimum 25 W.m⁻² pour qu'ait lieu une photosynthèse nette (respiration déduite). Plus généralement, les feuilles d'ombre ont une photosynthèse plus active, pour un éclairement de puissance inférieure à 60 W.m⁻² environ. Pour des puissances d'éclairement plus élevées, inversement, les feuilles de lumière ont une meilleure performance. L'intensité maximale de la photosynthèse est plus élevée pour les feuilles de lumière (0,03 mg CO₂.m⁻².s⁻¹) que pour les feuilles d'ombre (0,02 mg CO₂.m⁻².s⁻¹). La photosynthèse est donc réalisée plus efficacement, aux faibles éclairagements, par les feuilles d'ombre et, aux forts éclairagements, par les feuilles de lumière.

Le **doc. 2** fournit des caractéristiques comparées des feuilles d'ombre et des feuilles de lumière : les feuilles d'ombre ont en moyenne une masse foliaire par unité de surface plus faible (0,4 contre 0,8 g.dm⁻²) et une surface foliaire plus importante (37 contre 27,6 cm²) que les feuilles de lumière. Elles sont donc vraisemblablement moins épaisses et/ou contiennent de plus larges lacunes aériennes. La densité des stomates est plus faible pour les feuilles d'ombre (153 mm⁻² contre 255), ce qui peut être mis en relation avec leur moindre intensité maximale de la photosynthèse. Enfin, les feuilles d'ombre sont plus concentrées en chlorophylle (12 g.kg⁻¹ de matière sèche au lieu de 8 g.kg⁻¹), ce qui peut expliquer leur bonne activité photosynthétique aux faibles éclairagements.

Si les feuilles d'ombre sont plus concentrées en chlorophylle, on peut se demander pourquoi l'intensité maximale de la photosynthèse est plus élevée pour les feuilles de lumière. Un indice vient de l'estimation des contenus en chlorophylle par unité de surface : si l'on considère que les pourcentages d'eau des 2 types de feuilles sont proches (mettons 80 %), on obtient une masse foliaire sèche de 0,16 g.dm⁻² pour la feuille de lumière, et de 0,08 g.dm⁻² pour la feuille d'ombre. Le calcul de la masse de chlorophylle donne alors, pour la feuille de lumière 7,9 mg par g soit $7,9 \times 0,16 = 1,264$ mg par dm², et pour la feuille d'ombre 12,0 mg par g soit $12 \times 0,08 = 0,96$ mg par dm². Les feuilles d'ombre sont donc moins riches en chlorophylle, par unité de surface (du fait de leur faible épaisseur et malgré la concentration de la chlorophylle), ce qui peut expliquer leur moindre activité photosynthétique maximale.

En conclusion : les feuilles d'ombre sont grandes, probablement fines, très concentrées en chlorophylle par unité de masse, mais peu concentrées en chlorophylle par unité de surface foliaire, ce qui peut expliquer qu'elles soient photosynthétiquement plus efficaces aux faibles éclairagements, et moins efficaces aux forts éclairagements. Les feuilles de lumière, petites, épaisses, dotées de nombreux stomates, sont efficaces aux forts éclairagements et peuvent atteindre des intensités photosynthétiques élevées. Les adaptations des deux types de feuilles à leur environnement sont donc aussi bien morphologiques que biochimiques.

⑧ L'ÉLYSIE, UNE KLEPTOMANE ORIGINALE

S'informer et raisonner

Réponse attendue :

1. L'élysie (**doc. 1**) appartient au groupe des animaux, dans lequel il n'y a pas d'organismes chlorophylliens. Pourtant, elle est capable de survivre pendant des mois, sans apport alimentaire, si elle dispose de lumière et de CO₂. Ses besoins nutritifs sont donc ceux d'un organisme photosynthétique.

Le **doc. 2** montre un cliché MET de cellule de glande digestive d'élysie. Le cytoplasme contient de nombreux organites compartimentés, contenant des grains d'amidon. Il s'agit de chloroplastes, bien reconnaissables à leur thylacoïdes. On peut penser que les cellules des glandes digestives de l'élysie ont internalisé des chloroplastes présents dans les algues dont la limace se nourrit. Cela peut d'ailleurs expliquer la couleur verte de l'élysie. L'élysie est donc une « kleptomane », c'est à dire une voleuse compulsive ... de chloroplastes

On peut penser (hypothèse à tester) que la photosynthèse réalisée par les chloroplastes de la vauchérie permet à l'élysie de s'approvisionner en matière organique comme un organisme chlorophyllien autotrophe.

2. Pour tester l'hypothèse, on soumet des élysies, préalablement nourries de vauchérie, à un jeûne de 7 mois (**doc. 3**). On mesure alors leurs échanges gazeux respiratoires (à l'obscurité, histogramme violet), et à la lumière (photosynthèse nette, histogramme jaune). On peut en déduire la photosynthèse brute (photosynthèse

(...)

nette moins respiration, histogramme vert). On constate que durant les 5 premiers mois, les chloroplastes demeurent fonctionnels. Puis, leur capacité photosynthétique diminue, si bien qu'après 7 mois de jeûne, la photosynthèse nette devient nulle (la respiration consomme tout le dioxygène libéré par la photosynthèse). La diminution de l'activité photosynthétique visible à partir du 6^{ème} mois est certainement due à une altération du fonctionnement des chloroplastes provenant des algues. (On peut signaler que l'entretien des chloroplastes nécessite le renouvellement de protéines codées par le génome nucléaire de l'algue, puis exportées vers le chloroplaste. Or, les gènes codant ces protéines sont absents du génome de la Vauchérie, ce qui oblige l'élusie à renouveler régulièrement «ses» chloroplastes).

En conclusion, l'élusie peut survivre plusieurs mois sans apport alimentaire, à condition qu'elle soit éclairée et que du CO₂ soit disponible, car certaines de ses cellules contiennent des chloroplastes fonctionnels, empruntés à des algues. Or, les chloroplastes sont les organites de la photosynthèse, capables d'en réaliser toutes les étapes.

⑨ L'EXPÉRIENCE D'ENGELMANN

Esprit critique

Réponses attendues:

1. Engelmann observe que ce sont les zones du filament d'algue éclairées par les longueurs d'onde rouges et bleues qui attirent le plus de bactéries. Partant de l'hypothèse que ces bactéries sont attirées par l'O₂ issu de la photosynthèse, Engelmann peut conclure que les radiations bleues et rouges sont les plus efficaces pour la photosynthèse.

2. Le spectre d'action photosynthétique représente l'intensité de la photosynthèse en fonction de la longueur d'onde de l'éclairement. De la même façon, l'accumulation des bactéries avides d'O₂ permet de visualiser l'intensité de la photosynthèse en fonction de la longueur d'onde : l'enveloppe des « masses bactériennes » donne indirectement l'activité photosynthétique en fonction de la longueur d'onde. On peut donc assimiler la distribution des bactéries sur le filament d'algues au premier spectre d'action photosynthétique obtenu expérimentalement.

3. Dans son exploitation des résultats, Engelmann ne tient compte que de la qualité de la lumière, c'est à dire sa longueur d'onde. Ce faisant, il admet implicitement que l'énergie apportée est la même pour toutes les longueurs d'onde du spectre. À son époque, la relation entre la longueur d'onde et l'énergie qui lui est associée n'était pas connue. Il était alors possible d'objecter à Engelmann que si les bactéries sont rassemblées dans certaines zones, c'est simplement parce que l'énergie apportée par les radiations bleues et rouges est plus importante que celle apportée par le vert, et non que les radiations vertes ne sont pas utilisables pour la photosynthèse.

Le **doc. 2** montre que dans le spectre de la lumière solaire, telle qu'elle parvient au sol, le flux de photons et l'irradiance dépendent de la longueur d'onde. Donc, que la photosynthèse dépende du nombre ou de l'énergie des photons, l'hypothèse qui sous-tend le raisonnement d'Engelmann n'est pas respectée.

4. Les conclusions d'Engelmann restent valables malgré tout car ni le flux de photons, ni l'irradiance n'ont de maximum dans le bleu et le rouge, et de minimum dans le vert. Les quantités d'énergie apportées selon les longueurs d'onde ne sont pas suffisamment différentes pour masquer les propriétés des pigments chlorophylliens vis à vis de ces dernières. Cela démontre que leur inefficacité photosynthétique est bien à relier aux propriétés des pigments chlorophylliens.

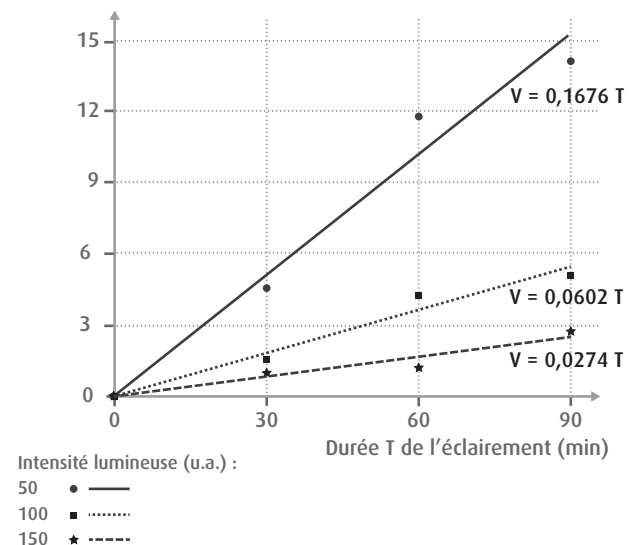
⑩ UNE COMPENSATION ENTRE PHOTOSYNTÈSE ET RESPIRATION

B2i

Réponse attendue:

1. et 2.

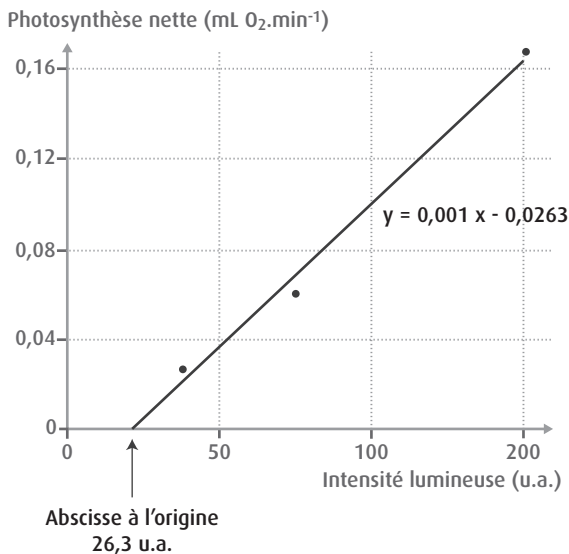
Volume V de dioxygène cumulé (mL)



Volume de dioxygène recueilli en fonction du temps, pour différentes intensités lumineuses

3. La pente des droites de régression correspond au volume de dioxygène recueilli par unité de temps, qui témoigne de la photosynthèse nette (ici, le volume de dioxygène libéré par photosynthèse, moins le volume de dioxygène consommé par la respiration). On peut donc appeler cette pente l'intensité nette de la photosynthèse. On constate que plus l'intensité lumineuse est élevée, plus l'intensité nette de la photosynthèse est importante.

4. On ne tient pas compte des données obtenues précédemment pour un éclairement nul. En effet, le dégagement de dioxygène est alors nul, mais cela ne veut pas dire que la consommation de dioxygène soit nulle (en effet, le dispositif expérimental ne permet que de recueillir le dioxygène dégagé, pas de mettre en évidence son éventuelle consommation). On reporte donc, en fonction de l'intensité lumineuse (50, 100 et 200 mmol photons.m⁻².s⁻¹), l'intensité nette de la photosynthèse (3 valeurs de pentes obtenues précédemment) :



Volume de dioxygène recueilli en fonction du temps, pour différentes intensités lumineuses

L'intensité lumineuse pour laquelle la photosynthèse et la respiration se compensent exactement peut être déterminée graphiquement : elle correspond à l'abscisse à l'origine de la droite de régression tracée sur le second graphique (c'est à dire à l'intensité lumineuse pour laquelle le dégagement de dioxygène est nul). On obtient une intensité de 26,3 mmols photons. m⁻².s⁻¹ au point de compensation, pour l'élodée utilisée.

Chapitre 2

[pp. 44-47 du manuel]

Les exercices de la rubrique «**Évaluer ses connaissances**», l'exercice guidé et l'exercice 6 sont corrigés à la fin du manuel élève (pp. 212-213).

⑤ FONCTIONNEMENT DE L'ATP-SYNTASE MITOCHONDRIALE

Interpréter des données expérimentales

Réponses attendues :

1. Dans la mitochondrie, le gradient de protons est généré lors du flux d'électrons dans la chaîne respiratoire de la membrane interne. Il est donc une conséquence de la réoxydation des composés R'H₂ issus de la glycolyse et du cycle de Krebs.

2. À l'obscurité, le pH dans les vésicules hybrides reste neutre, alors qu'à la lumière, ce pH devient acide (il diminue). Cela montre que les pompes à protons bactériennes sont orientées de telle façon qu'elle prélèvent des protons en dehors des vésicules et les libèrent dans le milieu intravésiculaire.

À la lumière (mais pas à l'obscurité), de l'ATP apparaît dans le milieu d'incubation. Cet ATP est issu de la phosphorylation de l'ADP disponible. Elle a lieu au niveau des complexes protéiques ATP-synthase. Ces complexes couplent un flux de protons (ici, un flux sortant) avec la synthèse de l'ATP. Il y a donc le même couplage entre gradient protonique et synthèse d'ATP que dans les mitochondries, mais l'origine du gradient protonique est différente.

⑦ MÉTABOLISME CELLULAIRE ET ÉVOLUTION

Tester une hypothèse

Réponses attendues :

1. D'après le schéma du doc. 1, si les mitochondries ont une origine endosymbiotique, on s'attend à retrouver :

- une double membrane à la périphérie des mitochondries, l'une héritée de la bactérie internalisée, l'autre héritée de la vésicule d'endocytose (c'est le cas, voir doc. 3 p. 36) ;
- du matériel génétique (ADN) dans la matrice mitochondriale (c'est le cas, voir atelier «enquête» p. 48) ;
- une chaîne respiratoire et une ATP synthase, dans la membrane plasmique des cellules bactériennes.

2. Les rickettsies sont des parasites intracellulaires obligatoires. Leur étude apporte des arguments en faveur de l'origine endosymbiotique des mitochondries. En effet :

- les rickettsies ont une structure très similaire à celle des mitochondries (double membrane, dont une dérivée de l'endocytose), et elles se développent dans le cytoplasme de cellules eucaryotes. Les mitochondries pourraient donc avoir évolué à partir d'une situation de ce type.
- les rickettsies sont incapables, comme les mitochondries, de réaliser la glycolyse. Elles prélèvent de l'acide pyruvique issu de la glycolyse cytoplasmique de leur hôte, tout comme les mitochondries.
- les rickettsies produisent des composés réduits R'H₂, au cours du cycle de Krebs.
- les rickettsies sont équipées d'une chaîne respiratoire très similaire à celle des mitochondries, au niveau de laquelle les composés R'H₂ sont réoxydés. L'accepteur final des électrons est le dioxygène, comme dans les mitochondries.

- Le gradient de proton généré par le flux d'électrons au niveau de la chaîne respiratoire permet la synthèse d'ATP par des ATP-synthases, orientées de la même façon dans les rickettsies et les mitochondries. Une différence entre rickettsies et mitochondries est que les mitochondries prélèvent de l'acide pyruvique et produisent de l'ATP à destination du cytoplasme (donc utilisable pour les activités de la cellule eucaryote) alors que les rickettsies pompent de l'acide pyruvique mais ne restituent pas l'ATP, dont elles font un usage privé destiné à leur croissance et à leur multiplication.

On pourrait comparer les séquences d'ADN de différentes bactéries, dont les rickettsies, et celle des mitochondries, pour tester si les mitochondries sont étroitement apparentées aux rickettsies (remarque : c'est le cas). Un tel apparentement contribuerait à renforcer l'hypothèse endosymbiotique.

⑧ UNE FERMENTATION OBLIGATOIRE POUR LES HÉMATIES

Mener une démarche explicative

Réponses attendues :

1. Les étapes menant à la formation d'acide lactique sont cytoplasmiques : glycolyse puis réduction de l'acide pyruvique en acide lactique.

2. Les érythroblastes sont des cellules ayant un noyau volumineux, et un cytoplasme contenant, notamment, des mitochondries. Leur différenciation en réticulocytes met en jeu la synthèse d'hémoglobine.

(...)

bine (qui nécessite l'expression de gènes nucléaires), puis l'expulsion du noyau. Enfin, les réticulocytes expulsent leurs mitochondries pour devenir des érythrocytes matures (ou globules rouges).

3. En l'absence de mitochondries, les érythrocytes ne peuvent réaliser la respiration cellulaire. Seule la glycolyse, cytoplasmique, assure la synthèse d'ATP. Les R' nécessaires à cette glycolyse sont régénérés par la fermentation.

⑨ LE SUCRE ET LES VINS

Esprit critique

Réponse attendue :

1. On divise la masse de sucre dans le jus (en g) par 17 pour obtenir le degré d'alcool attendu après fermentation (tableau ci-dessous). On constate que seul le vin d'Alsace doit être chaptalisé pour atteindre 12°, les autres jus sont suffisamment sucrés au départ. Les vins contiennent plus ou moins de sucre après fermentation : $306 - (12,5 \times 17) = 93,5 \text{ g.L}^{-1}$ pour le vin de grains nobles d'Alsace (vin doux).

$320 - (14 \times 17) = 82 \text{ g.L}^{-1}$ pour le Montbazillac (vin doux).

$231 - (13,5 \times 17) = 1,5 \text{ g.L}^{-1}$ pour le vin blanc sec du Sud-Ouest.

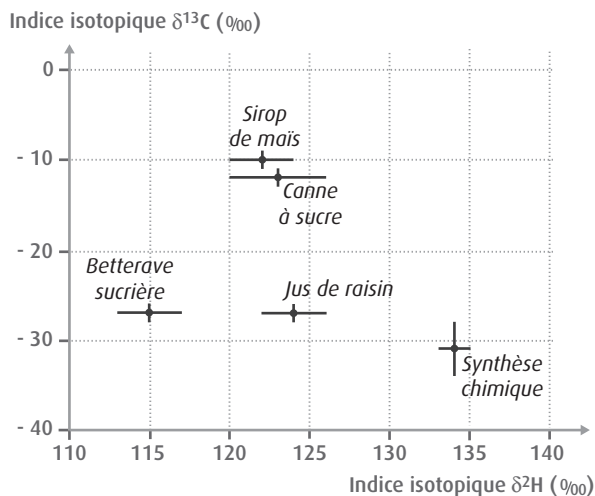
Vin	Masse de sucre dans le jus (g.L ⁻¹)	Degré alcoolique mesuré (°)	Degré alcoolique attendu (°)	Sucre à ajouter (g.L ⁻¹)	Sucre résiduel
Vin blanc d'Alsace	150	12	8,8	54	Aucun
Vins de grains nobles d'Alsace	306	12,5	18	Aucun	93,5
Vin blanc du Sud Ouest	231	13,5	13,6	Aucun	1,5
Montbazillac	320	14	18,8	Aucun	82

2. La chaptalisation est réglementée notamment parce qu'elle engendre une surproduction de vin (elle permet, en effet, de produire du vin à partir de raisin très peu sucré, initialement impropre à la production).

3. L'indice isotopique $\delta^2\text{H}$ permet de discriminer l'éthanol issu d'une synthèse chimique ou de la fermentation de la betterave sucrière, et celui issu d'une fermentation de jus de raisin. En revanche, sur la base de cet indice, l'éthanol provenant de la fermentation de canne à sucre ou de sirop de maïs peut être confondu avec celui issu de la fermentation du jus de raisin.

L'indice isotopique $\delta^{13}\text{C}$ ne permet pas de discriminer nettement l'éthanol issu d'une synthèse chimique et d'une fermentation de jus de raisin ou de betterave sucrière. En revanche, il peut permettre de détecter des alcools qui seraient obtenus par fermentation de canne à sucre ou de sirop de maïs.

En combinant l'utilisation de ces deux indices isotopiques (voir graphique), on doit pouvoir détecter les vins chaptalisés illégalement, quelle que soit la source du sucre, et aussi détecter les ajouts directs d'éthanol.



Contenu isotopique de l'éthanol issu de différentes sources

⑩ DES MALADIES MITOCHONDRIALES

B2i.

Réponses attendues :

1. Les enzymes codées par les gènes de l'ADN mitochondrial interviennent dans les réactions se déroulant dans la matrice (NAD déshydrogénase) ou sont associés à la membrane interne des mitochondries (cytochrome b, cytochrome oxydase, ATP-synthase).

2. Les tissus nerveux et musculaires sont très demandeurs en énergie, ce qui pourrait expliquer qu'ils soient parmi les premiers à souffrir si l'approvisionnement en ATP par les mitochondries est diminué.

Chapitre 3

[pp. 60-63 du manuel]

Les exercices de la rubrique «**Évaluer ses connaissances**», l'exercice guidé et l'exercice 9 sont corrigés à la fin du manuel élève (p. 212-213).

⑤ SUBSTRATS RESPIRATOIRES ET EFFORT MUSCULAIRE

Analyser des graphiques

(Dans cet exercice, les résultats des différents documents ne concernent pas le même individu, ce qui explique les différences concernant la puissance maximale, très variable d'un individu à l'autre, dans l'absolue et en pourcentage de la puissance maximale aérobie).

Réponses attendues :

1. Les principaux substrats respiratoires d'origine extra-musculaire utilisés lors de l'effort musculaire sont le glucose et les acides gras (voir **graphique p. 57**).

2. La consommation d'O₂ est due à la respiration. Plus la puissance imposée dans l'effort musculaire est forte, plus l'utilisation

de l'ATP est importante. Cet ATP est régénéré surtout grâce à la respiration. Donc l'accroissement de l'intensité de la respiration, observé lorsque l'effort augmente, permet la régénération de l'ATP. On approche un plateau ($VO_2 \text{ max}$) de $80 \text{ mL de } O_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ à partir d'une puissance de 350 W environ, chez l'individu étudié ici. L'ajustement respiratoire et circulatoire, requis pour assurer des besoins accrus, atteint une limite pour la puissance maximale aérobie de 400 W. Une puissance supérieure peut être atteinte sans augmentation de consommation de dioxygène. L'ATP supplémentaire nécessaire est alors produit par des voies anaérobies.

3. Le **doc. 2** montre que tant que l'effort est peu intense, les cellules musculaires utilisent presque exclusivement des substrats énergétiques prélevés dans le milieu extracellulaire (glucose, acides gras). À partir d'une puissance imposée correspondant à 25 % de la puissance maximale aérobie, soit 100 W (25 % de 400 W) chez l'individu étudié, les réserves de glycogène contribuent à fournir les substrats énergétiques de la respiration et de la fermentation (et le prélèvement de glucose sanguin se poursuit). Cette contribution est d'autant plus importante que l'effort est intense. On peut remarquer que la consommation de glycogène n'évolue pas de façon linéaire en fonction de la puissance de l'effort. En effet, pour produire une certaine quantité d'ATP, la fermentation nécessite une quantité 18 ou 19 fois supérieure de glucose que la respiration. L'augmentation de la consommation de glycogène pour des puissances élevées correspond à une part croissante de la fermentation dans le métabolisme énergétique de la cellule, due à la limite de l'adaptation circulatoire et respiratoire qui permet l'approvisionnement en O_2 . Entre 100 et 150 % de la puissance maximale aérobie, la consommation de glycogène par unité de temps est ainsi multipliée par 3.

L'histogramme du **doc. 3** montre que la quantité de triglycérides présente dans le muscle après l'effort musculaire intense a diminué de presque 50 %. Or, l'oxydation des triglycérides permet une synthèse d'ATP. On peut faire l'hypothèse que cette oxydation se fait dans la cellule musculaire pendant l'effort et participe à la régénération de l'ATP.

⑥ RÉGÉNÉRATION DE L'ATP ET FATIGUE MUSCULAIRE

S'informer et raisonner

Réponses attendues :

1. Le **doc. 1** permet de mettre en évidence une fatigue d'un muscle fléchisseur du doigt, chez la souris : stimulé électriquement, ce muscle répond par une contraction d'une certaine force (que l'on mesure). Si les stimulations (de durée 350 ms à la fréquence de 70 Hz) se produisent toutes les 4 secondes, la force de contraction diminue légèrement entre les toutes premières contractions, puis se maintient à un niveau élevé pendant deux minutes. Pour un écart de 3,2 ou de 2,4 secondes entre les stimulations, la force de contraction est la même que pour un écart de 4 secondes. En revanche, pour seulement 1,6 seconde d'écart entre stimulations, la force de contraction diminue fortement, de stimulation en stimulation. C'est la marque d'une fatigue musculaire (une même stimulation provoque une contraction de moins en moins forte). Lorsque du cyanure est ajouté en milieu, la fatigue musculaire apparaît même lorsque les stimulations sont espacées de 4 secondes, et

elle est très forte pour 3,2 secondes entre stimulations. Le cyanure, qui empêche la synthèse d'ATP par la respiration mitochondriale, favorise donc la fatigue musculaire.

On peut donc proposer que la fatigue musculaire soit liée à un déficit d'ATP dans les cellules musculaires (hypothèse à tester). Si c'est le cas, on s'attend à ce que la concentration d'ATP dans les myocytes diminue lorsque la fatigue musculaire se manifeste, et à ce que cette fatigue soit d'autant plus marquée que l'ATP est peu concentré dans les myocytes.

Le **doc. 2** permet de valider l'hypothèse, car on observe très exactement ce qui est attendu si l'hypothèse est valide (mais c'est le Pi qui est dosé, et non pas l'ATP) : différents protocoles de fatigue sont utilisés. On dose le Pi et on mesure la force de contraction des myocytes. Les points expérimentaux s'alignent pratiquement dans un diagramme représentant la force de contraction en fonction de [Pi] : en l'absence de protocole de fatigue (témoin), la force de contraction est élevée et Pi est peu concentré (presque tout le Pi est incorporé dans de l'ATP). Plus le protocole de fatigue est intense, moindre est la force de contraction, et plus Pi est concentré.

⑦ LA KINÉSINE, UN MOTEUR MOLÉCULAIRE

S'informer et raisonner

Réponses attendues :

1. Le **doc. 2** montre que la bille liée à la kinésine (qui permet de visualiser les déplacements de la kinésine) se déplace le long d'un microtubule, à une vitesse d'environ $1,5 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Le **doc. 3** précise les modalités de ce déplacement : il se fait par « pas » de 8 nm. Chaque pas pourrait correspondre au cycle élémentaire du mouvement.

2. Le mouvement se fait en présence d'ATP : on peut faire l'hypothèse que l'hydrolyse de l'ATP permet, grâce à un couplage énergétique, le déplacement de la kinésine le long du microtubule. Cette hydrolyse peut a priori être due soit à la kinésine, soit aux microtubules, mais le fait que la kinésine comporte un site de fixation à l'ATP laisse supposer que c'est plutôt la kinésine qui a une activité ATPasique. Par analogie avec le fonctionnement des têtes de myosine liées à l'actine, on peut proposer que la partie globulaire de la kinésine, qui fixe à la fois l'ATP et le microtubule, change de forme lors de l'hydrolyse de l'ATP, puis se détache. Un cycle impliquerait un déplacement de 8 nm et l'hydrolyse d'un certain nombre de molécules d'ATP (peut-être une molécule, comme dans le cas de la myosine).

⑧ UNE INTOLÉRANCE À L'EXERCICE MUSCULAIRE

B2i

Réponses attendues :

Les clichés MO du **doc. 1** montrent que les myocytes de l'enfant malade sont peu colorés en rose, ce qui révèle une très faible concentration de glycogène musculaire par rapport à l'enfant sain. Or, le glycogène constitue une réserve de glucose utilisable par le muscle comme substrat oxydatif. Donc, chez l'enfant malade, les muscles dépendent davantage de l'apport en glucose sanguin, qui peut se révéler insuffisant en cas d'effort soutenu.

(...)

La glycogène synthétase est une enzyme qui comme son nom l'indique intervient dans la synthèse de glycogène. L'étude des séquences du brin codant cette enzyme (**doc. 2**) permet de détecter la substitution de C par T sur le site 1382. Cette mutation entraîne l'apparition d'un codon stop prématuré sur l'ARNm correspondant : la protéine est tronquée donc inactive. Comme l'enfant est homozygote, seule cette forme tronquée de l'enzyme est présente.

EN CONCLUSION, la faible résistance à l'effort s'explique ici par une mutation du gène de la glycogène synthétase musculaire qui a pour conséquence l'absence de réserves de glycogène musculaire.

Objectif Bac

[pp. 66-69 du manuel]

1 SUBSTRATS ÉNERGÉTIQUES ET MARATHON

Réponse attendue :

Lors d'un marathon, différents coureurs n'ont pas le même profil de vitesse. On cherche à comprendre pourquoi certains individus ont une défaillance (appelée le « mur des marathoniens ») plus précoce que d'autres.

Le **doc. 2** permet de comparer les sources d'énergie utilisées par deux coureurs au cours d'une course de plus de 3 heures. Chez les deux coureurs, l'utilisation des substrats oxydatifs change au cours du temps pendant le marathon, mais de façon différente. Rappelons que le glycogène musculaire est présent dans les cellules musculaires. Le glucose sanguin est renouvelé à partir du glycogène hépatique. Les acides gras sont issus de l'hydrolyse des lipides musculaires et sous-cutanés et contribuent à la teneur du sang en glucose. Chez le coureur entraîné, le glycogène musculaire assure l'essentiel des besoins en début de course (première demi-heure), puis sa part relative diminue rapidement pendant que celle des acides gras et du glucose plasmatique augmentent (presque 40% chacun au bout de 60 mn environ). La part du glucose plasmatique diminue ensuite lentement puis se stabilise alors que celle des acides gras atteint un palier de 65% environ jusqu'à 250 mn. Chez le coureur peu entraîné, il y a d'abord utilisation du glycogène musculaire, mais cette utilisation reste importante plus longtemps que chez le coureur entraîné : le relais est pris moins rapidement et moins intensément par le glucose plasmatique et surtout, la contribution des acides gras est moindre : la part des acides gras dans la prise en charge de la dépense apparaît plus tard et elle reste moins importante que chez le sujet entraîné (50 %).

Pour les deux coureurs, « le mur », qui apparaît plus tôt chez le coureur non entraîné (200 min contre 240 min) correspond à une rupture en ce qui concerne les parts relatives de ces trois sources d'énergie : chute brutale de l'utilisation du glycogène musculaire et du glucose sanguin. Mais seul le coureur entraîné arrive à augmenter la part énergétique des acides gras (plus de 80 % contre moins de 50 %).

Le **doc. 3** fournit des informations quantitatives sur les réserves de l'organisme en substrats énergétiques. Sachant que la course (à 12 km.h⁻¹, ce qui correspond à la vitesse des marathoniens en début de course) consomme de l'ordre de 60 kJ.min⁻¹, l'énergie

potentielle présente dans le glycogène musculaire, qui est utilisé en priorité comme substrat, permettrait une course d'environ 70 mn s'il était utilisé entièrement et exclusivement (4284/60). Le relais énergétique est pris par le glucose sanguin (les 15 g comptabilisent également le glucose lymphatique) et les acides gras. La transformation du glycogène hépatique en glucose fournit de l'énergie supplémentaire, mais cette source serait épuisée en 30 min environ. Donc au bout de 100 min de course environ, les réserves glucidiques seraient potentiellement épuisées. Comme ces réserves sont mobilisées dès le départ et de façon très importante, elles diminuent rapidement. Le « mur » pourrait correspondre à leur épuisement, ou au moins à une limite dans leur mobilisation. Le relais des acides gras, qui sont la principale réserve énergétique de l'organisme, rend possible l'effort prolongé, à condition qu'il apparaisse assez tôt pour que les réserves glucidiques contribuent jusqu'à l'issue de la course. Ce relais se fait plus tôt chez le coureur entraîné car il dispose de meilleures aptitudes métaboliques stimulées par l'entraînement : le « mur » apparaît moins tôt.

Sur le **doc. 1** on constate que les coureurs ne rencontrent pas « le mur » au même moment. Le coureur 1 termine même sa course sans avoir rencontré ce « mur ». D'après les **doc. 2** et **3**, la sensation de « mur » correspond à l'épuisement des réserves glucidiques, insuffisamment relayées par l'utilisation des lipides. Les différences entre coureurs pourraient être dues :

- à la quantité de réserves glucidiques présentes chez le coureur au départ (s'il y en a plus, elles s'épuisent moins vite).
- à la façon dont les lipides sont mobilisés pendant la course (s'ils sont mobilisés tôt, les réserves glucidiques s'épuisent moins vite aussi).

EN CONCLUSION, le coureur 1 est sans doute plus entraîné que 2 et lui-même plus que 3. L'entraînement favorise une mobilisation précoce des lipides, et ce relais se fait plus tôt chez le coureur entraîné car il dispose de meilleures aptitudes métaboliques stimulées par l'entraînement mais il ne faut pas négliger l'existence de différences individuelles (d'origine génétique) importantes.

2 L'ACQUISITION DE LA FONCTION PHOTOSYNTHÉTIQUE

Réponse attendue :

On s'intéresse à l'acquisition de la fonction photosynthétique par les plastides, au cours de leur développement.

Le **doc. 1** montre qu'avant la germination, les cellules d'un embryon de plante (présent dans la graine), contiennent des plastides de petite dimension (0,8 µm de long), sans thylacoïdes organisés. On appelle de type de plastides des proplastides. Après la germination, une plantule encore souterraine contient des étioplastes, plus grands (quelques µm de long), dans lesquels s'organisent les thylacoïdes, et qui contiennent de l'amidon (on peut se demander s'ils l'ont produit par photosynthèse, ce qui est peu probable, la plantule étant souterraine, ou bien à partir des réserves de la graine). Enfin, les tissus chlorophylliens d'une plantule sortie de terre contiennent des chloroplastes pleinement développés, de 10 µm de long environ, et contenant des thylacoïdes bien développés, et empilés en grana. Les plastides se développent donc d'un stade proplaste à un stade chloroplaste, au cours de la germination.

Le **doc. 2** fournit des résultats d'expériences menées sur des plantules d'avoine. Ces plantules, ayant germé à l'obscurité, sont placées à la lumière au début de l'expérience, puis on mesure leur contenu foliaire en chlorophylle ainsi que leur activité photosynthétique (à l'aide de $^{14}\text{CO}_2$). On constate que l'activité photosynthétique évolue parallèlement au contenu foliaire en chlorophylle. Après 24 h d'éclairement, le contenu en chlorophylle, initialement nul, atteint 1600 mg.g^{-1} (de matière fraîche probablement). L'activité photosynthétique est décelable environ 2 h après la transition obscurité/lumière, alors que le contenu en chlorophylle est d'environ 150 mg.g^{-1} et atteint son maximum après 24 h.

Le **doc. 3** fournit des résultats d'analyses biochimiques réalisées sur des plantules de pois. Ces analyses permettent de quantifier les protéines des plastes au cours de la transition étioplastes-chloroplastes. On constate qu'au temps 0, les étioplastes ne contiennent pas de protéines D1, D2, Lhcb2 et Lhcb4. Ces protéines sont détectables après 6 heures de lumière dans les étioplastes et elles sont présentes dans les chloroplastes à la valeur relative de coloration 100 après 24 h. Ainsi sous l'influence de l'éclairement, ces molécules participant à la construction des antennes collectrices de l'énergie lumineuse dans les photosystèmes sont progressivement synthétisées.

Les protéines RbcS et RbcL appartenant à l'enzyme RubisCO sont déjà présentes dans les étioplastes et leur quantité n'augmente pas avec l'éclairement.

EN CONCLUSION, des molécules enzymatiques comme la RubisCO sont synthétisées dans les plastes en absence de lumière. D'autres protéines, notamment des protéines des photosystèmes, ainsi que les pigments chlorophylliens, ne sont fabriqués que dans les étioplastes éclairés qui s'organisent alors en chloroplastes. Mais malgré la présence de RubisCO, le cycle de Calvin ne peut se réaliser dans les plantules souterraines, sans absorption d'énergie lumineuse par les photosystèmes. La capacité à photosynthétiser met en jeu un ensemble de molécules, intégrées à des organites structurés, les chloroplastes. Elle n'apparaît que dans les tissus soumis à éclaircissement.

③ CYANOBACTÉRIES ET ÉVOLUTION DE L'ATMOSPHÈRE PRIMITIVE

Réponse attendue:

Les cyanobactéries apparaissent dans le registre fossile il y a environ 3,5 Ga. On s'intéresse à leur métabolisme, et à leur contribution à l'évolution de la composition atmosphérique.

L'électronographie colorisée du **doc. 1** montre une cyanobactérie unicellulaire, dont le cytoplasme contient des compartiments allongés, légendés thylacoïdes. Des grains d'amidon sont présents dans le cytoplasme.

Le **doc. 2** montre que, dans une suspension de cyanobactéries placées à l'obscurité, il y a consommation d' O_2 (diminution de la concentration de 240 à $220 \text{ } \mu\text{mol.L}^{-1}$ en 4 minutes) et dégagement de CO_2 (de 15 à $20 \text{ } \mu\text{mol.L}^{-1}$) : ce sont des échanges gazeux respiratoires. À la lumière, il y a dégagement d' O_2 (de 330 à $240 \text{ } \mu\text{mol.L}^{-1}$) et consommation de CO_2 (de 20 à $15 \text{ } \mu\text{mol.L}^{-1}$) : ce sont des échanges gazeux photosynthétiques (qui se superposent aux échanges gazeux respiratoires) caractérisant la photosynthèse oxygénique.

Le **doc. 3** fournit des résultats expérimentaux réalisés sur des fractions cellulaires de cyanobactéries :

la comparaison des expériences 1 et 2 montre que la fixation du ^{14}C est très limitée ($4\,000 \text{ cpm}$ au lieu de $96\,000 \text{ cpm}$) en l'absence de thylacoïdes éclairés au préalable. Cependant, la fixation n'est pas nulle, ce qui traduit la présence, dans le cytoplasme, des acteurs de la phase chimique.

la comparaison des expériences 1, 2 et 4 montre que les thylacoïdes éclairés peuvent convertir l'ADP en ATP (phosphorylation) et le composé R en RH_2 (réduction), ce qui permet la fixation de la même quantité de $^{14}\text{CO}_2$ ($96\,000 \text{ cpm}$) dans l'expérience 4 que dans l'expérience 1, alors qu'il n'y a quasiment pas de $^{14}\text{CO}_2$ fixé dans l'expérience 2. Les thylacoïdes des cyanobactéries réalisent donc la phase photochimique et convertissent l'énergie lumineuse absorbée en ATP et RH_2 .

L'apport d'ATP dans l'expérience 3 permet une fixation de ^{14}C accrue ($43\,000 \text{ cpm}$) par rapport à l'expérience 2, mais moindre que dans les expériences 1 et 4. Cela traduit le fait que l'ATP permet certaines étapes de la phase chimique (mais en l'absence de RH_2 , le cycle de Calvin ne peut pas boucler, le doc ne précise pas quelles sont les molécules organiques marquées).

L'apport complémentaire de RH_2 dans l'expérience 4 permet la réalisation de toutes les étapes réactionnelles du cycle de Calvin.

Cela confirme la capacité métabolique des cyanobactéries à réaliser la photosynthèse oxygénique.

On a donc un faisceau d'arguments qui suggèrent que les cyanobactéries sont capables de réaliser la photosynthèse oxygénique (échanges gazeux, présence d'amidon dans le cytoplasme), et on peut assimiler le cytoplasme des cyanobactéries au stroma des chloroplastes, et leur compartiments allongés aux thylacoïdes. Quelle est leur possible contribution à l'évolution de l'atmosphère primitive ? Les cyanobactéries sont apparues vers -3.5 Ga , dans une atmosphère réductrice très riche en CO_2 et dépourvue d' O_2 . En libérant du dioxygène, elles ont contribué à la transformation de l'atmosphère, des conditions réductrices initiales aux conditions oxydantes actuelles.

④ L'APPROVISIONNEMENT DES NEURONES EN SUBSTRATS ÉNERGÉTIQUES

Réponse attendue:

Les cellules gliales, autrefois considérées comme ayant seulement un rôle de soutien du tissu nerveux, apparaissent aujourd'hui comme des fournisseurs de substrats énergétiques pour les neurones. On s'intéresse aux modalités de cette approvisionnement.

Le **doc. 1** propose un modèle des flux de nutriments et de métabolites au sein du tissu nerveux. Il apparaît que les cellules gliales contiennent des réserves de glycogène, qu'elles constituent à partir du glucose prélevé dans la circulation sanguine. Elles peuvent métaboliser le glucose et leurs réserves selon la voie de la glycolyse (productrice d'ATP), suivie d'une étape fermentaire. Elles produisent ainsi de l'acide lactique. Les neurones ont un approvisionnement direct en glucose, en provenance de la

(...)

circulation sanguine, et ils peuvent convertir l'acide lactique fourni par les cellules gliales en acide pyruvique, qui est ensuite pris en charge par la respiration mitochondriale, grosse productrice d'ATP, en présence de dioxygène. On cherche à tester ce modèle.

Le **doc. 2** fournit une coupe marquée du tissu cérébral. Le marquage met en évidence une enzyme, la glycogène phosphorylase, qui participe à la dégradation des réserves de glycogène. On constate que seules les cellules gliales sont fortement marquées. Ce résultat soutient certaines caractéristiques du modèle : les cellules gliales possèdent de la glycogène phosphorylase, au contraire des neurones, ce qui est en accord avec la localisation de réserves de glycogène dans les cellules gliales, et non pas dans les neurones. Mais on ne peut pas savoir si ces réserves peuvent profiter aux neurones, ou seulement aux cellules gliales.

Le **doc. 3** indique le temps pendant lequel des neurones restent actifs, durant une hypoglycémie. Ce temps est mis en relation avec la quantité de réserves de glycogène dans le tissu cérébral, avant l'expérience. On constate que les neurones des rats dont le cerveau contient beaucoup de glycogène (dans les cellules gliales) résistent mieux à l'hypoglycémie que ceux des rats dont le cerveau a moins de réserves : l'encéphalogramme plat est obtenu après en moyenne 175 min avec 75-80 nmol de glycogène par unité de masse protéique, contre 90 min avec 40-45 nmol de glycogène. Cette expérience montre que les réserves de glycogène des cellules gliales (**doc. 1**) peuvent soutenir la production d'ATP, donc l'activité des neurones, si l'approvisionnement direct en glucose est empêché. Mais on ne peut pas savoir si les cellules gliales libèrent du glucose issu de la dégradation du glycogène, ou un autre métabolite (l'acide lactique d'après le modèle du **doc. 1**).

Le **doc. 4** donne des résultats d'expériences réalisées sur des coupes de cerveau de rat.

En présence de glucose, les neurones de ces coupes maintiennent une activité normale pendant les 140 minutes de l'expérience. La concentration d'ATP est quasiment constante et des stocks de créatine-phosphate se constituent.

En l'absence de substrat énergétique (de 0 à 100 minutes), les stocks de créatine-phosphate sont consommés, et la concentration d'ATP diminue progressivement par rapport à la situation témoin avec glucose. L'activité des neurones devient nulle en 20 minutes (ce qui diminue leur consommation énergétique, et prolonge donc leur survie). L'activité neuronale reprend, la concentration d'ATP redevient normale, et les stocks de créatine-phosphate se reconstituent quand les coupes sont transférées dans un milieu glucosé.

Enfin, en présence d'acide pyruvique, la concentration d'ATP demeure normale pendant la durée de l'expérience. À la transition entre milieu glucosé et milieu contenant de l'acide pyruvique, on observe une consommation de créatine-phosphate, et une chute de l'activité neuronale. Toutefois, cette activité reprend progressivement, ce qui montre que les neurones peuvent utiliser l'acide pyruvique fourni. Ces observations sont compatibles avec le modèle du **doc. 1** (utilisation, par les neurones, d'acide lactique fourni par les cellules gliales), mais ne permettent pas de démontrer que ce transfert d'acide lactique a effectivement lieu.

L'ensemble des données expérimentales est donc en accord avec le modèle proposé (il n'y a rien d'incompatible avec ce modèle). Certains aspects du modèle sont validés par ces résultats (présence dans les cellules gliales de l'équipement enzymatique nécessaire à la dégradation du glycogène, contribution de ces réserves à la survie des neurones en cas d'hypoglycémie, capacité des neurones à métaboliser l'acide pyruvique) mais d'autres aspects ne sont pas abordés (nature du métabolite transféré des cellules gliales aux neurones, et modalités de ce transfert).

THÈME 2 ATMOSPHÈRE, HYDROSPHÈRE, CLIMATS : DU PASSÉ À L'AVENIR

CHAPITRE 1

L'évolution climatique et atmosphérique récente

UNITÉ 1 Les climats actuels de la Terre

[pp. 80-81 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

Les enveloppes fluides de la Terre (atmosphère et hydrosphère) sont le siège d'une dynamique liée à l'énergie reçue du Soleil. [...] Le climat, à l'échelle globale ou locale [...]

Conseils et suggestions

– Dans cette unité, l'objectif est de bien différencier ces notions. L'étude des **doc. 1** et **2** permet de cerner les paramètres définissant conditions climatiques et météorologiques et de mettre en évidence la différence d'échelle temporelle. L'utilisation d'extraits de journaux télévisés en tant que document initiateur serait pertinente pour relativiser la qualité scientifique de ces médias généralistes : climats et conditions météorologiques sont souvent confondus. Classiquement, un climat correspond à des paramètres moyennés sur une trentaine d'années. Dans le **doc. 2**, les villes ont été choisies de telle façon qu'elles soient localisées quasiment à la même latitude. Voir par exemple le site suivant qui fournit certaines données à travers le monde : www.meteobelgique.be/article/climatogramme.html. Le **doc. 3** permet de remettre en mémoire la zonation climatique terrestre.

– La seconde partie de cette unité est consacrée à la recherche de l'origine de la répartition des climats. Le **doc. 4** montre qu'au sommet de l'atmosphère (TAO), l'énergie reçue annuellement dépend seulement de la latitude, ce qui résulte de la sphéricité de la Terre. Au sol, la latitude n'est pas le seul facteur qui contrôle la quantité d'énergie solaire reçue. On cherche à expliquer la différence entre l'énergie reçue au sommet de l'atmosphère (TOA) et au sol. L'énergie reçue à la surface a des valeurs sensiblement plus faibles qu'au sommet de l'atmosphère, donc l'atmosphère réfléchit et/ou absorbe une partie de cette énergie. On remarque aussi que la zonation est moins stricte qu'au sommet de l'atmosphère, ce qui laisse penser que d'autres facteurs interviennent, en particulier la couverture nuageuse (à tout instant, environ 63 % de la surface de la Terre est recouverte par des nuages). Les **doc. 5** et **6** montrent qu'une partie de l'énergie reçue au niveau de l'équateur est transférée vers des latitudes plus élevées par le biais de la circulation atmosphérique et océanique. On peut constater dans le graphe du

doc. 6 que l'atmosphère transfère à peu près la même énergie vers les régions polaires quel que soit l'hémisphère, alors que l'océan transporte davantage d'énergie dans l'hémisphère nord (Lien avec la position géographique des continents).

Exploitation des documents lors des activités

Saisir des informations et les mettre en relation.

① On constate que sur le site de Bordeaux-Mérignac, les paramètres météorologiques moyennés sur un an diffèrent pour les 3 années considérées : l'année 2010 apparaît en moyenne plus froide que 2003 (année de canicule importante) et même que 2001. Les données climatiques moyennées sur 30 ans (1951-1980 et 1981-2010) mettent en évidence une augmentation des températures et des précipitations.

② Les 4 villes pour lesquelles on dispose d'un climatogramme sont situées pratiquement à la même latitude (entre 22 et 25° S), et sont des villes côtières. Rio de Janeiro et Maputo, qui ont une pluviométrie importante et des températures élevées, ont un climat tropical ou subtropical, chaud et humide. Antofagasta et Swakopmund ont un climat un peu plus froid, mais surtout beaucoup plus sec. On peut mettre ces différences climatiques en lien avec l'orientation de la côte : aux basses latitudes, les vents dominants sont des vents d'est (alizés), donc Rio et Maputo sont exposées à des vents d'origine océanique, chargés d'humidité, alors que la Namibie et l'Atacama sont soumis à des vents qui ont franchi les continents et ont perdu l'essentiel de leur humidité.

③ La répartition des climats (**doc. 3**) s'explique globalement par la répartition de l'énergie solaire reçue au sol par la Terre, objet sphérique (**doc. 4**). La nébulosité module l'énergie reçue au sol, par rapport à celle reçue au sommet de l'atmosphère (TOA). Les courants océaniques (**doc. 5**) (et les mouvements atmosphériques) modifient localement les climats.

④ Le **doc. 6** montre que de l'énergie reçue en zone équatoriale et tropicale peut être transférée vers des latitudes plus élevées par les courants océaniques et atmosphériques. Quantitativement, l'atmosphère transfère plus d'énergie de l'équateur vers les pôles

(...)

que les continents. On constate que Rio et Maputo sont longées par des courants chauds en provenance de l'équateur, alors que Swakopmund et Antofagasta sont longées par des courants froids en provenance des hautes latitudes. Ces courants océaniques peuvent expliquer en partie la différence de climat entre ces villes.

5 EN CONCLUSION :

L'énergie solaire reçue au sommet de l'atmosphère et au sol diminue de l'équateur aux pôles, du fait de la sphéricité de la Terre (voir **acquis p. 76**). Les enveloppes fluides de la Terre (atmosphère et hydrosphère), qui sont le siège d'une dynamique liée à l'énergie reçue du Soleil, modulent régionalement les conditions climatiques. D'autres paramètres, comme les reliefs, l'éloignement d'un site à l'océan, ou encore la direction des vents dominants, rendent cette répartition encore plus complexe.

UNITÉ

2

Des changements climatiques au cours des derniers millénaires [pp. 82-83 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

[...] et d'autres indices (par exemple la palynologie) permettent de retracer les évolutions climatiques de cette période [...]

Conseils et suggestions

– À travers l'étude d'un site géographique précis (**doc. 1**), ici une vallée localisée en moyenne montagne (Vosges), on cherche à faire comprendre que la végétation peut être mise en relation avec certaines conditions climatiques (**doc. 2**). Les végétaux sont des indicateurs d'un climat, et les indices prouvant leur présence (essentiellement les grains de pollen, mais aussi sur certains fossiles, la structure foliaire, le nombre et la disposition des stomates, etc.) dans le passé peuvent donc permettre d'imaginer le climat régnant dans un lieu donné. Le diagramme du **doc. 2** permet de relier la présence de certains groupements végétaux et des conditions climatiques (précipitations et températures) dans lesquelles ces plantes existent. Comme les grains de pollen sont abondants et résistants, ils représentent des indices précieux pour reconstituer les groupements végétaux ayant occupé un site donné au cours du temps.

– La préparation d'une lame contenant des pollens extraits de tourbe permet aux élèves d'observer et d'identifier certains types de pollen puis de les attribuer à un type de végétal. (**doc. 4 et rabat 3**).

– L'outil de visualisation du site pollen.cerege.fr/fpd-epd permet d'établir des requêtes aboutissant pour un lieu choisi à des données palynologiques et à l'établissement de diagrammes polliniques. Le **doc. 5** a été obtenu à partir de données extraites de ce site. Seules quelques espèces ont été retenues de façon à assurer une lisibilité correcte du document. Ceci explique que la somme des types de pollen présents n'atteigne pas forcément 100 %.

– Dans le **doc. 6**, la carte donnant la répartition de la végétation, il y a 18 000 ans, a été établie à partir de la synthèse de données

palynologiques issues de multiples sites géographiques. La tourbe et les sédiments lacustres constituent des pièges sédimentaires favorables à la conservation des pollens.

Matériel pédagogique :

« Regards de climatologues » - Le goût des sciences - Coédition : CNRS, IRD, Scérén - 2010 DVD 1 et 2 : 34 focus sur les archives du climat.

Exploitation des documents lors des activités

Réaliser une préparation microscopique, utiliser une base de données palynologique, saisir des informations et les mettre en relation.

① Les paramètres climatiques (**doc. 1**) du site de la Wormsa (moyenne annuelle des précipitations 170 cm et température moyenne annuelle +9 °C) placent ce site, d'après le **doc. 2**, en forêt tempérée de feuillus et/ou de conifères. Or, d'après le **doc. 1**, la forêt du site étudié est dominée par le hêtre (feuillu) et des conifères (sapin et épicéa). La végétation observée correspond bien à la végétation attendue d'après les conditions climatiques locales.

② Un végétal produit du pollen dont la morphologie est caractéristique de l'espèce. La paroi pollinique particulièrement résistante assure une excellente conservation durant un temps très long. De plus, la petite taille des grains de pollen et leur grand nombre font que les pollens retrouvés dans des pièges sédimentaires continentiels sont assez représentatifs des peuplements végétaux locaux. L'ensemble de ces caractéristiques fait que les pollens permettent de reconstituer la végétation du passé.

③ *Travail personnel des élèves en fonction de la tourbe mise à leur disposition.*

④ Le **doc. 5** permet de délimiter des périodes où certains végétaux étaient prédominants, et, au vu des exigences écologiques de ces végétaux (rabat de couverture), de déterminer l'évolution du climat :

Périodes	Végétaux prédominants	Types de peuplements végétaux	Préférences climatiques		Variation climatique
			Précipitations	Température	
-17 000 à -13 500 ans	Poacées	Steppe	Exigences hydriques variables	Résiste au grand froid	Climat froid et sec
-13 500 à -10 500 ans	Pins et poacées	Steppe et forêt boréale	Importantes pour les pins de forêts boréales	Assez froides	Climat plus humide mais toujours froid
-10 500 à -6 500 ans	Noisetier	Forêts tempérées de feuillus	Importantes	Résiste bien au froid	Réchauffement
-6 500 à -4 000 ans	Hêtre	Forêt tempérée de feuillus	Importantes	Résiste bien au froid mais craint les gelées tardives	Sans doute climat plus sec
-4 000 à -3 500 ans	Hêtre, noisetier et sapin	Forêt mixte tempérée de hêtre, sapin et noisetier	Importantes, les sapins supportent mal les étés secs	Hêtre et sapin craignent les gelées tardives	*

* le piège sédimentaire cesse de fonctionner, il est donc difficile de décrire l'évolution climatique de cette dernière période

L'abondance du bouleau augmente sensiblement lors des changements de conditions climatiques, notamment vers -13 500 et vers -10 000 ans. Il s'agit d'une espèce pionnière qui est très exigeante en ce qui concerne l'humidité. Le chêne se développe à partir de -9 000 ans. Il est particulièrement abondant entre -7 000 et -6 000 ans, puis il régresse. Il caractérise une période relativement chaude.

⑤ Actuellement, le nord de l'Europe est recouvert d'une forêt boréale et la toundra existe dans l'extrême nord. Les forêts tempérées (mixtes et feuillus) prédominent de l'Angleterre au centre de l'Europe. La steppe est importante autour de la Mer Noire et de la Mer Caspienne. Une végétation caractéristique occupe le pourtour de la Méditerranée.

Il y a 18 000 ans, une grande partie de l'Europe était recouverte de glaces, et la végétation y était totalement absente. La toundra

et le désert périglaciaire étaient très étendus. Une steppe arborée caractérisait le pourtour de la Méditerranée.

En conclusion, entre -18 000 ans et aujourd'hui, le climat s'est réchauffé de façon notable, on est passé d'une période glaciaire à une période interglaciaire.

⑥ Si l'on est capable de dater des pièges sédimentaires, on peut, à partir de l'étude des grains de pollen conservés, non seulement décrire une évolution climatique, mais aussi caractériser la vitesse des variations de végétation et donc de paramètres climatiques. Toutefois, les séries sédimentaires sont rarement continues et d'assez longue durée. De plus, le nombre de sites favorables au piégeage des pollens est limité et ces sites sont souvent répartis de façon hétérogène (*renseignements que l'élève peut trouver sur le site pollen.cerege.fr/fpd-epd*).

UNITÉ 3 Des changements climatiques depuis 800 000 ans

[pp. 84-85 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

La composition isotopique des glaces et d'autres indices permettent de retracer les évolutions climatiques de cette période.

[Les élèves doivent connaître les apports essentiels de la glaciologie ...]

Conseils et suggestions

– Il s'agit ici de mettre en évidence l'un des apports essentiels de la glaciologie : à la différence des reconstitutions climatiques à partir des grains de pollen (vue précédemment), l'étude des glaces polaires fournit de longues séries continues de données. En 2005, le forage réalisé au dôme C dans le cadre du projet européen EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*) a permis de reconstituer l'évolution des températures antarctiques des derniers 800 000 ans.

– Dans la page de gauche, les élèves expliqueront, à partir de la mise en relation des différents documents proposés, pourquoi les forages dans les calottes polaires fournissent des archives continues et de grande durée. Différentes vidéos et informations sur les conditions de forage sont visualisables sur le site www.cnrs.fr/cw/dossiers/dospoles/index.html.

– La page de droite permettra de comprendre comment, à partir de la composition isotopique d'un morceau de carotte polaire, il est possible de connaître la température locale au moment des précipitations (*dans le cas du forage EPICA, c'est l'indice δD qui a été utilisé. Pour permettre aux élèves de se familiariser avec l'indice $\delta^{18}O$, on pourra leur proposer l'exercice guidé 4 page 92*).

(...)

– La notion de thermomètre isotopique (relation entre la composition isotopique des précipitations et la température qui règne) sera mise en évidence par l'étude de deux documents (**doc. 5 et 6**).

– En fin d'unité, on pourra utiliser l'animation suivante pour résumer les étapes permettant, à partir d'une carotte de glace, de reconstituer les températures du passé :

www.cea.fr/content/download/3932/298648/file/CEA_Thermometre-isotopique.swf

Matériel pédagogique :

« Regards de climatologues » - Le goût des sciences - Coédition : CNRS, IRD, Scérén - 2010 DVD 1 et 2 : 34 focus sur les archives du climat.

Exploitation des documents lors des activités

Saisir des informations et les mettre en relation.

① Le site de forage du Dôme C est situé dans une région particulièrement froide (température moyenne annuelle de -50°C) et sèche (pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 0 et 50 mm) de l'Antarctique (**doc. 1**). Ainsi, la faible quantité de neige tombant chaque année (faible accumulation de neige par an), l'absence de température positive (conservation des archives glaciaires sans fusion de celles-ci), l'épaisseur importante de l'inlandsis oriental (plus de 3 200 mètres de glace avant d'atteindre le socle rocheux, **doc. 2**) permettent d'expliquer que les archives glaciaires extraites (sous forme de carottes de glace, **doc. 3**) lors du forage du Dôme C couvrent les 800 derniers milliers d'années.

② Quand la teneur en deutérium de l'eau diminue, le rapport D/H dans l'échantillon diminue. En conséquence, la valeur de l'indice δD diminue. Une valeur de δD positive signifie que l'échantillon contient, en proportion, plus de deutérium que le standard, alors qu'une valeur de δD négative signifie que l'échantillon contient moins de deutérium que le standard.

③ Le δD peut être utilisé comme thermomètre isotopique car le rapport D/H varie au cours du cycle de l'eau (on parle de fractionnement isotopique) : les molécules d'eau les plus légères (H_2O) s'évaporent préférentiellement, si bien que l'eau atmosphérique est moins riche en deutérium que l'océan. Les molécules les plus lourdes (HDO essentiellement) se condensent préférentiellement, si

bien que la formation des nuages et les précipitations appauvrissent encore davantage l'eau atmosphérique en deutérium (**doc. 4**).

À l'échelle de la planète, on constate une zonation latitudinale du δD des précipitations (**doc. 5**) : le δD mesuré dans les précipitations au niveau de l'équateur est moins négatif que celui mesuré dans les précipitations polaires. Ces observations témoignent d'un appauvrissement progressif de l'eau atmosphérique en deutérium, au fur et à mesure que les masses d'air progressent de l'équateur vers les pôles. Un lien de proportionnalité (**doc. 6**) existe entre le δD mesuré dans les précipitations et la température atmosphérique mesurée en un lieu donné lors de ces mêmes précipitations : plus la température est faible, plus le δD est négatif.

④ Pour estimer la température en Antarctique il y a 360 000 ans (A), il est nécessaire de réaliser une extrapolation du graphique du **doc. 6**. Pour la température il y a 240 000 ans (B), une lecture graphique sur le **doc. 6** suffit.

Temps (années BP)	-360 000 (temps marqué A)	-240 000 (temps marqué B)
δD (‰)	-457	-371
Température ($^{\circ}\text{C}$)	-67	-53

⑤ On constate qu'au Dôme C, le δD a varié cycliquement entre -360 et -450 ‰ au cours des 800 000 dernières années, avec une période de l'ordre de 100 000 ans. On peut en déduire que la température moyenne annuelle a varié entre -52°C et -65°C .

⑥ EN CONCLUSION :

Les archives glaciaires permettent de reconstituer une histoire climatique car elles fournissent de longues séries continues : les faibles précipitations et les températures constamment négatives de l'Antarctique ont permis, au niveau du Dôme C, l'accumulation de plus de 3 200 mètres de glaces qui couvrent en continu les 800 000 derniers milliers d'années.

Les mesures de l'indice isotopique (δD) effectuées à différents niveaux des carottes de glace extraites, permettent de retracer l'évolution de cet indice isotopique et d'en déduire, du fait de la relation de proportionnalité existant entre la composition isotopique des précipitations et la température régnant lors des précipitations, l'évolution de la température du Dôme C au cours de ces 800 000 dernières années.

UNITÉ 4 L'évolution de la composition atmosphérique depuis 800 000 ans [pp. 86-87 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

Les bulles d'air contenues dans les glaces permettent d'étudier la composition de l'air durant les 800 000 dernières années y compris des polluants d'origine humaine.

[Les élèves doivent connaître les apports essentiels de la glaciologie...]

Conseils et suggestions

– Après avoir montré que les glaces polaires sont des archives continues qui, par l'analyse de la variations des rapports isotopiques, permettent de reconstituer l'évolution des températures locales sur plusieurs centaines de milliers d'années, l'objectif de l'**unité 4** est de montrer l'apport majeur de la glaciologie : la reconstitution

de l'évolution de la composition atmosphérique par l'analyse des bulles d'air contenues dans la glace.

– Les **doc. 1** et **2** permettent de visualiser, à différentes échelles, les bulles d'air contenues dans la glace et de savoir comment Claude Lorius a eu l'intuition que ces bulles d'air pouvaient contenir des archives de l'atmosphère (histoire des sciences, caractère fortuit de la découverte scientifique). Différentes vidéos (notamment des interviews de Claude Lorius) et informations sont disponibles sur le site www.cnrs.fr/cw/dossiers/dospoles/index.html.

– Le **doc. 3** indique les conditions de mise en place de ces bulles d'air dans la glace et permet d'expliquer pourquoi la glace d'une carotte polaire n'a pas le même âge que les gaz qu'elle contient. L'**exercice 10 p. 95** propose un travail sur ce sujet, à partir de données du forage de Vostok (Antarctique). Les données complètes, dont le manuel propose un extrait, sont accessibles aux adresses cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/vostok.icecore.co2 (âge de la glace et de l'air piégé, concentration en CO_2) et cdiac.esd.ornl.gov/ftp/trends/temp/vostok/vostok.1999.temp.dat (δD de la glace). Idéalement, l'élève pourrait se connecter, récupérer les données, puis les insérer dans un tableur grapheur, afin d'en tirer des représentations graphiques pertinentes.

– Dans la 2^e partie de l'unité, l'élève visualise les résultats de l'analyse des bulles de glace des carottes extraites du Dôme C (**doc. 4**) pour deux gaz minoritaires (CO_2 et CH_4). Il se rend compte de leur variation cyclique au cours des 800 000 derniers milliers d'années jusqu'à une période récente où leur concentration augmente de façon exponentielle, du fait des activités humaines (**doc. 5**). Le **doc. 6** montre que l'étude des bulles d'air contenues dans les glaces permet également de détecter certains polluants d'origine humaine (les CFC et le SF_6 sont purement anthropiques).

Matériel pédagogique :

« Regards de climatologues » - Le goût des sciences - Coédition : CNRS, IRD, Scérén - 2010 DVD 1 et 2 : 34 focus sur les archives du climat.

Exploitation des documents lors des activités

Saisir des informations et les interpréter.

❶ Avec le temps, la neige se compacte en se transformant en névé puis en glace. L'air contenu entre les particules de neige (ou de névé) se trouve, lors de cette transformation, emprisonné sous forme de bulles isolées (**doc. 3**). Les bulles d'air emprisonnées dans un échantillon de carotte glaciaire sont visibles à différentes échelles (à l'œil nu et au microscope) sur les deux images du **doc. 1**. Actuellement, nous disposons de moyens techniques permettant d'extraire l'air emprisonné dans la glace sous forme de

bulles d'air et de l'analyser pour connaître sa composition chimique. En 1965, lorsque Claude Lorius a eu l'intuition que la glace pouvait contenir les archives de l'atmosphère (**doc. 2**), ce n'était pas encore le cas.

❷ Il existe un décalage temporel entre l'âge de la glace et l'âge de l'atmosphère piégée. En effet, dans la neige et le névé, la porosité est ouverte : l'air contenu peut circuler entre les particules de neige (ou de névé) et réaliser des échanges avec l'atmosphère extérieure. Puis, lors de la transformation en glace (vers 80 à 100 m de profondeur, ce qui correspond, en première approximation d'après les valeurs des précipitations du **doc. 1 p. 84**, à un décalage temporel de plus de 2 000 ans), la porosité se ferme : les échanges gazeux avec l'atmosphère extérieure cessent.

❸ On constate que depuis 800 000 ans, les concentrations en dioxyde de carbone et en méthane ont varié parallèlement (pour le CO_2 , valeurs comprises entre 175 et 300 ppm ; pour le CH_4 , valeurs comprises entre 350 et 800 ppb) et de façon cyclique, avec une période de 100 000 ans environ.

Depuis la révolution industrielle, ces concentrations ont augmenté exponentiellement pour atteindre des valeurs jamais observées depuis 800 000 ans (taux de CO_2 en 2011 : 390 ppm ; taux de méthane en 2011 : 1 790 ppb).

❹ Depuis la révolution industrielle, les concentrations de CO_2 et de CH_4 ont augmenté exponentiellement (**doc. 4**) pour atteindre des valeurs jamais observées depuis 800 000 ans (taux de CO_2 en 2011 : 390 ppm ; taux de méthane en 2011 : 1 790 ppb).

Les sources anthropiques de méthane (les rizières, l'élevage bovins, les exploitations de gaz naturel et de charbon, les feux de forêts en lien avec la déforestation et les décharges) dépassent actuellement le double des sources naturelles (**doc. 5**). L'agriculture (rizières et élevage bovin), à elle seule, génère plus de méthane que les sources naturelles.

Certains gaz d'origine purement anthropique, comme les CFC (chloro-fluorocarbures) et le SF_6 (hexafluorure de soufre) utilisés dans la réfrigération et/ou comme gaz propulseurs sont également détectables dans les couches récentes des glaces des calottes polaires.

❺ EN CONCLUSION :

L'étude des gaz piégés dans les glaces polaires permet de connaître la composition passée de l'atmosphère (dans la limite des 800 000 dernières années pour le moment). On constate que certains gaz minoritaires (CO_2 et CH_4) ont vu leur concentration varier cycliquement (avec une période d'environ 100 000 ans) au cours de ces derniers 800 mille ans. Depuis la révolution industrielle, ces gaz, ainsi que d'autres purement anthropiques (CFC, SF_6 , etc.), ont vu leur composition fortement augmenter.

Connaissances du programme

L'effet de serre, déterminé notamment par la composition atmosphérique, est un facteur influençant le climat global.

Conseils et suggestions

– La page d'ouverture du chapitre (p. 97) peut servir de support pour mettre en évidence l'existence d'interactions entre le rayonnement solaire et l'atmosphère.

– Dans cette première unité, les documents proposés permettent de bien intégrer que l'effet de serre (volontairement non nommé) est un phénomène naturel indispensable pour expliquer la température globale moyenne de la Terre actuelle.

– À partir des informations fournies, les élèves vont progressivement construire le bilan radiatif de notre planète et vont ainsi mettre en évidence deux effets contradictoires de l'atmosphère terrestre :

- elle réfléchit une partie non négligeable du rayonnement solaire (= effet « refroidissant » car moins d'énergie arrive au niveau de la surface terrestre) ;
- elle absorbe, du fait de certains gaz minoritaires, une partie du rayonnement émis par la Terre (= effet « réchauffant » car cette énergie n'est pas restituée directement à l'espace).

– Le **doc. 1** permet de se familiariser avec la notion d'albédo et de se rendre compte qu'une partie seulement de l'énergie solaire reçue au sommet de l'atmosphère par la Terre est absorbée par le système terrestre : 31 % (soit un albédo de 0,31) de l'énergie solaire reçue est directement réfléchi soit par l'atmosphère (qui assure 84 % de la réflexion totale) soit par la surface terrestre (16 % de la réflexion totale).

– Cependant, à elle seule, l'énergie solaire reçue ne peut expliquer une température moyenne globale de 15 °C sur un corps semblable à la Terre, et ce quel que soit son albédo (**doc. 2**). Les valeurs théoriques du **doc. 2** ont été calculées à l'aide de la loi de Stefan-Boltzmann ($P = \sigma T^4$ où P est la puissance rayonnée par 1 m² de surface, T est la température (en K) et σ est une constante $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). Les albédos de différents milieux terrestres ont été placés au dessus de l'échelle des albédos allant de 0 (corps noir parfait) à 1 (miroir parfait) pour rendre concrète la notion d'albédo (et indirectement montrer que les activités humaines peuvent modifier l'albédo de la planète en modifiant la surface terrestre).

– À ce stade, on constate alors une différence de plus de 30 °C entre la température moyenne globale théorique de la Terre (-18,2 °C

pour un albédo de 0,3) et la température effective (+15 °C). Certains pourraient alors émettre l'hypothèse que l'énergie produite par la radioactivité interne de la Terre (Programme de Terminale : Thème 2-A – Géothermie et propriétés thermiques de la Terre) explique cette différence. Le **doc. 3** permet de réfuter cette hypothèse (en montrant que le flux provenant de l'intérieur de notre planète est beaucoup trop modeste par rapport aux autres flux d'énergie en présence) et de proposer une hypothèse : l'absorption par l'atmosphère d'une partie de l'énergie émise par la surface terrestre expliquerait la différence de température constatée.

– Les **docs. 4** et **5** permettent, dans un premier temps, de visualiser les longueurs d'ondes auxquelles s'effectue principalement l'absorption (à l'aide d'images de la Terre prises à différentes longueurs d'onde, à la même date), puis de quantifier plus finement l'absorption aux différentes longueurs d'onde et d'identifier les gaz responsables. On remarque que l'atmosphère terrestre, du fait de sa composition atmosphérique, est assez transparente au rayonnement solaire (on pourra rappeler le rôle important de l'ozone stratosphérique dans l'absorption des UV) et relativement opaque aux IR émis par la Terre (phénomène responsable de l'effet de serre).

Exploitation des documents lors des activités

Utiliser des données quantitatives. Formuler une hypothèse.

Communiquer sous forme de schéma.

① L'albédo de la Terre est le rapport entre énergie solaire réfléchi (106 W/m²) et incidente (342 W/m²). Il vaut donc $106/342 = 0,31$ (grandeur sans unité).

L'atmosphère a un rôle important dans la réflexion de l'énergie solaire reçue par le système « Terre – Atmosphère » : elle réfléchit à elle seule près de 84 % de la totalité de l'énergie solaire réfléchi.

② D'après le **doc. 2**, la température théorique du corps considéré varie considérablement en fonction de l'albédo de sa surface. Cette température théorique serait de -273,15 °C (le zéro absolu) si sa surface était un miroir parfait (100 % de l'énergie solaire reçue serait réfléchi). Elle vaudrait seulement +5,5 °C si sa surface était parfaitement absorbante (100 % de l'énergie solaire reçue serait absorbée). La température du corps considéré varie entre ces deux valeurs extrêmes, pour des albédos intermédiaires.

③ La température moyenne annuelle globale de la surface de la Terre, 15 °C, est très surprenante car elle est supérieure de 9,5 °C à la température maximale théorique si la Terre absorbait la totalité de l'énergie solaire qu'elle reçoit (albédo nul). Or, son albédo vaut 0,3 (**doc. 1**), ce qui devrait correspondre à une température moyenne annuelle globale de la surface de l'ordre de -18 °C (**doc. 2**).

Il doit donc exister sur Terre un phénomène qui élève la température moyenne annuelle globale de la surface de la Terre de 33 °C. L'énergie solaire provenant de la radioactivité interne de la Terre est trop faible ($0,088 \text{ W.m}^{-2}$) par rapport aux autres énergies en présence pour expliquer une telle différence (**doc. 3**). En revanche, on constate une différence importante entre l'énergie émise par la Terre mesurée à sa surface (391 W.m^{-2}) et l'énergie émise par la Terre mesurée au sommet de l'atmosphère (236 W.m^{-2}). Une partie de l'énergie émise par la surface terrestre semble avoir été « retenue » par l'atmosphère (155 W.m^{-2}). L'atmosphère est donc un candidat susceptible d'expliquer la température élevée à la surface terrestre.

④ On remarque que la Terre n'a pas le même aspect, selon les longueurs d'ondes auxquelles on l'observe (**doc 4**) :

- à des longueurs d'onde comprises entre 0,45 et 1 μm (domaine du visible), on distingue très bien les continents (Afrique et une partie de l'Europe), les océans et la couverture nuageuse : l'atmosphère ne semble pas, à cette gamme de longueurs d'onde, absorber le rayonnement.

- à des longueurs d'onde comprises entre 5,7 et 7,1 μm (domaine des infrarouges), on ne distingue plus du tout les continents et les océans. On a l'impression qu'une sorte de voile blanc recouvre la Terre : l'atmosphère semble, à cette gamme de longueurs d'onde, absorber fortement le rayonnement ;

- à des longueurs d'onde comprises entre 10,5 et 12,5 μm (domaine des infrarouges), on distingue relativement bien les continents mais moins les océans (qui semblent être recouverts par un voile gris tout comme certaines parties des continents) : l'atmosphère semble, à cette gamme de longueurs d'onde, absorber une partie du rayonnement.

Le **doc. 5** permet d'identifier les gaz responsables des absorptions constatées au **doc. 4** :

- à des longueurs d'onde comprises entre 5,7 et 7,1 μm , le gaz principalement responsable de l'absorption du rayonnement terrestre est la vapeur d'eau : tout le rayonnement terrestre émis dans cette gamme de longueurs d'onde est absorbé ;

- à des longueurs d'onde comprises entre 10,5 et 12,5 μm , trois gaz semblent responsables de l'absorption du rayonnement terrestre : la vapeur d'eau, le CO_2 , et l'ozone O_3 . Mais seule une partie du rayonnement terrestre émis dans cette gamme de longueurs d'onde est absorbée : c'est pour cette raison que l'on arrive à distinguer davantage les contours des continents par rapport à la gamme précédente de longueurs d'onde.

⑤ La vapeur d'eau est le gaz le plus important dans l'absorption de rayonnement. Sa concentration atmosphérique, bien que variable, est de très loin la plus importante parmi les gaz indiqués. D'autre part, la vapeur d'eau absorbe – totalement ou partiellement

- le rayonnement à de multiples longueurs d'onde entre 5 et 70 μm (longueurs d'ondes entre lesquelles la surface terrestre émet un rayonnement.

Le CO_2 , bien que sa concentration atmosphérique soit modeste, a la propriété d'absorber totalement certaines longueurs d'onde. La plus importante (pic d'absorption autour de 15 μm) se situe dans la gamme des longueurs d'onde dans laquelle la surface terrestre émet le plus d'énergie.

L' O_3 , le CH_4 et le N_2O ont des concentrations bien plus faibles que le CO_2 mais ont des rôles non négligeables dans l'absorption du rayonnement émis par la surface terrestre notamment les pics d'absorption (situés à des longueurs d'onde dans laquelle la surface terrestre émet le plus d'énergie) vers :

- 8 μm pour le N_2O et le CH_4 ;
- 10 μm pour l' O_3 ;
- 15 μm et 18 μm respectivement pour l' O_3 et le N_2O .

Pour conclure, les gaz responsables de l'absorption du rayonnement sont des gaz atmosphériques très minoritaires : leur concentration cumulée varie entre 0,239234 % et 4,239234 %, selon que l'air est sec ou saturé l'humidité.

⑥ Schéma : voir p. 108 le bilan de l'unité 1, sans les flèches oranges dans un premier temps, à construire en saisissant les valeurs numériques dans les documents 1 et 5.

On constate plusieurs déséquilibres énergétiques :

- à l'équilibre thermique, le système « Terre-Atmosphère » doit restituer autant d'énergie qu'il en reçoit. Énergie reçue par le système « Terre-atmosphère » : 342 W.m^{-2} . Énergie perdue par le système « Terre-atmosphère » : 145 W.m^{-2} ($106 \text{ W.m}^{-2} + 39 \text{ W.m}^{-2}$). Gain de 197 W.m^{-2} ;

- à l'équilibre thermique, la surface de la Terre doit restituer autant d'énergie qu'elle en reçoit. Énergie absorbée : $171,088 \text{ W.m}^{-2}$ ($171 \text{ W.m}^{-2} + 0,088 \text{ W.m}^{-2}$). Énergie émise : 391 W.m^{-2} . Déficit de 220 W.m^{-2} environ ;

- à l'équilibre thermique, l'atmosphère doit restituer autant d'énergie qu'elle en reçoit. Énergie absorbée : 417 W.m^{-2} ($65 \text{ W.m}^{-2} + 352 \text{ W.m}^{-2}$). Énergie émise : 0 W.m^{-2} . Gain de 417 W.m^{-2} .

On peut donc supposer, que l'atmosphère restitue une partie de l'énergie qu'elle absorbe (sans quoi elle s'échaufferait) : environ 220 W.m^{-2} restitués à la surface terrestre et 197 W.m^{-2} à l'espace (perte d'énergie pour le système « Terre - Atmosphère »).

⑦ EN CONCLUSION :

L'atmosphère terrestre peut moduler la température terrestre :

- en réfléchissant une partie de l'énergie solaire reçue (albédo) ;
- en absorbant 20 % de l'énergie solaire reçue et les 90 % de l'énergie émise par la Terre. Cette absorption dépend de la présence dans l'atmosphère de certains gaz minoritaires (vapeur d'eau, CO_2 , CH_4 , N_2O et O_3).

Connaissances du programme

La modélisation de la relation effet de serre/climat est complexe.

Conseils et suggestions

– Pour faire comprendre les mécanismes responsables de l'effet de serre, deux modélisations sont proposées.

– La page de gauche propose une approche expérimentale (avec du matériel qui la rend facilement réalisable par les élèves), qui sera ensuite critiquée. Deux expériences vont être réalisées (**doc. 1**) :

- dans un premier temps, on mesure l'évolution de la température de l'air d'un récipient (= expérience témoin) quand celui-ci est éclairé avec une ampoule à filament (émettant un rayonnement visible et IR) ;
- dans un second temps, avec une bombe à CO₂ (disponible dans un magasin d'aquariophilie ou sur Internet), on augmente artificiellement la quantité de CO₂ présente dans un récipient. Puis, on effectue les mesures de la température dans les mêmes conditions (durée, fréquence des mesures, distance entre l'ampoule et le récipient, absence d'agitation autour du récipient, etc.) ;

On aura pris soin, pour chacune de ces deux expériences, de placer également un thermomètre au niveau du récipient mais à l'extérieur de celui-ci pour noter l'évolution de la température de l'air ambiant (si le matériel ne le permet pas, réaliser un troisième jeu de mesures). Par cette approche expérimentale, on constate une élévation plus importante de la température de l'air quand il est enrichi en CO₂. On pourrait conclure hâtivement que l'expérimentation réalisée permet de modéliser correctement l'effet de serre. Il n'en est rien.

– L'expérience historique de Robert W. Woods (**doc. 2**) permet de critiquer la modélisation réalisée. Certes, dans chacune des expériences, on a pris soin de ne pas fermer le récipient avec une plaque de verre (d'où le choix d'un récipient haut), mais comme la masse volumique du CO₂ est 1,5 fois plus importante que celle de l'air, une plus forte diminution de la convection doit se produire dans le récipient enrichi en CO₂.

D'après les conclusions de Robert W. Woods, la différence de température constatée entre les deux expériences doit être principalement liée à la diminution du phénomène convectif et marginalement à l'absorption d'une partie du rayonnement par le CO₂.

– Les approches expérimentales de la modélisation de l'effet de serre réalisables en Lycée sont toutes critiquables (voir pour cela : « Commentaires sur la modélisation de l'effet de serre au lycée » sur le site de l'ENS de Lyon – accès réservé aux inscrits sur le site planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/acces_pro/voir_xml?url=xmldb:exist://ilafegh.ens-lyon.fr/db/planetterre/metadata/profs/LOM-critique-tp-co2atm.xml).

– Pour mettre en évidence le principe de l'effet de serre, il est nécessaire de passer par une modélisation analytique. La page de

droite présente une telle modélisation. Après avoir exposé le principe du modèle simplifié envisagé (**doc. 3**), le **doc. 4** présente pour chacune des deux sphères considérées (avec ou sans atmosphère), leur situation à l'équilibre.

L'écriture des équations d'équilibre pour chaque sphère et leur résolution permet de conclure que, pour ce modèle simplifié, la température de surface de la sphère avec atmosphère se stabilise à une valeur supérieure à celle de la sphère sans atmosphère : le principe de l'effet de serre est ainsi mis en évidence. On peut ensuite signaler que les modèles d'effet de serre utilisés par les professionnels du climat fonctionnent sur le même principe, mais sans les hypothèses simplificatrices choisies ici. Ils ne sont alors plus traitables analytiquement, mais numériquement.

Exploitation des documents par les activités

Mener une démarche expérimentale. Faire preuve d'esprit critique. Analyser une démarche de modélisation historique, construire un modèle analytique simple.

1 Si on réalise l'expérience proposée avec un récipient contenant de l'air, on constate que la température de l'air contenu dans le récipient augmente progressivement, de 0,9 °C en 8 min avec l'installation utilisée. Avec de l'air enrichi en CO₂, la température augmente davantage : +1,5 °C en 8 min. Pendant ce laps de temps, la température de l'air ambiant mesuré en dehors du récipient augmente plus faiblement : +0,5 °C.

On constate donc que l'augmentation de température est plus importante avec l'atmosphère enrichie en CO₂.

On ne peut pas pour autant conclure que cet échauffement, bien réel, soit dû à un effet radiatif (absorption accrue du rayonnement de l'ampoule). La lecture de l'expérience historique de Robert Wood, modèle de rigueur expérimentale, confirme ces doutes. Certes, le récipient n'est pas fermé, mais comme la masse volumique du CO₂ est 1,5 fois plus importante que celle de l'air, la convection doit être plus limitée avec ajout de CO₂ que sans. Ce phénomène pourrait être responsable de la plus grande partie de l'augmentation de température observée dans le récipient enrichi en CO₂.

2 Les différentes hypothèses simplificatrices du modèle analytique sont :

- la taille des sphères : il s'agit de « sphères de petite taille » alors que notre planète a un rayon moyen de 6370 km ;
- l'homogénéité de l'albédo de surface et un albédo de surface de 1 alors que l'albédo de la Terre est hétérogène et sa valeur moyenne est de 0,3 ;
- l'homogénéité de la température de la sphère alors que notre planète a des températures variables selon la latitude, la saison, selon la profondeur (du fait de l'énergie interne de la Terre), etc. ;
- l'homogénéité de la température de l'atmosphère fictive (pour la sphère en possédant une) alors que la température de l'atmosphère terrestre varie en altitude, en latitude, etc. ;

– les caractéristiques de l'atmosphère fictive : 100 % transparente au rayonnement incident et 100 % opaque au rayonnement émis par la sphère : notre planète a une atmosphère assez transparente (environ 80 %) au rayonnement solaire et relativement opaque (environ 90 %) au rayonnement terrestre infrarouge.

Le modèle utilisé n'a donc pas vocation à décrire précisément l'effet de serre terrestre, mais il en contient les ingrédients, sous une forme simplifiée.

③ À l'équilibre thermique dans le modèle avec atmosphère, on a :

– pour la sphère :

$$f S/4 + \sigma T_a^4 S = \sigma T_s^4 S \quad (1)$$

– pour le compartiment atmosphère :

$$\sigma T_s^4 S = \sigma T_a^4 S + \sigma T_a^4 S \quad (2)$$

– pour le système Terre - Atmosphère :

$$f S/4 = \sigma T_a^4 S \quad (3)$$

$$\text{D'où : } f S/4 = \sigma T_a^4 S \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow T_a^4 = f/4 \sigma$$

$$\Leftrightarrow T_a = \sqrt[4]{f/(4\sigma)} = T \text{ (dans le modèle sans atmosphère)}$$

$$\sigma T_s^4 S = \sigma T_a^4 S + \sigma T_a^4 S \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow T_s^4 = T_a^4 + T_a^4$$

$$\Leftrightarrow T_s^4 = 2 T_a^4$$

$$\Leftrightarrow T_s = \sqrt[4]{2} T_a$$

$$\Leftrightarrow T_s = \sqrt[4]{2} T$$

$$\text{soit } T_s \approx 1,2 T$$

Autrement dit, la présence d'une atmosphère transparente au rayonnement solaire et opaque au rayonnement de la sphère est responsable d'une élévation de la température de surface, par rapport à la situation sans atmosphère. C'est le principe de l'« effet de serre », qui serait mieux nommé « effet couverture », l'atmosphère jouant le rôle d'un isolant.

④ EN CONCLUSION :

Voir le schéma bilan p. 111 (partie haute).

UNITÉ 3 La complexité de l'effet de serre naturel

[pp. 102-103 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

L'effet de serre, déterminé notamment par la composition atmosphérique, est un facteur influençant le climat global.

La compréhension, au moins partielle, de cette complexité [...]

Conseils et suggestions

– Cette unité permet de montrer, tout d'abord, que l'effet de serre naturel, phénomène relativement abstrait, peut, dans la vie quotidienne de tout un chacun, avoir des conséquences concrètes (**doc. 1**). Ainsi, une nuit sans nuage est le gage d'un refroidissement nocturne important. Au contraire, la présence d'une couverture nuageuse modère la baisse de la température.

– Par l'analyse des différents documents de la page de gauche, on constate que les nuages ont en fait un double effet sur le bilan radiatif local : le jour, ils modifient l'albédo et tendent à faire diminuer la température ; de jour comme de nuit, ils produisent un effet de serre qui tend à augmenter la température. L'effet exact de chaque type de nuages (**docs. 2 et 3**) sur le bilan radiatif de la Terre est complexe et est à l'heure actuelle un sujet étudié par de nombreuses équipes scientifiques.

– La comparaison de la carte du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre vers le haut mesuré au sol avec celle du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre vers le haut mesuré au sommet de l'atmosphère (**doc. 4**) permet de quantifier l'effet de serre et fait ressortir les disparités régionales de l'effet de serre naturel : l'effet de serre est très inégal selon la localisation géographique et ce même pour une latitude donnée. L'étude des autres documents de la page de droite permet de comprendre les grands traits de cette variation géographique. La vapeur d'eau est

de loin le gaz atmosphérique responsable pour la plus grande part de l'effet de serre naturel : à l'échelle globale, elle est responsable de près de 60 % de celui-ci (**doc. 7**). Or, les nuages (formés principalement d'eau liquide et/ou de cristaux de glace mais aussi de vapeur d'eau) présentent une forte variabilité régionale (**doc. 5**) tout comme la vapeur d'eau (**doc. 6** - voir également le **doc. 5 page 99**). L'effet de serre sera donc d'autant plus intense que la couverture nuageuse est forte et que l'atmosphère est riche en vapeur d'eau. Ainsi, cette double page permet d'aborder une partie de la complexité de l'effet de serre naturel. On peut alors comprendre que les modèles climatiques sont d'une grande complexité, nécessaire à leur valeur prédictive.

Exploitation des documents par les activités

Acquérir des données à l'aide d'un système ExAO. Mettre en relation des informations et les interpréter.

① L'analyse du **doc. 1** permet de mettre en évidence que la couverture nuageuse a un double effet sur l'évolution des températures locales :

– en journée, la présence d'une couverture nuageuse abaisse la température. On remarque ce phénomène, en comparant les deux tracés (bleu et rose) du **doc. 1** entre 14 h et 17 h (les mesures ayant été effectuées en automne, le soleil s'est couché à 17 h à Strasbourg) et le lendemain entre 7 h et 10 h 30 (le soleil à cette période de l'année se lève à 7 h en Alsace) : quand le ciel est dégagé, la température est plus élevée de 1 à 5 °C que lorsque le ciel est couvert.

(...)

(Remarque. – On remarque très bien ce phénomène au niveau du tracé bleu du graphique : entre 7 h et 12 h, en présence d'une couverture nuageuse, la température s'élève très faiblement par rapport au tracé rouge. Puis, quand le ciel se dégage (à partir de 12 h 30) le 01-11-2011, la température mesurée augmente fortement (+3 °C en 1 h 30)).

– la nuit, la couverture nuageuse semble au contraire limiter le refroidissement. On remarque cela en comparant les deux tracés (**doc. 1**) pendant la nuit (de 17 h à 7 h) : on constate que la température baisse moins au cours d'une nuit avec un ciel couvert qu'au cours d'une nuit avec un ciel dégagé.

Les nuages ont des caractéristiques variables (**doc. 2**) :

- certains sont élevés, d'autres bas ;
- ils sont plus ou moins étendus et épais ;
- ils diffusent la lumière de façon plus ou moins importante.

Selon leur nature, les nuages ont des effets radiatifs différents (**doc. 3**). Les nuages ayant un albédo élevé (cumulus et stratus), abaissent, en journée, la température locale car l'énergie solaire reçue au sol est moins importante (cet effet a été mis en évidence dans le premier point de l'analyse du **doc. 1**). Certains nuages (cirrus) limitent mieux les pertes radiatives vers l'espace que d'autres (cumulus et stratus). Les nuages ont tendance, de jour comme de nuit, à augmenter la température locale (cet effet a été mis en évidence dans le second point de l'analyse du **doc. 1**, il est surtout sensible la nuit, en l'absence de rayonnement solaire). En fonction de leur nature, les nuages n'ont donc pas le même effet sur le bilan radiatif :

- les cirrus ont un bilan positif (faible albédo et forte limitation des pertes radiatives par la Terre) ;
- les cumulus et les stratus ont un bilan négatif (fort albédo et moindre limitation des pertes radiatives).

(On peut signaler que la limitation des pertes radiatives par les nuages n'est pas qu'une affaire d'absorption du rayonnement IR terrestre. La température des nuages est essentielle : les nuages élevés, donc froids, comme les cirrus, rayonnent en effet moins que les nuages bas, de température plus importante, comme le montre la loi de Stefan-Boltzman).

2 Les valeurs ont été estimées à l'aide de l'outil « pipette » d'un logiciel de traitement d'image :

Site choisi	Rayonnement IR mesuré au sommet de l'atmosphère (W.m ⁻²)	Rayonnement IR mesuré à la surface terrestre (W.m ⁻²)	Rapport (en %)
Groenland	≈ 125	≈ 150	≈ 83
France (à proximité de Paris)	≈ 210	≈ 340	≈ 61
Sahara	≈ 250	≈ 400	≈ 63
Amérique du Sud Amazonie	≈ 200	≈ 450	≈ 44

3 Pour deux des sites choisis à la question 2, on constate :

– qu'au niveau du Sahara, la couverture nuageuse est plutôt « faible » (**doc. 5**) ainsi que la quantité en eau condensable de l'atmosphère terrestre (**doc. 6**). Le rapport calculé dans la question précédente est de l'ordre de 63 % (relativement élevé) : cela signifie que la majeure partie du rayonnement IR émis par la surface n'est pas arrêtée par les gaz atmosphériques : l'effet de serre est relativement peu important ;

– qu'au niveau de l'Amazonie, la couverture nuageuse est plutôt « forte » (**doc. 5**). Il en est de même pour la quantité en eau condensable de l'atmosphère terrestre (**doc. 6**). Le rapport calculé dans la question précédente est de l'ordre de 44 % (plutôt « moyen ») : cela signifie qu'une partie relativement importante du rayonnement IR émis par la surface est retenue par les gaz atmosphériques : l'effet de serre est plus conséquent.

On peut donc supposer que la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère (la présence de nuages étant un phénomène qui rend visible la présence de cette vapeur d'eau – même si les nuages sont principalement formés de gouttelettes d'eau) module régionalement (et localement) l'effet de serre (la vapeur d'eau étant un gaz à effet de serre – voir **doc. 5 page 99**).

(Remarque. – Au Groenland (et en Antarctique), la couverture nuageuse est « moyenne » (**doc. 5**) et la quantité en eau condensable de l'atmosphère terrestre est très faible (**doc. 6**). Le rapport calculé dans la question précédente est de l'ordre de 85 % : cela signifie que le rayonnement IR émis par la surface est à peine moindre que celui mesuré au sommet de l'atmosphère : le Groenland étant froid, il n'émet qu'une faible quantité d'IR, mais du fait du transfert d'énergie lié à la circulation atmosphérique (voir **doc. 6 p. 81**), une partie de l'énergie solaire reçue dans la zone intertropicale est transférée vers les latitudes élevées, ce qui explique que le rayonnement IR mesuré au sommet de l'atmosphère soit si important).

4 D'après les données du **doc. 7**, on remarque que la vapeur d'eau est de loin le gaz atmosphérique qui a le rôle le plus important dans l'effet de serre naturel : 60 % de l'effet de serre naturel, à l'échelle globale, est dû à la vapeur d'eau.

L'absorption, selon la nature du nuage, d'une partie plus ou moins importante du flux IR terrestre (**doc. 3**), doit donc être en lien avec la quantité de vapeur d'eau contenue dans le type de nuage considéré. D'autre part, cette donnée (**doc. 7**) permet d'expliquer pourquoi la nuit, en présence d'une couverture nuageuse (**doc. 1**), la température diminue beaucoup plus faiblement que par ciel dégagé : la vapeur d'eau contenue dans les nuages absorbe une partie des IR émis par la Terre. Elle réémet elle-même dans l'infrarouge, mais dans toutes les directions, y compris vers la surface terrestre. Cet effet de serre local limite le refroidissement nocturne.

Acquérir des données à l'aide d'un système ExAO. Mettre en relation des informations et les interpréter.

5 EN CONCLUSION :

Localement, la couverture nuageuse va moduler le bilan radiatif :

- le jour, les nuages réfléchissent le rayonnement solaire, ce qui tend à diminuer la température ;

- de jour comme de nuit (mais on se rend compte de ce phénomène exclusivement la nuit), les nuages produisent un effet de serre (lié à la présence de vapeur d'eau, gaz à effet de serre). Ce dernier provoque une baisse moins importante de la température nocturne (par rapport à une nuit sans couverture nuageuse).

À une échelle plus globale, l'effet de serre moyen est très inégal selon la localisation géographique et ce même pour une latitude donnée. Il est d'autant plus intense que la couverture nuageuse est forte et que l'atmosphère est riche en vapeur d'eau (à l'échelle globale, la vapeur d'eau est responsable de près de 60 % de l'effet de serre naturel).

UNITÉ 4

Quelques acteurs du système climatique terrestre

[pp. 104-105 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

La compréhension, au moins partielle, de cette complexité [...] L'ensemble des mécanismes agissant sur le climat n'est pas au programme, mais on indiquera que l'effet de serre n'est qu'un facteur parmi d'autres. En particulier l'influence des paramètres astronomiques pourra être évoquée, mais ce point n'est pas exigible au baccalauréat.

Conseils et suggestions

- Dans cette unité, les principaux acteurs – autres que l'effet de serre – du système climatique sont présentés. Il est indispensable de permettre aux élèves de prendre conscience de ces nombreux acteurs (dont certains sont encore méconnus voire peut-être inconnus) du climat terrestre, bien qu'aucun ne soit exigible au baccalauréat. Les modèles climatiques numériques (abordés dans l'unité 5) doivent intégrer, pour être les plus fiables possibles (dans la limite bien évidemment de nos connaissances et des capacités informatiques actuelles), le plus de composantes possibles (**exercice 7 page 115**).
- En fonction du temps disponible et/ou de l'intérêt des élèves, il sera possible de traiter soit l'ensemble des acteurs présentés dans cette double page, soit une partie d'entre eux.
- Le climat de notre planète dépend en premier lieu de l'énergie reçue du Soleil. Longtemps, on a cru que le flux solaire (**doc. 1**) ne variait pas dans le temps (d'où le terme de « constante solaire » utilisé parfois). Depuis 1979, différents satellites ont été chargés de mesurer ce flux hors atmosphère. Avant cette date, les scientifiques ont pu reconstituer approximativement le flux solaire grâce à des observations indirectes qui avaient été notées par des observatoires : nombre de taches solaires (le flux solaire est lié à l'activité du soleil et est proportionnel au nombre de taches solaires) et les aurores polaires. Alors qu'en 2008, l'activité solaire a été faible (aucune tache solaire), le prochain paroxysme est attendu pour 2013 (situation sans doute similaire à 2001).
- Pour obtenir des images actualisées du soleil, on peut se connecter au site SOHO de la Nasa : sohowww.nascom.nasa.gov/data/data.html.
- L'excentricité, l'obliquité et la position des équinoxes sur l'orbite sont des paramètres astronomiques (**doc. 2**) qui par leur variation cyclique (= cycles de Milankovitch) ont fait varier cycliquement le climat terrestre depuis plusieurs centaines de milliers d'années (lien entre le signal combiné dans le **doc. 2** et l'évolution du δD dans le **doc. 7 page 85**). Ils influencent soit la quantité d'énergie

solaire reçue annuellement, soit la répartition latitudinale de cette énergie solaire reçue. La quantité d'énergie solaire reçue (ou sa répartition) affecte la température globale moyenne de la Terre. Les deux graphiques de droite (**doc. 2**) ont été obtenus grâce au logiciel de simulation Simclimat (téléchargeable à l'adresse suivante : www.lmd.jussieu.fr/~crlmd/simclimat/) qui permet plus généralement de simuler les modifications des principaux paramètres du système climatique.

- Les éruptions volcaniques (**doc. 3**) majeures impactent le climat terrestre de différentes façons :

- le rejet de SO_2 a un effet radiatif négatif car en réagissant chimiquement avec la vapeur d'eau, ce gaz forme des aérosols qui opacifient l'atmosphère (voir graphique du **doc. 3**) ;
- le rejet de cendres volcaniques, bien qu'impressionnant (voir photographie du **doc. 3**), a un effet temporaire relativement négligeable (les cendres ont des effets antagonistes : elles obscurcissent le ciel, donc l'énergie solaire reçue au sol diminue, mais du fait de leur couleur sombre, elles absorbent une partie du rayonnement solaire ce qui réchauffe localement l'atmosphère) ;
- le CO_2 (gaz à effet de serre) rejeté va provoquer un effet radiatif positif.

Globalement, les éruptions volcaniques ont un effet radiatif négatif (voir données du tableau et **exercice 6 p. 113**).

- Le **doc. 4** permet d'évoquer une autre source de CO_2 : les activités humaines, dont les émissions de CO_2 ont augmenté quasi-linéairement de 1960 à 2010 (on note cependant une stagnation dans les années 1990, en lien avec l'effondrement du bloc soviétique). Le taux de CO_2 atmosphérique augmente, quant à lui, irrégulièrement et de façon moins importante que ce qu'il devrait d'après les rejets anthropiques de CO_2 . L'existence de puits de carbone peut alors être proposée. La quantité de CO_2 piégée par deux puits de carbone est mise en évidence sur le document. Les continents piègent irrégulièrement (= explication de l'augmentation « en dent de scie » de la quantité de CO_2 atmosphérique) de plus en plus de CO_2 . Les océans font de même mais de façon plus linéaire. L'activité photosynthétique (voir **Thème 1 Chapitre 1** du livre de TS spécialité SVT) est sans doute responsable de cette absorption de CO_2 atmosphérique, puis du piégeage sous forme de matière organique de ce CO_2 (voir également l'**exercice 5** page 113 pour mettre en évidence un autre phénomène responsable de la majeure partie du piégeage océanique de CO_2).

Exploitation des documents par les activités

① On constate que le flux solaire reçu par la Terre a varié entre 1700 et 2011 de façon cyclique entre $1\,363,5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ et $1\,367,5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. On peut mettre en évidence sur le graphique proposé trois types de cycles :

- des cycles de période proche de 10 ans (= cycle de Schwabe) dont les trois derniers cycles (représentés en rose sur la graphique) ont en apparence une amplitude plus importante que les précédents, mais il s'agit depuis 1979 de mesures instrumentales et non d'estimations indirectes ;

- des cycles d'environ 100 ans (= cycle de Gleissberg) dont trois cycles sont visibles : 1700-1810 ; 1810-1910 ; 1910-2010 ;

- un cycle (incomplet) de plus grande période.

② D'après les informations données par le **doc. 2**, on peut supposer que :

- comme la variation de l'excentricité de l'orbite terrestre influence la quantité totale du rayonnement solaire reçu sur Terre (en faisant varier la distance Terre – Soleil), la température globale sera plus importante quand l'excentricité sera faible et plus faible quand l'excentricité sera importante (voir les résultats donnés par le logiciel de simulation) ;

- comme la variation de l'obliquité (inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de l'orbite terrestre autour du Soleil) influence la répartition latitudinale de l'énergie solaire (sans modifier la quantité totale d'énergie reçue) : lorsque l'axe de rotation terrestre devient moins incliné (la valeur de l'obliquité diminue), l'énergie solaire est concentrée davantage autour de l'équateur : l'amplitude de températures entre l'équateur et les pôles est plus importante et la température moyenne globale sera plus faible (voir le résultat donné par le logiciel de simulation) ; lorsque l'axe de rotation terrestre devient plus incliné (la valeur de l'obliquité augmente), l'énergie solaire est mieux distribuée dans les hautes latitudes : la température moyenne globale est donc plus importante (voir le résultat donné par le logiciel de simulation) ;

- comme la variation de la position des équinoxes sur l'orbite a un effet similaire à celui de l'obliquité, les conséquences sur la température globale moyenne de la Terre devraient être identiques.

③ Les éruptions volcaniques peuvent agir sur le bilan radiatif de la Terre de différentes façons :

- le SO_2 émis interagit chimiquement avec la vapeur d'eau pour former des aérosols. Ces derniers provoquent alors une diminution de l'éner-

gie solaire absorbée par la surface de la Terre car l'opacité de l'atmosphère augmente (voir le graphique). L'effet radiatif est donc négatif.

- les cendres, mêmes abondantes, auront un effet limité sur le bilan radiatif de la Terre car elles retombent rapidement. Les cendres ont des effets antagonistes : en obscurcissant le ciel, elles font diminuer l'énergie solaire reçue au sol, mais, du fait de leur couleur sombre, elles absorbent une partie du rayonnement solaire, ce qui réchauffe localement l'atmosphère ;

- le CO_2 est rejeté, en quantité plus ou moins importante, au cours de l'éruption. La concentration atmosphérique en CO_2 peut alors être modifiée. Comme le CO_2 est un gaz à effet de serre, l'effet radiatif est positif car l'effet de serre est accentué.

Pour conclure, les éruptions volcaniques émettent différentes substances dans l'atmosphère qui ont une action contraire sur le bilan radiatif mais dont l'effet cumulé est plus ou moins négatif (d'après les données du tableau).

④ On remarque que de 1960 à 2010, les émissions anthropiques de CO_2 ont augmenté régulièrement, intensifiant l'effet de serre. Or, pendant ce même laps de temps, le taux de CO_2 atmosphérique s'est accru mais de façon irrégulière et surtout plus faiblement que ce qu'il aurait dû en considérant les émissions anthropiques. Donc une partie du CO_2 émis dans l'atmosphère par l'Homme n'y réside pas. Deux puits de carbone peuvent être identifiés grâce au **doc. 4** : l'océan et les continents. L'activité photosynthétique des océans et des continents prélève puis stocke sous forme de matière organique, une partie des émissions anthropiques de CO_2 . Ces puits de carbone modèrent donc l'augmentation de l'effet de serre (= réchauffement climatique) lié aux émissions anthropiques de CO_2 .

(Remarque. – Les continents se sont parfois comportés (1959, 1984) comme des sources de carbone, sans doute du fait de la déforestation).

⑤ EN CONCLUSION :

La relation « effet de serre – climat » est complexe car de nombreux acteurs agissent sur le système climatique et notamment sur la concentration en CO_2 atmosphérique.

Un certain nombre de ces acteurs ont des comportements plus ou moins bien identifiés et prévisibles (paramètres orbitaux, etc.). À l'opposé, d'autres acteurs ne sont encore connus que trop superficiellement (ou inconnus ?) et/ou ont des comportements imprévisibles (éruptions volcaniques, etc.) à plus ou moins long terme (comportement des puits de carbone en cas de réchauffement climatique).

UNITÉ

5

Activités humaines et évolution possible du climat

[pp. 106-107 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

La compréhension, au moins partielle, de cette complexité, permet d'envisager une gestion raisonnée de l'influence de l'Homme.

[La modélisation de la relation effet de serre/climat est complexe] permet de proposer des hypothèses d'évolutions possibles du climat de la planète notamment en fonction des émissions de gaz à effet de serre induites par l'activité humaine.

Conseils et suggestions

- Après avoir identifié dans l'unité 4 quelques acteurs du système climatique terrestre, on s'intéresse dans cette unité à l'influence de l'Homme sur l'effet de serre.

- Les activités humaines libèrent dans l'atmosphère, depuis la révolution industrielle, une diversité de gaz à effet de serre en quantité variable. Ces rejets ont provoqué l'augmentation de la concentra-

tion atmosphérique de ces différents gaz minoritaires (données sous-jacentes dans quatre documents de deux unités précédentes : **docs 4, 5 et 6 page 87** et **doc. 4 page 105**). Ainsi, depuis 1750 (*date pré-révolution industrielle souvent prise comme référence. En 1765, les améliorations de James Watt sur la machine à vapeur marquèrent le début de la révolution industrielle*), la concentration atmosphérique des principaux GES a augmenté de façon exponentielle (**doc. 2**) par rapport à leurs niveaux (et variations) naturels (voir **doc. 4 page 87**).

– Les rejets anthropiques de GES modifient le bilan radiatif de la Terre. Les différents GES ne se valent pas (**doc. 1**) car leur concentration atmosphérique n'a pas augmenté de la même façon, ils n'ont pas le même effet radiatif (un GES qui absorbe fortement et sur une gamme de longueur d'onde large aura un impact important sur le forçage radiatif) et ils ne résident pas aussi longtemps dans l'atmosphère (par exemple pour les gaz fluorés qui sont synthétisés exclusivement par l'industrie chimique, il n'existe aucun processus naturel ou « puits » pour éliminer ces gaz de l'atmosphère : leur temps de résidence dans l'atmosphère est donc considérable).

Le rejet d'une certaine quantité de gaz fluoré n'a pas le même impact que le rejet de la même quantité de CO₂. Ainsi, pour permettre de comparer l'effet radiatif des différents GES, un indice a été créé : le PRG. Par définition, le PRG du CO₂ est de 1 quelle que soit l'échéance envisagée. Pour les autres GES, le PRG est différent selon que l'on se place dans un futur proche (horizon 20 ans) ou plus lointain (horizon 100 ans) : le temps de résidence dans l'atmosphère du gaz considéré prend alors tout son sens.

– Les données du **doc. 3** permettent, en prenant en compte les PRG à l'horizon 100 ans (les deux formules indiquées dans le **doc. 1** ont été données à titre informatif. Cependant, la deuxième formule a permis de calculer les valeurs du camembert de droite du **doc. 3**. On pourrait demander aux élèves de faire le travail pour l'horizon 20 ans), de bien se rendre compte que l'émission d'une même quantité de différents GES n'a pas la même conséquence au niveau du forçage radiatif (émettre une certaine quantité de méthane ou de protoxyde d'azote aura un impact supérieur sur l'effet de serre à l'horizon 100 ans que d'émettre la même quantité de CO₂).

– Les scientifiques élaborent, en prenant en compte la tendance actuelle des émissions anthropiques, différents scénarios d'évolution possibles des rejets de GES. Le **doc. 4** présente 3 scénarios (dont les principales caractéristiques sont indiquées en légende) parmi une quarantaine de scénarios élaborés et étudiés :

- le scénario 1 (scénario A2 du GIEC) correspond à un scénario pour lequel les émissions de GES sont intensives ;
- les scénarios 2 (scénario B2 du GIEC) et 3 (scénario B1 du GIEC) correspondent à des scénarios conduisant à des émissions de GES plus modérées.

Pour plus d'informations, on pourra se connecter au site Internet du GIEC : www.ipcc.ch.

Ces scénarios d'émission sont utilisés dans les modèles climatiques numériques (le film d'animation « Modélisation du climat » réalisé par l'Institut Pierre-Simon Laplace pourra être montré aux élèves pour leur faire comprendre le fonctionnement de tels modèles : www-centre-saclay.cea.fr/fr/Modelisation-du-climat-film-d-

animation-realise-par-l-Institut-Pierre-Simon-Laplace) pour réaliser des projections climatiques. Les résultats de ces modélisation prévoient toutes une augmentation de la température moyenne globale de plusieurs degrés Celsius d'ici la fin du XXI^e siècle mais la valeur de cette augmentation (ainsi que des disparités régionales) dépend fortement du scénario d'émission de GES considéré (**doc. 5**).

– Le réchauffement climatique aura des effets sur la biodiversité et sur les conditions de vie des sociétés humaines (**doc. 6**) d'autant plus marqués qu'il sera rapide et intense. Il convient cependant de rester prudent sur les résultats de ces modélisations numériques : elles donnent des tendances globales et non des certitudes, notamment concernant les échelles locales. D'autre part, le système climatique ne va pas répondre aux perturbations forcément de manière linéaire (**doc. 7**) : les modélisations climatiques ne peuvent, actuellement, prendre en compte tous les paramètres du système climatique (ils sont limités par l'état actuel de nos connaissances et par les capacités informatiques des supercalculateurs) : certains paramètres du système climatique, comme les rétroactions positives (ou négatives), peuvent être surestimés (ou sous estimés).

Exploitation des documents par les activités

① Les activités humaines rejettent chaque année dans l'atmosphère une diversité de gaz à effet de serre en quantité variable. Ainsi, entre 1750 et 2011 (**doc. 2**), la concentration atmosphérique a augmenté d'environ :

- 139 % pour le dioxyde de carbone ;
- 136 % pour l'ozone troposphérique ;
- 256 % pour le méthane ;
- 122 % pour le protoxyde d'azote ;

Les gaz fluorés, inexistantes en 1750, ont été fortement rejetés dans la seconde partie du XX^e siècle et ont atteint en 2011 une concentration de l'ordre de 0,001 ppm.

Ces différents gaz n'ont pas les mêmes caractéristiques (**doc. 1**) tant au niveau de leur temps de résidence dans l'atmosphère (de quelques jours pour l'ozone troposphérique à plusieurs milliers d'années pour certains gaz fluorés) que de leur efficacité radiative (relativement faible pour le CO₂ ; beaucoup plus importante pour les gaz fluorés).

Pour permettre de comparer l'effet de serre généré par les différents GES, un indice a été conçu : le PRG.

La comparaison qui peut être réalisée à partir des données du **doc. 3**, est particulièrement informative. On constate par exemple que :

- le CO₂, qui représente près des 3/4 des GES émis par les activités humaines (en Gt.an⁻¹), ne représente plus que 56 % des émissions de GES (en Gt équivalent CO₂) si l'on prend en compte le PRG ;
- le protoxyde d'azote représente en quantité (en Gt.an⁻¹) une très faible part des GES émis (environ 0,03 %) mais si l'on tient compte du PRG, il représente environ 8 % des émissions de GES (en Gt équivalent CO₂).

(...)

L'émission d'une même quantité de différents GES n'a donc pas la même conséquence au niveau du forçage radiatif : une certaine quantité de CO_2 modifie moins le bilan radiatif que la même quantité de CH_4 , de N_2O ou surtout de gaz fluoré (PRG 25 fois à 22 800 fois supérieur – selon le gaz considéré – à celui du CO_2 à l'horizon 100 ans).

Ainsi, les activités humaines en rejetant des GES modifient progressivement et, pour certains GES, durablement, le bilan radiatif de la Terre.

② Pour réaliser des projections climatiques, les scientifiques ont élaboré différents scénarios d'évolution de la population mondiale, d'évolution de l'activité économique, etc. Ces scénarios se traduisent par des évolutions des émissions de GES différentes.

Ainsi, le scénario 1 (**doc. 4**) prévoit, du fait d'une forte croissance démographique et en supposant peu d'efforts de réduction des émissions anthropiques de GES, des émissions de CO_2 voisines de 110 Gt.an⁻¹ en 2100 (soit un quadruplement des émissions par rapport à 2011).

Le scénario 3 prévoit, du fait d'une décroissance de la population à partir de 2050 et d'une réduction des émissions anthropiques de GES dans le cadre d'une politique mondiale de développement durable, une plus faible augmentation des émissions jusqu'en 2050 (émissions de GES d'environ 44 Gt.an⁻¹ en 2050) puis une diminution progressive pour revenir à un taux d'émission de GES proche de celui de l'année 2000.

On constate que selon le scénario sélectionné, les températures simulées (**doc. 5**) à l'horizon 2030 ne diffèrent pas énormément (quelques différences sont cependant visibles à l'échelle régionale). Autrement dit, les décisions prises aujourd'hui concernant la réduction des émissions de GES n'auront pas de conséquences importantes à l'horizon 2030.

En revanche, à l'horizon 2100, des différences notables peuvent être mises en évidence : une augmentation des températures beaucoup plus forte avec le scénario 1 (+1 à +7 °C selon les régions) qu'avec le scénario 3 (+0,5 à +3,5 °C). Pour les deux scénarios, les changements climatiques les plus importants devraient affecter les zones polaires (l'Arctique plus que de l'Antarctique) et les continents (+2 à 3 °C pour le scénario 3 et +3,5 à 5 °C pour le scénario 1).

Dans les deux cas, les modifications climatiques constatées sont à mettre en lien avec les émissions de CO_2 : augmentation forte et constante dans le cas du scénario 1 ; augmentation plus faible jusqu'à 2050 puis diminution dans le cas du scénario 3.

③ Les conséquences vraisemblables des émissions de GES d'origine anthropique seront multiples et toucheront à la fois à la biodiversité et les conditions de vie de l'Homme.

Ainsi, une augmentation de température moyenne globale modérée fragilisera avant tout les écosystèmes coralliens (augmentation du niveau marin et acidification des océans) et polaires (réchauffement plus important dans les zones polaires – voir réponse à la question 2) : la biodiversité de ces écosystèmes devrait donc diminuer. Dans le cas d'un réchauffement plus important, tous les écosystèmes devraient voir leur biodiversité touchée et on devrait

assister à des migrations d'espèces (générant des compétitions avec les espèces jusqu'alors autochtones).

Le réchauffement climatique aura des répercussions importantes sur les conditions de vie de l'humanité. Ainsi, plus des deux tiers de la population mondiale vit, à l'heure actuelle, à proximité des côtes. L'augmentation du niveau marin aura des conséquences dans de nombreux pays (érosion marine, inondations plus fréquentes, déplacement de population, etc.).

Dans les régions de hautes montagnes (Andes et Himalaya principalement), la fonte des glaciers d'altitude aura des conséquences sur l'approvisionnement en eau (surtout pendant la saison sèche) dans le bassin hydrographique correspondant ou provoquera des inondations catastrophiques (notamment en cas de purge des lacs glaciaires).

L'agriculture sera vraisemblablement touchée par le changement climatique : on devrait observer dans un premier temps (réchauffement modéré), une diminution de la production agricole dans les régions intertropicales, puis, si le réchauffement se poursuit, une baisse de la production agricole dans la zone tempérée. Cela posera sans doute des problèmes d'accès à la nourriture voire de famines dans les pays les plus pauvres. Dans les pays « riches » où la population a tendance à vieillir, la mortalité liée à certains événements climatiques extrêmes (canicules, etc.) devrait augmenter si des solutions ne sont pas mises en place.

Enfin, certaines conséquences non évoquées pourraient avoir lieu en cas de déstabilisation du système climatique (risque de rétroactions positives).

④ EN CONCLUSION :

Pour éviter les conséquences négatives (pour les populations humaines) liées au changement climatique provoqué par les émissions anthropiques de GES, il serait judicieux de mettre en œuvre, le plus rapidement possible, une gestion raisonnée : il faudrait avant tout limiter les émissions anthropiques de GES (dans le cadre d'une politique volontariste de développement durable avec parallèlement à cela une stabilisation voire une baisse de la population mondiale – scénarios 2 ou 3 du **doc. 4**).

Plusieurs difficultés et questions se posent :

- Les émissions de GES doivent être maîtrisées : comment réduire les émissions de GES anthropiques ? Quels secteurs d'activité doivent faire les efforts les plus conséquents ? Doit-on passer par une réglementation nationale voire mondiale ? Doit-on laisser chaque citoyen faire ce que bon lui semble ?
- Les pays développés sont réticents à remettre en cause leur mode de vie pour limiter les émissions de GES : comment réduire nos émissions de GES sans pour autant diminuer notre confort ? Est-ce possible ? Comment s'engager dans une transition énergétique ?
- Le désir des pays émergents et pauvres d'accéder aux mêmes conditions de vie que celles des pays développés est légitime : comment faire pour que ces pays accèdent à des conditions de vie meilleures (santé, éducation, etc.) sans émettre autant de GES par habitant que les pays riches avant leur transition énergétique ?

Variations atmosphériques et climatiques à l'échelle des temps géologiques

Le programme propose de n'étudier qu'un exemple d'extremum climatique. La cohabitation dans ce chapitre de deux exemples, celui d'un extremum climatique chaud avec le Crétacé supérieur et d'un extremum climatique froid avec le Permo-Carbonifère, offre la possibilité de choisir. L'exemple choisi pourra servir de modèle d'étude du climat global et de modèle de compréhension de ses facteurs de contrôle. La démarche d'étude sera la même quelque soit l'exemple utilisé. L'extremum climatique non choisi pourra servir d'exercice d'application. Une autre possibilité est de proposer un travail par atelier, une partie du groupe classe s'intéressant à chacun des deux exemples.

UNITÉ 1

L'enregistrement des paléoclimats au niveau local

[pp. 118-119 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

Sur les grandes durées (par exemple le milliard d'années) les traces de variations climatiques sont enregistrées dans les roches sédimentaires.

Conseils et suggestions

La première unité est une présentation des indicateurs climatiques à l'échelle locale. Il est donc important de maintenir les conclusions de cette première unité à cette échelle locale et de faire comprendre que l'on ne peut pas, avec l'étude du climat local au niveau d'un seul site, généraliser les conclusions pour l'échelle globale. Tout changement d'échelle hâtif serait malheureux puisqu'il appuierait l'idée fausse qu'à partir de son expérience locale du climat actuel on puisse avoir un avis sur le changement climatique global de notre époque.

Exploitation des documents par les activités

Saisir des informations et les interpréter.

① La craie est une roche sédimentaire formée par l'accumulation de squelettes de coccolithophoridés, des microfossiles marins (**doc. 1**). La craie formée au Crétacé supérieur est abondante en France dans l'ensemble du bassin parisien (**doc. 2**). On retrouve dans la craie un assemblage fossile à *Pararotalia tuberculata*,

Sirtina orbitoidiformis et *Goupillaudina daguini*, en plus des coccolithophoridés (**doc. 3**). Or, ces espèces sont caractéristiques d'un milieu tropical à transitionnel (**doc. 4**), ce qui permet de proposer un environnement marin chaud au niveau du bassin parisien (environ 35° de latitude nord), au Crétacé supérieur.

② Au sud de l'Australie (**doc. 6**), les tillites datant du Permo-Carbonifère résultent d'une érosion glaciaire et sont donc des signatures d'un climat local polaire ou tempéré froid. En France (**doc. 5**), les gisements de charbon et les fossiles de fougères arborescentes sont la preuve de l'existence d'une forêt luxuriante typique d'un environnement continental soumis à un climat local tropical.

③ EN CONCLUSION :

Les roches sédimentaires se forment selon des modalités qui peuvent dépendre du climat local qui règne lors de leur mise en place. Par exemple, les tillites se forment sous un climat polaire ou tempéré froid, par érosion glaciaire. Le contenu fossilifère des roches sédimentaires peut également être un indicateur du climat local qui régnait à l'époque du dépôt. Certaines espèces, animales ou végétales, marines ou terrestres, sont effectivement spécifiques de certaines conditions climatiques.

Les roches sédimentaires, par leurs processus de formation ou par leur contenu fossilifère, sont donc des indicateurs des paléoclimats à l'échelle locale.

UNITÉ 2

De la reconstitution des aires climatiques au climat global

[pp. 120-121 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

Sur les grandes durées (par exemple le milliard d'années) les traces de variations climatiques sont enregistrées dans les roches sédimentaires. Des conditions très éloignées de celles de l'époque actuelle ont existé.

Conseils et suggestions

– L'unité 2 correspond à un changement d'échelle par rapport à l'unité 1. La répartition à l'échelle planétaire des différents indices

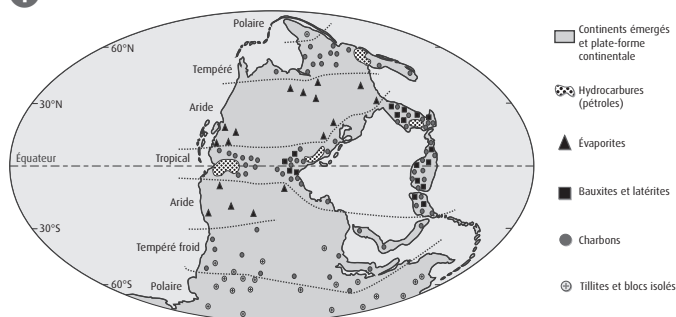
climatiques locaux permet de reconstituer des aires climatiques. L'étendue relative de ces aires permettra alors de définir le climat global régnant à une époque donnée.

– Il serait donc intéressant pour traiter un exemple de climat ancien, de rapprocher les documents de l'unité 1 et ceux de l'unité 2. La nécessité du changement d'échelle pour caractériser le climat global d'une époque sera mieux comprise. L'exemple extremum chaud ou extremum froid non choisi pourra servir d'exercice d'application.

Exploitation des documents par les activités

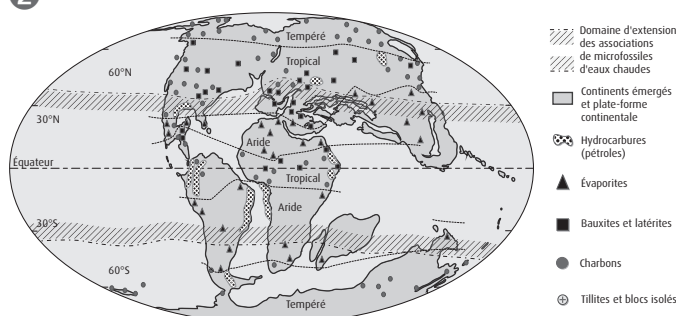
S'informer et raisonner. Communiquer sous forme de schéma.

1



Les grandes aires climatiques au Permo-Carbonifère

2



Les grandes aires climatiques au Crétacé supérieur

3 Au Permo-Carbonifère, les tillites ont une très large extension entre 45° S et le pôle Sud (**doc. 1**). Ces tillites résultent de l'action érosive d'un domaine glaciaire (**doc. 3**), elles rendent donc compte ici de la présence d'une très vaste calotte glaciaire dans l'hémisphère Sud. De plus, les signatures climatiques d'un climat chaud sont d'extension réduite, à proximité de l'équateur. Le climat global au Permo-Carbonifère correspond donc à un extremum climatique : la période froide avec glaciation (**doc. 3**).

Au Crétacé supérieur (**doc. 2**), la prédominance d'aires climatiques arides et tropicales jusqu'à des latitudes élevées, ainsi que l'absence d'aire climatique froide ou polaire, permet de conclure que nous sommes en présence d'une période climatique globale chaude, caractérisée par l'absence de calotte glaciaire polaire.

4 EN CONCLUSION :

L'extension latitudinale de chaque aire climatique varie en fonction de la période étudiée. Le Crétacé est caractérisé par une extension importante des aires climatiques tropicale et aride, et par l'absence d'aire climatique polaire. Le Permo-Carbonifère est marqué par la réduction latitudinale de ces aires au profit des aires de climat polaire et tempéré froid. À l'époque actuelle, les aires polaires existent au nord comme au sud mais leur extension est plus réduite qu'au Permo-Carbonifère ; l'aire tropicale est également présente avec une extension là aussi plus faible qu'au Crétacé. La Terre a donc connu des conditions climatiques très éloignées de celles de l'époque actuelle. Le climat global oscille entre un extremum chaud sans calotte glaciaire et un extremum froid avec calotte glaciaire.

UNITÉ 3 Relations entre paléogéographie et climat

[pp. 122-123 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

Sur les grandes durées (par exemple le milliard d'années) les traces de variations climatiques sont enregistrées dans les roches sédimentaires. Des conditions très éloignées de celles de l'époque actuelle ont existé. On étudie un exemple permettant de reconstituer les données climatiques et leur explication en termes de géodynamique.

Conseils et suggestions

– Après avoir fait le constat de variation climatique globale à l'échelle des temps géologiques, il convient d'étudier les facteurs de contrôle du climat global. Ces facteurs de contrôle sont les mêmes quelle que soit l'époque choisie, car la physique et la chimie des processus ne varient pas avec les temps géologiques. Les climats varient à l'échelle des temps géologique mais les facteurs sont eux invariants, c'est l'intensité relative de ces différents facteurs qui détermine *in fine* le climat global. Ainsi, l'exemple choisi peut servir à l'élaboration d'un modèle général de contrôle de climat global. Tout autre exemple pourra être étudié en utilisant la même démarche comme une application. Il est important, pour

un exemple d'extremum climatique donné, de ne pas présenter un processus comme étant le facteur de contrôle du climat à cette époque. Car alors, si l'on change d'exemple, il faudra trouver une autre explication *ad hoc*.

– L'unité 3 présente les facteurs de contrôle liés à la paléogéographie. Les modifications de la dynamique des enveloppes fluides comme facteurs du climat sont simplement évoquées. Les particularités paléogéographiques d'une époque agissent sur l'albédo de la Terre et donc sur le bilan radiatif. Les processus à l'origine des modifications de l'intensité de l'effet de serre sont étudiés dans l'unité suivante. Les **unités 3 et 4** sont toutefois indissociables pour les raisons évoquées plus haut.

Exploitation des documents par les activités

Mettre en relation des informations.

1 Au Permo-Carbonifère (**doc. 1**), les masses continentales sont fortement regroupées et occupent une large surface. Un orogène de très grande dimension se trouve au niveau de l'équateur. Le pôle sud est occupé par une importante masse continentale couverte d'une calotte glaciaire.

La paléogéographie du Crétacé supérieur (**doc. 2**) est marquée par une surface de terres émergées réduite et par une surface immergée importante. Aucun orogène majeur n'est observable : les reliefs sont peu marqués. Les continents sont moins éclatés qu'actuellement.

Les caractéristiques paléogéographiques évoluent donc au cours des temps géologiques.

② Alors que la calotte glaciaire Sud est très étendue et atteint des basses latitudes (40° de latitude), la calotte glaciaire Nord est inexistante (il y a 300 Ma, **doc. 1**) ou à peine développée à d'autres moments du Permo-Carbonifère (présence de tillites **unité 2, doc. 1**). Or, les continents ne sont pas répartis symétriquement dans les hémisphères Nord et Sud. Une grande surface continentale occupe les hautes latitudes dans l'hémisphère Sud, une petite surface continentale dépasse les 60° de latitude dans l'hémisphère Nord. Une calotte glaciaire est une accumulation de glace sur une surface continentale. La particularité paléogéographique du Permo-Carbonifère et le contraste des étendues des calottes glaciaires Nord et Sud montrent qu'il est nécessaire qu'une grande surface continentale se trouve aux hautes latitudes pour qu'une calotte glaciaire puisse s'y développer.

③ Au Permo-Carbonifère, la calotte glaciaire est très étendue dans l'hémisphère Sud, ce qui augmente la réflexion du rayonnement solaire. En tenant compte de la surface des terres émergées, de la surface océanique liquide et de la surface des calottes glaciaires on estime une valeur d'albédo de 0,300. Toutefois, on n'a pas tenu compte de la glace de mer, dont aucune signature sédimentaire n'a

pu être conservée. La valeur de 0,300 est donc une sous-estimation de l'albédo moyen du Permo-Carbonifère. Si on considère, comme pour le climat actuel, que la surface de glace de mer est sensiblement la même que la surface de la calotte glaciaire, on obtient une valeur d'albédo moyen de 0,324. L'albédo serait alors légèrement plus élevé au Permo-Carbonifère qu'actuellement, ce qui correspond, comme pour la période actuelle, à une période froide, durant laquelle la réflexion du rayonnement solaire vers l'espace est importante (environ 32,4 % pour le Permo-Carbonifère).

Au Crétacé supérieur, l'albédo moyen de la surface terrestre était de l'ordre de 0,270, valeur faible comparée à la valeur actuelle de 0,316. Cette différence s'explique par l'importante surface immergée au Crétacé, de faible albédo, et par l'absence de calotte polaire, de glace de mer ou de hauts reliefs enneigés. Le faible albédo terrestre au Crétacé supérieur se traduit par l'absorption d'une fraction plus importante du rayonnement solaire qu'actuellement, donc par une température d'équilibre élevée de la surface terrestre (climat global chaud).

④ À l'échelle des temps géologiques, la paléogéographie a varié sous l'influence de la tectonique des plaques (**doc. 5**). Or la répartition des continents est un paramètre majeur qui contraint la formation ou non d'une calotte glaciaire aux pôles, la répartition des terres immergées et émergées, la présence de grandes chaînes de collision, et ainsi la valeur de l'albédo terrestre, c'est-à-dire la quantité d'énergie solaire absorbée ou réfléchi. La répartition des continents contrôle également la circulation océanique, la circulation atmosphérique, et donc le climat à l'échelle locale et globale.

UNITÉ 4 Relations entre cycle du carbone et climat

[pp. 124-125 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

Sur les grandes durées (par exemple le milliard d'années) les traces de variations climatiques sont enregistrées dans les roches sédimentaires. Des conditions très éloignées de celles de l'époque actuelle ont existé. On étudie un exemple permettant de reconstituer les données climatiques et leur explication en termes de géodynamique.

Conseils et suggestions

Dans cette **unité 4**, on montre les différents processus qui peuvent aboutir à une variation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère, et donc à une variation de l'intensité de l'effet de serre. Ces processus correspondent pour certains à un prélèvement du CO₂ atmosphérique et pour d'autres à une émission de CO₂ dans l'atmosphère : par exemple au Crétacé supérieur l'altération faible des continents et le volcanisme important ont tendance à faire augmenter la teneur en CO₂ dans l'atmosphère, alors que l'intense fossilisation de matière organique a tendance à faire diminuer le taux de CO₂ atmosphérique. Il convient donc de faire un bilan des différents processus (qui varient de manière plus ou moins indépendante) pour l'époque choisie et de montrer que c'est l'importance relative de ces différents mécanismes qui va décider du sens d'évolution du taux de CO₂, visible sur le **doc. 1**.

Exploitation des documents par les activités

Formuler des hypothèses et les tester. Communiquer sous forme de schéma.

① La fin du Carbonifère et le début du Permien sont caractérisés par une teneur en CO₂ atmosphérique proche de la teneur actuelle, ce qui correspond à un effet de serre modéré, et donc à une période froide.

Au Crétacé supérieur, l'atmosphère contient de l'ordre de 1 500 ppm de CO₂, environ 5 fois plus que durant la période pré-industrielle. L'effet de serre est donc plus important qu'actuellement, ce qui correspond à une période chaude.

② La teneur en CO₂ atmosphérique est la conséquence de l'importance relative de chacun des processus intervenant dans le cycle du carbone.

On peut donc formuler l'hypothèse que la faible teneur atmosphérique en CO₂ au Permo-Carbonifère correspond à des flux entrants plutôt faibles (peu de dégazage lié au volcanisme) et/ou à des flux sortants plutôt élevés (altération chimique des continents, enfouissement et fossilisation de matière organique). Et inversement pour la forte teneur en CO₂ atmosphérique au Crétacé supérieur.

3 La paléogéographie du Permo-Carbonifère (**doc. 1 p. 122**) montre une grande surface de continents émergés et de hauts reliefs en position équatoriale, sous climat chaud et humide. Par conséquent, l'altération chimique des continents est intense. Or, l'altération chimique des continents consomme du CO_2 atmosphérique (**doc. 3**). Ce processus a donc pu contribuer à la chute de teneur en CO_2 atmosphérique au cours du Carbonifère (**doc. 1**). L'enfouissement de matière organique et sa fossilisation (pétrole et charbon) est particulièrement rapide à cette période (vitesse d'enfouissement $> 9.10^{18} \text{ mol.Ma}^{-1}$), et ce stockage a également pu contribuer à appauvrir l'atmosphère en CO_2 (**doc. 5**). Dans le même temps, le dégazage lié au volcanisme est comparable à l'actuel (**doc. 4**), dans le bas de la fourchette des valeurs atteintes depuis 320 Ma.

Au Crétacé, d'une part la surface des terres émergées est faible et d'autre part cette surface présente peu de hauts reliefs (**doc. 2 p. 122**) : aucune chaîne de collision n'est visible. Le processus d'altération des roches continentales est donc réduit. Au Crétacé, peu de CO_2 est donc prélevé à l'atmosphère par altération chimique, ce qui participe à l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique (**doc. 3**). On peut estimer qu'au Crétacé, le dégazage de CO_2 lié au magmatisme, était 1,3 fois supérieur à l'actuel. Or l'activité volcanique s'accompagne d'une émission importante de CO_2 dans l'atmosphère (le CO_2 représente 30 % des gaz émis en dehors de l'eau). Donc la production magmatique particulièrement intense du Crétacé concourt à la mise en place de la teneur élevée du CO_2 atmosphérique lors de cette période (**doc. 4**). Le stockage de la matière organique sous forme de pétrole et de charbon est intense au Crétacé. On peut estimer en effet que ce stockage est 1,2 fois plus élevé qu'actuellement (**doc. 5**). Le carbone de cette matière

organique provient du CO_2 atmosphérique. Il a été intégré à la biosphère lors de photosynthèse et ne réintègrera pas l'atmosphère puisque cette matière organique n'est pas dégradée par la respiration mais fossilisée. Du CO_2 atmosphérique est ainsi piégé et retiré du cycle. La fossilisation de la matière organique au Crétacé modère l'élévation de la teneur en CO_2 atmosphérique.

4 EN CONCLUSION :

La surface relative occupée par la lithosphère continentale émergée non englacée et l'hydrosphère (eau liquide + glace) affecte le bilan radiatif de la Terre à travers l'albédo moyen et contrôle donc le climat global. Les interactions des enveloppes de surface à travers les processus tels que le magmatisme, l'altération chimique des continents, le stockage de la matière organique, contrôlent la teneur en CO_2 atmosphérique. Or la teneur en gaz à effet de serre tels que le CO_2 influence le bilan radiatif de la Terre et avec lui le climat global.

Ainsi par exemple, au Permo-Carbonifère, la teneur faible en CO_2 atmosphérique à l'origine d'un effet de serre peu intense et la valeur élevée de l'albédo moyen ont modifié le bilan radiatif terrestre et provoqué la mise en place d'un climat global froid. De plus, la présence d'un domaine continental au Pôle Sud a permis, dans ces conditions froides, de développer une calotte glaciaire importante et donc de rentrer dans une période climatique de glaciation. À l'opposé, au Crétacé supérieur, le CO_2 est abondant dans l'atmosphère du fait d'émissions volcaniques intenses et malgré le piégeage de matière organique, ce qui produit un effet de serre important, et l'albédo global de la Terre est faible du fait de l'absence de calotte glaciaire et du niveau élevé des océans. Cela contribue à l'établissement et au maintien d'un climat global chaud.

Schéma : voir p. 129, bilan de l'unité 4.

UNITÉ 5 Le développement de la vie et la transformation de l'atmosphère [pp. 126-127 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

L'atmosphère initiale de la Terre était différente de l'atmosphère actuelle. Sa transformation est la conséquence, notamment, du développement de la vie. L'histoire de cette transformation se trouve inscrite dans les roches, en particulier celles qui sont sédimentaires. Il s'agit de traiter le passage de l'atmosphère primitive à l'atmosphère oxydante en s'appuyant sur un nombre limité d'arguments pétrographiques.

Conseils et suggestions

L'unité 5 a pour but de montrer comment l'évolution du métabolisme des êtres vivants a provoqué une modification de la composition chimique des enveloppes fluides. Il est important de noter que l'apparition de la vie, datée aux alentours de 3,9 Ga, n'a pas d'impact visible sur la composition des enveloppes fluides. C'est l'apparition de la photosynthèse, vers 3,5 Ga, chez des organismes marins, qui va provoquer l'accumulation lente de dioxygène dans le

domaine marin. Il peut donc être intéressant de rappeler aux élèves que la vie s'est développée en milieu anoxique, et que c'est le développement du métabolisme photosynthétique, quelque 300 millions d'années plus tard, qui provoquera l'oxygénation de l'océan.

Exploitation des documents par les activités

Formuler des hypothèses et les tester. Communiquer sous forme de schéma.

1 L'atmosphère actuelle contient 21 % de dioxygène, un puissant oxydant, alors que l'atmosphère primitive de la Terre est dépourvue de dioxygène, elle est riche en eau et en dioxyde de carbone qui ne sont pas des oxydants puissants (**doc. 1**). L'atmosphère est donc passée de conditions initiales réductrices à des conditions actuelles oxydantes. Les expériences effectuées sur les clous en fer (**doc. 3**) montrent que la formation d'hématite nécessite de l'eau, du fer et du dioxygène. L'hématite est donc un bon indicateur de conditions oxydantes d'un milieu.

Les BIF sont des roches sédimentaires marines riches en hématite. Cette hématite s'est formée à partir du fer continental transporté jusqu'aux océans, du dioxygène et de l'eau de l'océan. Les BIF sont des archives sédimentaires ayant enregistré l'oxygénation des océans (**doc. 2**).

Les paléosols rouges sont des roches sédimentaires continentales riches en hématite. Le fer continental n'a pas été transporté jusqu'aux océans, il a précipité sur place grâce à l'eau de pluie et au dioxygène. Les paléosols rouges sont des archives sédimentaires ayant enregistré l'oxygénation de l'atmosphère (**doc. 2**).

② Les BIF se forment exclusivement entre -3,5 Ga et -2 Ga. On en déduit que le changement de composition chimique de l'océan (l'oxydation de l'océan) a commencé il y a 3,5 Ga. Les paléosols ne se forment qu'à partir de -2,2 Ga. On en déduit que l'accumulation de dioxygène dans l'atmosphère peut être datée à -2,2 Ga.

③ Les stromatolites sont des bioconstructions marines qui se forment sous une faible tranche d'eau, dans la zone photique, grâce à l'activité photosynthétique de certaines espèces de cyanobactéries.

Les plus anciennes stromatolites connues sont datées de -3,5 Ga. Les cyanobactéries sont probablement apparues à cette période. L'accumulation de dioxygène dans l'océan a également débuté il y a 3,5 Ga. L'oxygénation des océans pourrait donc résulter du rejet du dioxygène par photosynthèse et donc du développement de cyanobactéries. Le dioxygène présent dans des concentrations de plus en plus importante aurait commencé à diffuser dans l'atmosphère à partir de -2,2 Ga.

④ La condensation de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère primitive, vers -4,5 Ga, est à l'origine de la formation des océans, et d'une diminution de la pression atmosphérique. L'atmosphère reste principalement composée de CO₂ et de N₂, elle est réductrice. La formation des carbonates à partir du CO₂ atmosphérique explique l'enrichissement relatif de l'atmosphère en diazote. Le développement de certaines formes de vie, en particuliers les micro-organismes photosynthétiques marins tels que les cyanobactéries, provoque un enrichissement d'abord de l'hydrosphère puis de l'atmosphère en dioxygène. L'atmosphère devient alors oxydante.

EXERCICES DU THÈME 2

Chapitre 1

[pp. 92-96 du manuel]

L'évolution climatique et atmosphérique récente

Les exercices de la rubrique «Évaluer ses connaissances», l'exercice guidé et l'exercice 8 sont corrigés à la fin du manuel élève (pp. 214)

⑤ LA RÉPARTITION DES DÉSERTS

Formuler une hypothèse.

Réponses attendues :

1. La plupart des déserts présents à la surface de la Terre sont situés au niveau des tropiques :

- le Sahara, les déserts de la péninsule arabique, du Pakistan et de la Basse Californie sont situés de part et d'autre du tropique du Cancer ;
- le désert d'Atacama, du Namib, du Kalahari et ceux d'Australie chevauchent le tropique du Capricorne.

Les déserts de l'Ouest américain, de Gobi et ceux situés à proximité de la Mer Caspienne échappent à cette répartition latitudinale.

2. La localisation d'un grand nombre de déserts au niveau des tropiques pourrait être liée à la circulation atmosphérique : en effet, on constate que les vents alizés tout comme certains vents d'ouest partent de cette zone tropicale pour se diriger soit vers l'équateur,

soit vers des latitudes plus élevées. Les zones tropicales sont des zones de subsidence d'air sec.

D'autres hypothèses pourraient expliquer les zones désertiques plus marginales :

- la zone désertique est soumise à des vents qui ont franchi des hauts reliefs et de ce fait ont perdu l'essentiel de leur humidité (l'air s'assèche généralement en passant au dessus de montagnes) ;
- la zone désertique se situe loin d'un océan : les vents dominants ont, en traversant les terres, perdu l'essentiel de leur humidité.

⑥ CHENILLE PROCESSIONNAIRE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

S'informer et raisonner.

Réponses attendues :

1. Entre 1969-1979 et 2005-2006, la chenille processionnaire du pin a progressé :

- vers le nord (progression d'environ 50 km vers le nord en Région Centre et Pays de la Loire) ;
- en altitude dans les zones montagneuses (Pyrénées, Massif Central et Alpes)

2. La vitesse de propagation en région parisienne de la chenille processionnaire du pin est très irrégulière entre 1972 et 2009.

La vitesse moyenne est de l'ordre de 1,3 km.an⁻¹ (calcul effectué arbitrairement sur une ligne verticale passant par Orléans).

(...)

Période	Vitesse de progression approximative (km.an ⁻¹)
1972 – 1992	0,7
1992 – 1994	7,7
1994 – 2004	0,8
2004 – 2009	1,9

3. Comme la chenille processionnaire du pin se développe pendant l'hiver, elle est très sensible à la température qui règne en cette saison. Sa progression vers le nord et en altitude semble donc indiquer un réchauffement de la température en France en hiver. Ce réchauffement n'est pas continu d'un hiver à l'autre comme le montre la variation de la vitesse de progression selon les périodes étudiées.

⑦ CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DATES DES VENDANGES

Analyser un graphique.

S'informer et raisonner.

Réponses attendues :

1. La courbe de tendance en pointillés bleus montre clairement que de 1955 à 2005 les vendanges à Châteauneuf-du-Pape sont de plus en plus précoces (les vendanges ont eu lieu par exemple 15 jours plus tôt en 2000 qu'en 1960). Cependant, cette évolution se fait en « dents de scie » : en 1961, les vendanges ont eu lieu vers le 12 septembre (comme celles de 2005) alors qu'en 1962 elles ont eu lieu vers le 2 octobre.

2. On remarque une évolution semblable de la moyenne des températures maximales entre mai et août et de la date des vendanges : ces deux paramètres sont corrélés.

3. Le choix de la mise en parallèle de ces deux courbes est judicieux : il semble y avoir un lien entre la moyenne des températures maximales entre mai et août et la date des vendanges. Cependant, certaines années contredisent partiellement ce lien : l'année 1961, où la moyenne des températures maximales entre mai et août était de 26 °C seulement et les vendanges très précoces (12 septembre) alors que l'année suivante la moyenne des températures était proche de 27 °C et les vendanges ont été très tardives (2 octobre). D'autres facteurs doivent sans doute être pris en compte (gelées tardives, pluviométrie, etc.).

4. La date des vendanges peut donc être considérée comme un indicateur climatique : elle est liée à la moyenne des températures maximales entre mai et août. Si les vendanges sont plus précoces (ou plus tardives), elles nous renseignent indirectement sur la tendance de l'évolution des températures maximales de mai à août.

⑨ LA TEMPÉRATURE GLOBALE

Esprit critique.

Réponses attendues :

1. La notion de « température globale mondiale » est d'interprétation physique délicate (**doc. 3**), et le texte proposé souligne les difficultés méthodologiques inhérentes à son estimation. Il pose, en particulier, la question de savoir combien de thermomètres utiliser, et à quelle fréquence regarder les mesures.

La carte du **doc. 2** montre que la localisation spatiale des stations d'enregistrement dont les données sont utilisées pour estimer mensuellement la température moyenne globale est loin d'être homogène : la densité de ces stations est très forte dans les pays européens, les États-Unis, le Japon et la Chine de l'Est, plus faible dans les autres régions voire très faible (dans le Sahara, en Amazonie, etc.) ou quasi inexistante (dans les océans). (*Remarque.* – La faible densité apparente des stations d'enregistrements aux latitudes élevées est en partie due à la projection utilisée). Enfin, ces stations sont en majorité relativement récentes (moins d'un siècle de fonctionnement) : cela est préjudiciable car les scientifiques n'ont pas de grandes séries continues qui seraient pourtant indispensables pour bien cerner l'évolution climatique de la station d'enregistrement (les données doivent être moyennées sur une trentaine d'années). Les séries les plus longues de mesures ont moins de deux siècles (stations localisées en Europe et dans l'Est des États-Unis).

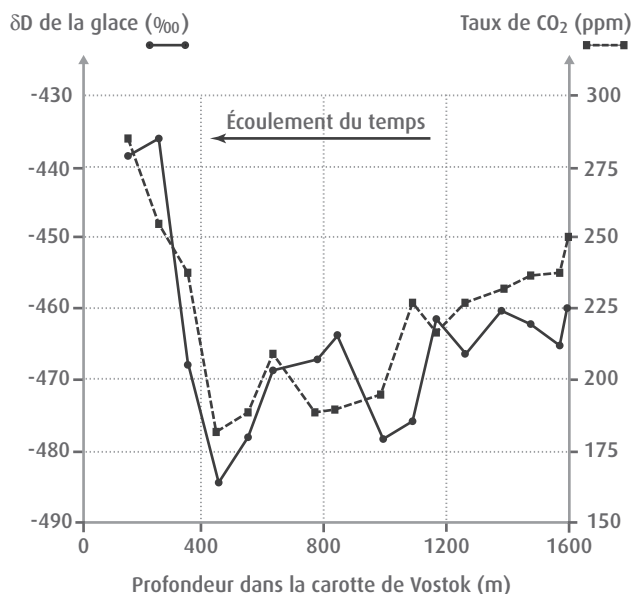
Pour rendre compte de ces biais, les groupes de recherche indiquent, sur le graphique des anomalies de la température moyenne globale (**doc. 1**), des barres d'incertitude : on constate que plus l'on remonte dans le temps, plus les incertitudes sur les mesures sont importantes.

⑩ UNE SIMULATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN FRANCE

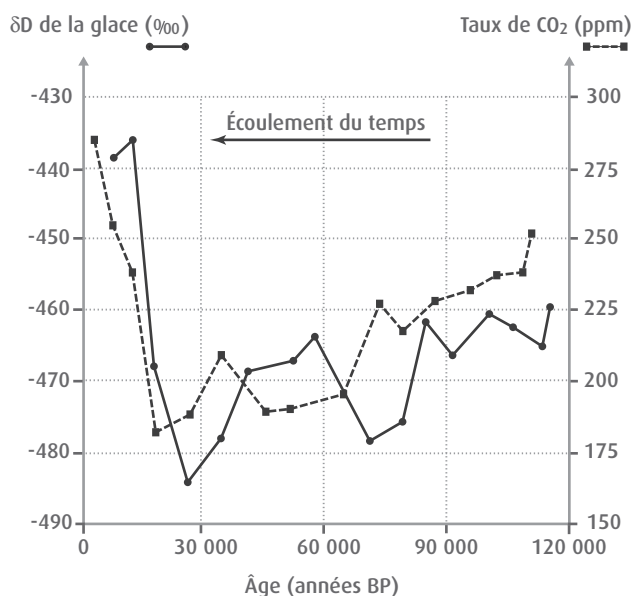
B2i.

Réponses attendues :

D'après le tableau de données, pour une certaine profondeur, il existe un décalage de quelques milliers d'années (3 200 à 6 600 ans selon les profondeurs considérées, voir tableau ci-dessous) entre l'âge de la glace proprement dite et l'âge de l'air piégé dans cette glace. Ce décalage tient au délai de fermeture de la porosité des dépôts neigeux, lors de leur transformation en névé puis en glace : en effet, tant que la porosité n'est pas fermée, les gaz peuvent diffuser entre la profondeur et la surface, ce qui renouvelle les gaz présents dans les pores. L'évolution de la composition de l'atmosphère influence donc la composition du mélange gazeux piégé, jusqu'à fermeture de la porosité. C'est d'ailleurs en partie en utilisant des modèles d'évolution du névé que l'on a pu estimer cette différence d'âge. En fond de carotte, le décalage d'âge est de l'ordre de quelques % de l'âge de la glace (ce qui est faible sans être négligeable). Mais près de la surface, le décalage représente plus de 50 % de l'âge de la glace (59 % à 149 m de profondeur). Il est intéressant de comparer l'évolution du δD de la glace (qui témoigne de la température en Antarctique) et celle du taux de CO_2 atmosphérique (gaz à effet de serre). Sur l'un des deux graphiques ci-dessous, les données sont représentées en fonction de la profondeur dans la carotte, c'est à dire sans tenir compte du délai de fermeture de la porosité. Sur l'autre graphique, les données sont représentées en fonction de l'âge.



Relation entre profondeur de l'échantillon dans la carotte de Vostok, le δD de la glace et le taux de CO_2 du mélange gazeux piégé.



Relation entre l'âge et le δD de la glace et entre l'âge et le taux de CO_2 du mélange gazeux piégé, dans la carotte de Vostok.

Si l'on interprétait directement les données en fonction de la profondeur, on pourrait avoir l'impression que les variations du taux de CO_2 sont parfois synchronisées avec les variations du δD (donc de la température), et parfois en retard sur ces variations.

En se basant sur l'âge, on montre que les variations du taux de CO_2 sont toujours en retard sur les variations du δD .

Ce retard est l'un des arguments couramment avancés par les «climato-sceptiques». Schématiquement, ils annoncent que le CO_2 ne peut pas être à l'origine du réchauffement puisque les variations de son taux se produisent après le réchauffement. Pourtant, des climatologues ont, dès les années 1990, prédit ce décalage (pubs.giss.nasa.gov/docs/1990/1990_Lorius_et_al.pdf), aujourd'hui interprété de façon solide : depuis plusieurs centaines

de milliers d'années, les cycles climatiques sont sous le contrôle des paramètres orbitaux de la Terre, mais les variations de température sont amplifiées par les variations du taux de CO_2 atmosphérique. Avant la période industrielle, le CO_2 jouait, non pas un rôle de déclencheur des variations climatiques, mais un rôle d'amplificateur (rétroaction positive, voir par exemple www.skepticalscience.com/co2-lags-temperature.htm).

Chapitre 2

[pp. 112-115 du manuel]

Le système climatique terrestre et l'effet de serre

Les exercices de la rubrique «Évaluer ses connaissances», l'exercice guidé et l'exercice 6 sont corrigés à la fin du manuel élève (pp. 214-215)

⑤ OCÉAN ET DIOXYDE DE CARBONE

S'informer et raisonner.

Réponses attendues :

1. La carte du **doc. 1** montre que l'océan constitue une source de CO_2 principalement entre les latitudes $20^\circ N$ et $20^\circ S$ (on observe les plus importants rejets de CO_2 par l'océan au Sud de la péninsule arabique, et surtout à proximité de l'équateur, dans l'océan Pacifique à l'ouest de l'Amérique du Sud et dans l'océan Atlantique à l'est du Brésil). Inversement, l'océan est globalement un puits de CO_2 aux latitudes supérieures à 20° Nord et Sud.

D'après le **doc. 2**, on constate que plus la température de l'océan augmente, plus la solubilité du CO_2 est faible. Cette propriété physique peut expliquer globalement la localisation des puits et des sources de CO_2 vue précédemment : les courants océaniques déplacent des masses d'eau qui ont tendance à se refroidir si elles se déplacent en direction des pôles, et à se réchauffer si elles se déplacent en direction de l'équateur. Une eau qui se refroidit se retrouve sous-saturée en CO_2 , et absorbe donc du CO_2 atmosphérique, alors qu'une masse d'air qui se réchauffe se retrouve sur-saturée en CO_2 et dégaze donc.

2. Si la température globale augmente, l'océan se réchauffera : les zones se comportant comme puits de CO_2 seront donc moins nombreuses ; celles dégazant du CO_2 augmenteront en surface. Il est possible que l'océan, qui se comporte actuellement comme un puits de carbone, deviennent une source de carbone.

3. Si un réchauffement modéré se traduit par une libération de GES par l'océan, le réchauffement sera amplifié du fait d'une augmentation de l'effet de serre. La rétroaction est positive, amplificatrice du réchauffement initial.

⑦ LA COMPLEXIFICATION DES MODÈLES CLIMATIQUES

Mobiliser ses connaissances et raisonner.

Réponses attendues :

Les premiers modèles climatiques, construits dans les années 70, ne prenaient en compte que l'atmosphère (circulation atmosphé-

(...)

rique et composition atmosphérique). Ils ont progressivement intégré l'albédo de surface (composante « surface terrestre »), le comportement de l'océan (circulations océaniques) et la banquise (variation de l'albédo au cours du temps en fonction de la surface occupée par la glace de mer), puis les aérosols sulfatés (produits lors de la combustion des énergies fossiles, mais aussi de feux de forêts ou d'éruptions volcaniques, ils se comportent comme de minuscules miroirs vis à vis de l'énergie solaire modulant de ce fait le bilan radiatif de la Terre).

Depuis 2000, le rôle complexe des autres aérosols commence à être pris en compte (certains réfléchissent, d'autres absorbent – carbone noir, silicates – le rayonnement solaire), tout comme le cycle du carbone (les modèles climatiques intègrent le comportement de différents puits et sources de CO_2). Depuis 2005, la dynamique de la végétation (une forêt jeune a tendance à stocker du CO_2 atmosphérique par la photosynthèse alors qu'une forêt mature est en équilibre voire en libère) et la chimie atmosphérique (ensemble des réactions chimiques qui ont lieu dans l'atmosphère comme par exemple la formation d'ozone stratosphérique sous l'action du rayonnement solaire) sont également intégrés à certains modèles climatiques. En l'espace de 40 ans, les modèles climatiques ont donc considérablement évolué. Cette évolution a été permise, d'une part, par l'augmentation des capacités de calcul (supercalculateurs), et d'autre part, par l'acquisition de données (terrain, satellites) sur les différentes composantes du système climatique, et par des développements théoriques (chimie atmosphérique, etc.). Cette évolution permet, en principe, d'obtenir des modèles climatiques plus performants car prenant en compte les nombreux acteurs du système climatique, et la complexité de leurs interactions. Si l'étude de modèles simples peut être très riches d'enseignements, les prévisions climatiques nécessitent des modèles plus complexes, au comportement plus proche de celui du véritable système climatique.

⑧ LA TEMPÉRATURE DE VÉNUS

Adopter une démarche scientifique.

Réponse attendue:

1. L'albédo d'une planète est le rapport entre l'énergie solaire réfléchie et incidente (reçue). D'après les données du **doc. 1**, l'albédo de Vénus est de 0,7 (490/700).

On confond fréquemment Vénus avec une étoile car elle est très brillante (elle est souvent le premier objet à apparaître au coucher du soleil, la Lune mise à part). Cette forte luminosité est liée à la distance entre le Soleil et Vénus, et à l'albédo de la planète : Vénus est relativement proche du Soleil (108 millions de kilomètres), donc elle est soumise à un flux solaire important (700 W.m^{-2} au sommet de l'atmosphère vénusienne). De plus, Vénus a un albédo élevée (sa surface est entièrement couverte de nuages), et réfléchit donc 490 W.m^{-2} . Enfin, Vénus est la planète qui s'approche le plus de la Terre (distance minimale Terre-Vénus de 41 000 km). Vénus a donc, à l'œil nu, l'aspect d'une étoile, bien qu'il s'agisse d'une planète.

2. Il règne à la surface de Vénus une température beaucoup plus importante (735 K) que celle attendue en théorie (230 K), en tenant compte seulement de la distance Soleil-Vénus et de l'albédo de Vénus. L'atmosphère vénusienne étant très riche en CO_2 , on peut proposer

que cette différence de température soit liée à un effet de serre particulièrement fort. Le **doc. 2** permet de mettre en évidence les gaz responsables de l'effet de serre vénusien. Comme Vénus (d'après sa température de surface) émet principalement entre $1 \mu\text{m}$ et $8 \mu\text{m}$, il s'agit :

- principalement du CO_2 (gaz le plus abondant de l'atmosphère), qui absorbe totalement l'énergie émise par la surface de Vénus aux longueurs d'onde autour de $2 \mu\text{m}$ et de $4 \mu\text{m}$ (longueurs d'onde proches du maximum d'émission de la surface de Vénus) ;
- de la vapeur d'eau dont la teneur atmosphérique est très faible mais qui absorbe totalement à des longueurs d'onde de $1 \mu\text{m}$, entre 3 à $4 \mu\text{m}$ et entre 5 à $7 \mu\text{m}$;
- du CO , de concentration également faible, mais dont le pic d'absorption (environ 40 % de l'énergie émise à cette longueur d'onde est absorbée) correspond également à une longueur d'onde ($4,5 \mu\text{m}$) proche du maximum d'émission de la surface de Vénus) ;
- du SO_2 , gaz dont la concentration est plus importante que celle des deux gaz précédents, qui a un pic d'absorption (d'environ 90 %) entre 7 et $8 \mu\text{m}$.

On remarque que la présence conjuguée de ces quatre gaz doit provoquer un effet de serre conséquent car ensemble, ils absorbent l'essentiel du rayonnement émis par la surface de Vénus.

3. La schématisation du bilan radiatif de Vénus est semblable à celle du bilan radiatif simplifié du système Terre – Atmosphère (p. 108), avec des valeurs différentes des flux radiatifs et des températures d'équilibre :

- rayonnement solaire reçu : 700 W.m^{-2} ;
- rayonnement réfléchi : 490 W.m^{-2} (surtout au niveau de l'atmosphère) ;
- rayonnement absorbé : 210 W.m^{-2} (atmosphère + surface) ;
- température de surface 735 K ;
- pour les autres flèches, l'énoncé n'indique pas de valeurs numériques pour le flux radiatif. On peut préciser que le rayonnement émis par la surface vénusienne l'est principalement entre 1 et $8 \mu\text{m}$ de longueur d'onde.

⑨ L'AVENIR DES GLACIERS DE L'HÉMISPHERE NORD

Esprit critique

Réponses attendues:

1. Le premier facteur cité qui influence la quantité de glace présente dans l'hémisphère nord est l'énergie solaire reçue à 65° N (à proximité du cercle polaire arctique) le jour du solstice de juin (début de l'été). Plus l'énergie reçue est importante, plus la température de cette région sera élevée. La glace fondra alors davantage pendant l'été et le volume de glace diminuera.

L'autre facteur cité est la concentration atmosphérique de CO_2 . Le CO_2 est un gaz à effet de serre : si sa concentration augmente, la température globale augmentera et le volume de glace diminuera. Par contre si la concentration en CO_2 baisse, l'effet de serre sera moins important : la température globale diminuera et le volume de glace augmentera.

2. D'après les résultats des simulations, si du fait du rejet anthropique de CO_2 la concentration atmosphérique de CO_2 atteint les

750 ppm d'ici 2010 (courbe pointillée rouge), il devrait y avoir une disparition totale des glaces de l'hémisphère Nord d'ici moins de 10 000 ans. Inversement, si la concentration en CO₂ n'avait pas été modifiée par les activités humaines (courbe noire), un volume de glace d'environ 5 millions de km³ subsisterait dans l'hémisphère nord dans les prochains 10 000 ans.

On remarque qu'à plus long terme, les effets du rejet actuel (ou à venir) de CO₂ lié aux activités humaines sur le volume de glace de l'hémisphère nord s'amoindrissent : d'ici 30 000 ans les deux tracés se rejoignent et évoluent par la suite de la même manière.

Dans 70 000 ans, le rejet actuel (ou à venir) de CO₂ lié aux activités humaines ne semble plus avoir d'impact sur les glaciers de l'hémisphère nord : le tracé rejoint la courbe bleue (indiquant l'évolution des glaciers de l'hémisphère nord pour un taux de CO₂ correspondant au taux atmosphérique de CO₂ le plus bas atteint depuis 800 000 ans).

3. Sir Fred Hoyle envisage un passage imminent à une période glaciaire. Selon lui, ce changement climatique affecterait l'agriculture et mettrait en péril les populations humaines. Pour éviter cela, il préconise d'injecter dans l'atmosphère des quantités importantes de gaz à effet de serre. Or, d'après les résultats des simulations présentées dans le **doc. 2**, la prochaine période glaciaire ne devrait pas avoir lieu avant 80 000 ans (même estimation si le taux de CO₂ n'avait pas été modifié par les activités humaines). Rejeter massivement des GES dans l'atmosphère, pour éviter une glaciation ne servirait à rien car les effets de ces émissions massives s'estomperaient sans doute bien avant cette échéance. Dans l'état actuel de nos connaissances, c'est l'application de la proposition de Sir Fred Hoyle qui pourrait bouleverser les conditions de vie de l'humanité : un rejet massif de GES augmenterait fortement l'effet de serre et accentuerait alors le réchauffement climatique (voir le **doc. 6 p. 107**).

⑩ UNE SIMULATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN FRANCE

B2i.

Remarque. – Le scénario intensif (A2 du GIEC) proposé dans ce simulateur correspond au scénario 1 des **doc. 4 et 5** aux pages 106 et 107 du livre ; le scénario modéré (B2 du GIEC) au scénario 2 du **doc. 4** à la page 106.

Réponses attendues :

5. Quel que soit le scénario (intensif ou modéré), on constate une évolution des paramètres proposés. La tendance globale pour la France est (et ce quelle que soit la saison choisie) :

- une augmentation des températures maximales ;
 - une augmentation des températures minimales ;
 - une augmentation du rayonnement solaire en surface sauf pour l'automne (où l'on constate au contraire une diminution) ;
- L'évolution des précipitations journalières et des réserves en eau dans le sol sont deux paramètres qui n'ont pas de tendance bien nette (sauf en été pour les réserves en eau dans le sol : elles devraient fortement baisser).

Cependant, il convient de rester prudent comme le rappelle Michel Déqué (Centre de recherches de Météo-France, Unité de recherche climatique) : « Le simulateur montre que le changement climatique

ne signifie pas un réchauffement continu de l'atmosphère. Chaque décennie n'est pas nécessairement plus chaude que la précédente. Ces résultats indiquent que la variabilité du climat continue d'être présente. Même avec le changement climatique, cette caractéristique ne disparaît pas. Ainsi, au cours de la deuxième moitié du XXI^e siècle, période durant laquelle le réchauffement est évident, les saisons pourront varier d'une année à l'autre, comme aujourd'hui : été tour à tour frais ou chaud, hiver doux ou rigoureux. Cela est valable pour les deux scénarios envisagés. »

Chapitre 3

[pp. 132-135 du manuel]

Variations atmosphériques et climatiques à l'échelle des temps géologiques

Les exercices de la rubrique «Évaluer ses connaissances», l'exercice guidé et l'exercice 6 sont corrigés à la fin du manuel élève (pp. 215)

⑤ LE DÉVELOPPEMENT DE LA VIE ET LA COUCHE D'OZONE

Mobiliser ses connaissances.

Réponses attendues :

1. L'atmosphère primitive est composée d'eau (80 %), de dioxyde de carbone (15 %) et de diazote (5 %). Sur le **doc. 5 p. 99**, on remarque qu'aucun de ces gaz n'absorbe de rayonnement ultraviolet : l'atmosphère primitive est donc transparente aux ultraviolets.

2. La présence d'ozone dans l'atmosphère est liée à celle du dioxygène (**doc. 1**). En effet, le rayonnement solaire ultraviolet dissocie le dioxygène atmosphérique en deux atomes d'oxygène qui peuvent chacun se recombiner avec une molécule de dioxygène pour former une molécule d'ozone. Comme l'ozone absorbe une grande partie du rayonnement ultraviolet d'origine solaire (**doc. 5 p. 99**), cela limite la quantité d'UV atteignant la surface terrestre. Ainsi, le développement de la couche d'ozone dans l'atmosphère contribue à l'ouverture de nouvelles niches écologiques situées sur les continents émergés, et l'on assiste au développement de nouvelles formes de vie, auparavant cantonnées au domaine marin (**doc. 2**).

⑦ LA FORMATION DE LA CALOTTE POLAIRE ANTARCTIQUE

Mobiliser ses connaissances.

Réponses attendues :

1. Le climat global s'est refroidi à la transition entre l'Éocène et l'Oligocène, il y a environ 34 Ma. On cherche à identifier des facteurs susceptibles d'expliquer ce refroidissement.

D'après des indicateurs isotopiques (**doc. 1**), le taux de CO₂ atmosphérique a diminué entre l'Éocène et l'Oligocène. Il était de l'ordre de 1 000 ppm il y a 40 Ma, et d'environ 200 à 300 ppm après -25 Ma. Malheureusement, l'absence d'indicateurs isotopiques entre -40 et -25 Ma empêche de situer précisément dans le temps l'appauvrissement de l'atmosphère en CO₂. Le **doc. 3** montre que

(...)

la transition Éocène-Oligocène coïncide avec une variation de la valeur d'un indice isotopique : le delta ^{18}O dans les carbonates des squelettes de foraminifères benthiques. Or, cet indice témoigne du volume de glaces continentales. Ce volume, nul à l'Éocène (indice ayant des valeurs inférieures à 2 pour mille), a augmenté fortement à partir de -34 Ma, ce qui confirme qu'une calotte de glace s'est alors formée à ce moment. D'après le **doc. 2**, les circulations océaniques dans la région du pôle Sud se sont modifiées entre -40 et -35 Ma, du fait de l'ouverture de deux passages entre l'Antarctique et l'Amérique du Sud d'une part (passage de Drake), et entre l'Antarctique et l'Australie d'autre part. Ces passages, actuellement empruntés par un courant circumpolaire, contribuent à l'isolement thermique de l'Antarctique, donc à son climat très froid. Le **doc. 4** donne les résultats de simulations du volume des glaces antarctiques, sur une période de 10 Ma. La configuration paléogéographique est fixée à celle qui existait il y a 34 Ma. Les simulations reproduisent la diminution du taux de CO_2 constatée au **doc. 1** : ce taux de CO_2 diminue de 1 000 ppm à 500 ppm, de façon progressive sur les 10 Ma. Certaines simulations supposent le passage de Drake ouvert, d'autres le supposent fermé. On constate que la diminution du taux de CO_2 atmosphérique imposée dans les simulations suffit à rendre compte de la formation de la calotte glaciaire antarctique. Mais cette formation intervient plus tôt (c'est à dire, dans la simulation, pour des taux de CO_2 plus élevés) si le passage de Drake est ouvert, que si ce passage est fermé : il y a près de 3 millions d'années de décalage entre la formation de la calotte antarctique avec et sans circulation océanique au niveau du passage de Drake.

Les observations (**doc 1 à 3**) et les simulations numériques (**doc. 4**) montrent donc que le refroidissement il y a 34 Ma peut s'expliquer par une diminution du taux de CO_2 atmosphérique, associée à une modification des circulations océaniques.

2. Les simulations suggèrent que l'ouverture du passage de Drake n'était pas une condition nécessaire à la formation de la calotte antarctique il y a 34 Ma : la diminution du taux de CO_2 atmosphérique était suffisante. Mais l'ouverture du passage de Drake a probablement permis une formation plus précoce de la calotte, obtenue pour un taux de CO_2 atmosphérique plus élevé. Le volume final de la calotte est très semblable, que le passage de Drake soit supposé ouvert ou fermé.

⑧ VARIATIONS CLIMATIQUES À DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE TEMPS

Esprit critique.

Réponses attendues :

1. Le **doc. 1** montre l'évolution de la température moyenne globale depuis le début du Phanérozoïque. On constate que cette température diminue depuis le milieu du Cénozoïque. La période s'étalant du milieu du Cénozoïque à aujourd'hui correspond à une glaciation. La tendance climatique récente est donc le refroidissement.

2. Le **doc. 2** montre, quant à lui, l'évolution de la température moyenne globale depuis 1850, époque de la révolution industrielle. On remarque que cette température augmente au cours du temps. Le réchauffement climatique est particulièrement marqué depuis 1950. La tendance climatique récente est donc le réchauffement.

3. La contradiction apparente entre les conclusions tirées de

l'analyse des deux documents tient à une différence d'échelle de temps : les deux documents présentent les variations de la température moyenne globale, mais sur une période de 540 Ma pour le **doc. 1**, et seulement 150 ans pour le **doc. 2**.

Bien que l'échelle de variation de température ne soit que qualitative sur le **doc. 1**, on peut signaler que l'amplitude de variation de température de 1°C observée sur les derniers 150 ans est d'un ordre de grandeur bien inférieur à la variation de température observable à l'échelle des temps géologiques (ordre de grandeur de 10°C).

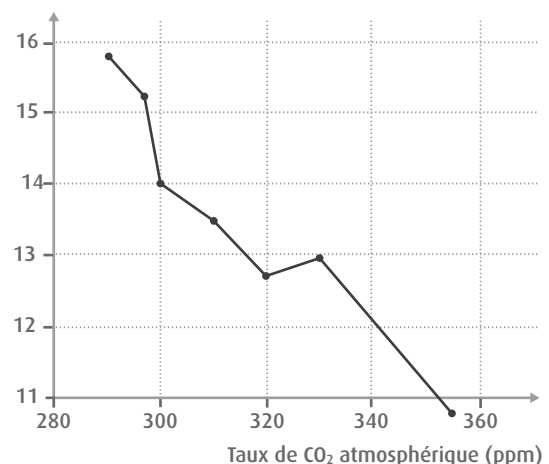
Donc l'enregistrement d'un réchauffement climatique sur les 150 dernières années s'inscrit dans un refroidissement climatique de plus grande ampleur à l'échelle de quelques millions d'années.

⑨ INDICE STOMATIQUE ET VARIATION DU TAUX DE CO_2 ATMOSPHÉRIQUE

Esprit critique.

Réponses attendues :

1. Indice stomatique (%)



Indice stomatique de feuilles de chêne en fonction de la teneur en CO_2 atmosphérique

2. On constate que l'indice stomatique est d'autant plus faible que le taux de CO_2 atmosphérique est élevé. Il existe donc une corrélation négative entre la teneur en CO_2 atmosphérique et l'indice stomatique des feuilles de chêne sessile, pour des feuilles de moins de 150 ans, probablement prélevées dans des herbiers.

3. On a trouvé des feuilles de chêne sessile fossilisées, ayant entre 2,5 et 10 Ma. On peut supposer que la corrélation entre taux de CO_2 et indice stomatique, constatée pour des feuilles récentes, était également vérifiée dans le passé. C'est le principe d'actualisme. On peut alors déduire le taux de CO_2 du passé de l'indice stomatique des feuilles fossiles, sans perdre de vue que la validité de l'estimation dépend de la validité de la corrélation entre taux de CO_2 et indice stomatique.

Dans la pratique, on peut déterminer à l'aide du tableur grapheur une droite de tendance. Cette droite a pour équation

$y = -0,0705x + 35,751$, où x est le taux de CO_2 atmosphérique et y l'indice stomatique. On veut déterminer x à partir de la connaissance de y , il faut donc extraire x de cette équation, ce qui donne $x = -14,2y + 507$ après arrondi.

4. En utilisant cette équation, on peut estimer le taux de CO₂ atmosphérique aux différentes dates où ont été retrouvées des feuilles de chêne sessile fossiles. Les résultats sont arrondis au ppm près.

Âge de la feuille fossile (Ma)	10	8	6,5	4,5	2,5
Indice stomatique (%)	12,5	12	16,2	11,5	9,5
Taux de CO ₂ atmosphérique estimé (ppm)	330	337	277	344	372

Dans l'hypothèse où, depuis 10 Ma, le climat est contrôlé essentiellement par la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre, on peut supposer que la période -8 à -6,5 Ma est une période de refroidissement climatique, et que la période -6,6 à -2,5 Ma est une période de réchauffement climatique. Cette hypothèse doit être testée par d'autres approches (géochimie, palynologie, modélisation, etc.).

Objectif bac

[p. 138-141 du manuel]

1 LES NEIGES DU KILIMANDJARO

Réponses attendues :

Le document de presse (**doc. 1**) identifie trois causes à l'origine de la forte régression de la calotte glaciaire sommitale du Kilimandjaro :

- le réchauffement climatique ;
- la déforestation ;
- le manque de précipitations.

Nous allons, à partir de documents scientifiques, discuter de la validité des affirmations avancées par ce document de presse.

Si le réchauffement climatique est bien une des causes de la fonte de la glace du Kilimandjaro, on devrait constater une augmentation de la température mesurée au sommet de la plus haute montagne d'Afrique. Le **doc. 2** ne montre pas une telle évolution : de 1960 à 2006, on ne constate pas de tendance au réchauffement. Les températures moyennes annuelles varient entre -5 °C et -6,5 °C. Les températures moyennes mensuelles varient davantage mais aucune de ces températures ne dépasse -4 °C (en 1998).

Comme aucune de ces températures moyennes (annuelles ou mensuelles) n'est supérieure à 0 °C (température de fusion de la glace), il est difficilement imaginable qu'un réchauffement soit directement la cause de la disparition d'environ 82 % de la couverture de glace depuis 1912.

Si le manque de précipitations est une des causes de la disparition des neiges éternelles du Kilimandjaro, on doit constater, à son sommet, une diminution des précipitations neigeuses. Le **doc. 3** permet de valider cette conséquence vérifiable : on constate une diminution (en « dents de scie ») d'environ 18 % des précipitations entre 1979 et 2006. Pendant cette même période, on note également une augmentation du nombre annuel de jours très secs : en 1979, une vingtaine de jours très secs ont été mesurés alors qu'ils étaient 80 en 2005 (en 2006, cependant, il n'y a eu qu'une trentaine de jours très secs).

La raréfaction des précipitations neigeuses (et l'augmentation du nombre de jours très secs par an) pourrait donc bien être l'une des causes de la disparition de la calotte glaciaire sommitale du Kilimandjaro.

La troisième cause annoncée du recul des glaciers du Kilimandjaro est la déforestation. Elle pourrait avoir comme conséquence une diminution de l'humidité de l'air et de la fréquence des nuages (du fait de la disparition du phénomène d'évapotranspiration).

Le résultat de la modélisation (**doc. 4**) confirme que la déforestation semble bien avoir un effet sur la fréquence des nuages : on constate, lors de la saison sèche, une diminution pouvant aller jusqu'à 3 % de la fréquence des nuages entre 1 000 et 4 000 mètres d'altitude sur les pentes du Kilimandjaro (cependant, il est important de noter que l'écart-type est important pour de nombreuses valeurs), mais ces variations ne sont plus significatives pour une altitude supérieure à 4 100 mètres. Or, les glaciers du Kilimandjaro sont des glaciers sommitaux : situés à une altitude supérieure à 5 000 mètres. Donc la déforestation ne semble pas être une des causes de la disparition des neiges du Kilimandjaro.

Une seule des trois causes présentées dans le document de presse est validée par les documents scientifiques disponibles : celle de la disparition de la couverture de glace du sommet du Kilimandjaro du fait de la diminution des précipitations.

2 LA TERRE BOULE DE NEIGE

Réponses attendues :

Il y a 730 Ma, la Terre aurait connu un épisode « Boule de neige ». On cherche à comprendre comment la Terre a pu entrer dans une phase de glaciation aussi marquée.

Quelle que soit la disposition des continents on remarque d'après le **doc. 1** que le taux d'altération continentale est d'autant plus important que la latitude est basse. Toutefois, pour une latitude donnée, les continents en position disloquée ont un taux d'altération plus important qu'en position supercontinent. La dislocation du super continent Rodinia initiée il y a 770 Ma, provoque donc une augmentation de l'altération continentale, d'autant plus importante que les petites masses continentales se trouvent sous les tropiques et sont soumises à des pluies abondantes, facteurs d'altération très efficace. Le **doc. 2** montre que l'altération de minéraux comme les pyroxènes, qui sont des silicates, consomme du dioxyde de carbone. Les pyroxènes calciques, abondants dans les basaltes, s'altèrent plus rapidement que les pyroxènes potassiques abondants dans les granites. Comme le granite est une roche caractéristique de la croûte continentale, la dislocation de Rodinia et l'augmentation de l'altération continentale aboutissent à une diminution de la teneur en CO₂ atmosphérique et donc de l'effet de serre. La mise en place de trapps basaltiques peu avant l'événement boule de neige augmente le prélèvement de dioxyde de carbone atmosphérique lors de l'altération continentale.

Les résultats de simulations des températures moyennes (**doc. 1**), entre -800 et -740 Ma, suggèrent que la zone climatique polaire s'est étendue entre -800 et -740 Ma : pour -800 Ma, la tem-

(...)

pérature moyenne annuelle est inférieure à 0 °C aux latitudes comprises entre 60 et 90°. Il y a 740 Ma, la limite d'englacement des océans simulée atteint 40° si l'on ne tient pas compte de la mise en place des trapps, et même 30° si la mise en place des trapps est simulée. Donc, 10 Ma avant l'épisode boule de neige, la glaciation avait probablement déjà bien progressé en direction de l'équateur, sous l'effet conjoint de la dislocation de Rodinia et de la mise en place des trapps, deux événements à l'origine d'une diminution du taux de CO₂ atmosphérique, donc d'une diminution de l'effet de serre.

Entre -740 Ma et -730 Ma, l'extension latitudinale de la glaciation progresse (**doc. 3**) jusqu'à atteindre l'équateur. La phase finale de la glaciation est très rapide (quelques millions d'années). Elle débute lorsque l'englacement atteint 30° de latitude. On peut expliquer cette progression finale de la glaciation par une rétroaction positive liée à l'albédo de la glace : au fur et à mesure que la glaciation progresse, sous l'effet du pompage de CO₂ atmosphérique, l'albédo moyen de la Terre augmente, car de la glace d'albédo élevé remplace des surfaces d'océan liquide de faible albédo. Tant que les zones englacées sont proches des pôles, cela modifie peu le bilan radiatif de la planète. Mais lorsque la glaciation atteint les basses latitudes, qui reçoivent davantage de rayonnement que les pôles, le refroidissement s'emballé : plus il fait froid, plus la glace s'étend, moins l'énergie solaire absorbée est importante, ce qui amplifie le réchauffement. Les simulations suggèrent que, dans les conditions du Cryogénien l'englacement total est inévitable dès lors que la glaciation atteint 30°.

Donc, l'extension des glaces initiée par un refroidissement climatique probablement contrôlé par une diminution de l'effet de serre, amplifie et entretient la glaciation.

③ LA DISPARITION DES PARESSEUX DE SHASTA

Réponses attendues :

Le paresseux terrestre de Shasta est l'un des grands mammifères (**doc. 2**) ayant disparu d'Amérique du Nord 11 500 à 10 000 ans avant notre ère. On s'intéresse aux causes possibles de son extinction.

D'après le **doc. 1**, la mégafaune nord-américaine s'est diversifiée puis est restée diverse jusqu'à l'arrivée d'*Homo sapiens*, vers -15 000 ans. La mégafaune a alors disparu très rapidement. La corrélation entre disparition de la mégafaune et arrivée des populations humaines suggère l'hypothèse suivante : l'arrivée d'*Homo sapiens* pourrait avoir causé la disparition de la mégafaune (peut être du fait de la prédation, par l'Homme, des différentes espèces de cette mégafaune). Pour tester cette hypothèse, on pourrait rechercher si ces animaux faisaient partie du régime alimentaire des hommes (en étudiant des sites archéologiques occupés par ces hommes).

Les **doc. 2 à 4** suggèrent une autre hypothèse : le **doc. 2** nous informe que des excréments fossilisés (coprolithes) de paresseux de Shasta ont été retrouvés. Ils ont été identifiés grâce à de l'ADN qu'ils contenaient (*on peut signaler qu'il s'agit d'ADN mitochondrial, de séquence semblable à celle d'ADN mitochondrial prélevé dans des os du paresseux*). Les coprolithes contiennent également de l'ADN des plantes dont s'est nourri le paresseux. Les résultats de

l'analyse de cet ADN végétal sont donnés au **doc. 3**. Ils permettent d'identifier une partie de la végétation de ces régions (plantes faisant partie du régime alimentaire du paresseux). La mise en parallèle des changements de végétaux consommés par les paresseux (**doc. 3**) et des préférences climatiques de ces végétaux (**doc. 4**) permet de mettre en évidence un changement climatique notable au cours du temps (bien que les plantes non identifiées soient nombreuses). À 28 500 ans BP, la présence de pins et de mûriers indique la capacité d'arbres à trouver des conditions de développement favorables : le climat devait être tempéré, sans doute relativement sec. La présence de poacées, astéracées et chénopodiacées indique que de la steppe occupait déjà ce milieu et donc que la région n'était pas couverte de forêt. À 11 000 ans BP, la répartition des groupes végétaux a totalement changé. Pins et mûriers ont disparu du régime du Paresseux, ce qui traduit probablement la disparition des arbres. Liliales, astéracées et chénopodiacées prouvent que la steppe est devenue très aride. La présence de salicacées (saule et peuplier) et de vignes indique qu'il subsistait néanmoins des points d'eau dispersés dans cette steppe. Les paresseux ont donc disposé d'une alimentation plus pauvre dans la steppe, ils ont éventuellement pu se nourrir dans certaines oasis, mais devaient alors se déplacer d'un point d'eau à l'autre et très certainement entrer en concurrence avec toute la faune herbivore de cette région du désert des Mojaves. Ces données permettent de formuler l'hypothèse suivante : la disparition du paresseux de Shasta pourrait être liée à un changement climatique, les conditions devenant de plus en plus arides.

La mise en évidence des changements alimentaires des Paresseux de Shasta révèle la désertification progressive de cette région du Nevada (désertification qui s'est d'ailleurs accentuée au cours des 10 000 dernières années). Les paresseux pourraient donc avoir disparu en raison de la raréfaction de la nourriture disponible. Aucun argument ne permet de tester la première hypothèse, mais il est tout à fait possible que le comportement de chasseur d'*Homo sapiens* ait contribué à la disparition du paresseux de Shasta.

(Précision sur la méthode d'obtention des données du **doc. 3** : un fragment du gène codant pour la grande sous-unité de la carboxylase ribulose-diphosphate du chloroplaste a été amplifié et plusieurs centaines de clones ont été séquencés. Ce même fragment d'ADN a été séquencé à partir de 99 espèces végétales qui existent actuellement dans les environs de la grotte. La comparaison des séquences d'ADN a permis d'attribuer ces fragments de gènes à des ordres taxonomiques actuels. Treize familles ou ordres de plantes qui faisaient partie de l'alimentation du Paresseux Shasta ont pu être identifiés, montrant que le Paresseux se nourrissait sur certains arbres ainsi qu'à partir d'herbes, en particulier de graminées).

④ UNE TRANSITION CLIMATIQUE ENTRE L'ÉOCÈNE ET L'OLIGOCÈNE

Réponses attendues :

On étudie la répartition latitudinale des roches sédimentaires datant du début de l'Éocène ainsi que de leur contenu fossilifère (**doc. 1**). Les roches sédimentaires, marqueurs de climats arides (évacorites) ou tropicaux (charbons – bauxite et latérites), sont

présentes à l'échelle planétaire, des basses latitudes aux latitudes élevées (> 60° de latitude). Aucune tillite ni bloc isolé datant du début de l'Éocène n'a été retrouvé. Des fossiles de climats chauds ont été découverts jusqu'à plus de 60° de latitude N et S. On peut donc conclure que les aires climatiques tropicales, arides et tempérées chaudes étaient très développées alors que les aires tempérées froides ou polaires étaient extrêmement réduites voire inexistantes. Le climat global au début de l'Éocène était un climat chaud sans glaciation.

Les sédiments détritiques issus de l'érosion de l'antarctique sont pauvres en illite et en chlorite (taux < 20 %) pour ceux qui datent de l'Éocène alors qu'ils sont riches en illite et chlorite (taux > 40 %) pour ceux qui datent de l'Oligocène (**doc 2**). Or, ces minéraux argileux proviennent de l'érosion glaciaire du continent antarctique. Les données sédimentaires suggèrent qu'il n'y avait pas de calotte glaciaire à l'Éocène sur le continent antarctique, et que cette calotte est apparue à l'Oligocène.

La valeur du delta ^{18}O relativement faible à l'Éocène (0,5) et quatre fois plus élevée à l'Oligocène (**doc. 3**). Les mesures du delta ^{18}O ont été faites sur des foraminifères benthiques (soumis à une température quasiment constante) et peuvent être corrélées au volume de glace stocké sur les continents. L'augmentation du delta ^{18}O des foraminifères benthiques nous permet de conclure de la même manière que précédemment sur le développement d'une calotte de glace. Comme les sites de prélèvement semblent être les mêmes, on conclut à nouveau sur des modifications ayant eu lieu dans l'hémisphère sud.

Aucune des données fournies ne concerne les basses latitudes ou d'autres continents que l'Antarctique, pour l'Oligocène. Donc nous ne pouvons conclure sur un changement climatique à l'échelle globale qu'avec de grandes précautions. Si l'on avait accès à la variation du delta ^{18}O des foraminifères planctoniques de sites tropicaux ou de l'hémisphère nord, on aurait pu conclure plus sereinement à un refroidissement climatique d'échelle planétaire.

CHAPITRE 1

Les glucides alimentaires et la glycémie

UNITÉ 1 La diversité des glucides alimentaires

[pp. 152-153 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

Les glucides à grosses molécules des aliments sont transformés en glucose [...].

Conseils et suggestions

– Les nutriments, et notamment les glucides, ont été abordés sous l'angle alimentaire et de manière très succincte au collège (voir p. 148). Les glucides ont pu être évoqués en classe de seconde, comme composants de la matière des êtres vivants. L'unité 1 permet de réinvestir ces connaissances en les approfondissant. Elle apporte notamment une illustration intéressante de la complexité et de l'unité des molécules du vivant et permet d'introduire des notions simples de biochimie (doc. 2, 3 et 5) qui seront utiles aux étudiants qui poursuivront des études dans le domaine des sciences du vivant après le baccalauréat. Il peut d'ailleurs être intéressant de faire le lien avec les notions vues en physique-chimie concernant la matière, les molécules, les modèles moléculaires, etc.

En outre, l'unité permet de réaliser des manipulations pratiques relativement simples à mettre en œuvre (doc. 1 et 4), qui pourront être mises à profit dans le cadre de l'évaluation des capacités expérimentales. Là encore, il sera intéressant d'établir le lien avec les techniques étudiées en physique-chimie, comme celle de la chromatographie sur couche mince (CCM).

– Sécurité : le rouge congo étant inflammable et toxique, la double coloration de l'amidon et de la cellulose illustrée au doc. 5 ne doit pas être réalisée au lycée. On peut se limiter à la coloration des grains d'amidon à l'eau iodée, et à la localisation de la cellulose pariétale par une méthode moins spécifique (observation au microscope polarisant, coloration au carmino-vert).

Exploitation des documents par les activités

Expérimenter et exploiter des résultats expérimentaux, effectuer une recherche documentaire, organiser des données et les présenter sous forme synthétique.

① Le chromatogramme révèle la présence de deux principaux glucides dans le jus de fruit et dans le soda (taches jaunes obtenues après révélation). Par comparaison avec les témoins, on peut proposer qu'il s'agisse de glucose et de saccharose. On ne peut exclure la présence

de fructose, dont la tache témoin se situe à peine plus bas que celle correspondant au glucose. *(Ce type de chromatographie peut être réalisé avec d'autres solutions témoins et d'autres boissons (lait écrémé, autres jus de fruits, boisson énergétique, soda light, etc.).*

② $C_6H_{12}O_6$ (glucose, fructose, galactose), $C_5H_{10}O_5$ (ribose), formule générale $C_nH_{2n}O_n$.

Glucose : « carburant » universel des cellules, il est présent dans de nombreux aliments, notamment les fruits et les aliments sucrés industriels (la liste des ingrédients mentionne fréquemment du sirop de glucose ou du sirop de glucose-fructose) ; Galactose : présent dans le lait sous forme de lactose ; Fructose : abondant dans les fruits, le miel ; Ribose : constituant de l'acide ribonucléique (ARN) ; Saccharose : sucre de table, abondant dans la canne à sucre et la betterave sucrière ; Maltose : « sucre de malt » (grains d'orge en germination) ; Lactose : naturellement présent dans le lait des mammifères.

③ Après 45 minutes d'incubation, du glucose est présent (test à la liqueur de Fehling positif) dans le cristalliseur B, mais pas d'amidon (test à l'eau iodée négatif). Seul le glucose a donc pu franchir la membrane de cellophane. Compte tenu des propriétés de cette dernière (pores nanométriques ne laissant passer que les molécules de masse inférieure à 10 000 Da), on peut conclure que la molécule de glucose (moins de 10 000 Da) est plus petite que la molécule d'amidon (plus de 10 000 Da). *(On pourra préciser que le glucose a une masse moléculaire de 180 Da, ou faire calculer cette masse à partir de la définition du Dalton p. 218 ; puis on pourra indiquer que l'amidon a une masse moléculaire de l'ordre du million de Da).*

④ L'amidon, en tant que macromolécule formée de très nombreuses unités glucose reliées entre elles, permet de stocker une grande quantité de molécules de glucose sous la forme d'un petit nombre de molécules d'amidon *(on pourra éventuellement évoquer ici la notion d'osmolarité)*. L'hydrolyse de l'amidon alimentaire dans le tube digestif libère des molécules de glucose qui peuvent alors passer dans la circulation sanguine, de manière progressive et soutenue dans le temps. La cellulose, quant à elle, bien que peu digestible par l'homme, joue un rôle fonctionnel en facilitant le transit intestinal.

⑤ **EN CONCLUSION** Voir le bilan de l'unité 1 p. 160, et la partie intitulée « Les glucides alimentaires » dans le schéma essentiel p. 163.

Connaissances du programme

Les glucides à grosses molécules des aliments sont transformés en glucose grâce à l'action d'enzymes digestives. [...] [La digestion n'est pas en elle-même au programme. Elle est simplement l'occasion d'enseigner les notions fondamentales concernant les enzymes.]

Conseils et suggestions

– La notion d'enzyme a été étudiée au collège en cinquième, dans la partie sur la digestion. Des exemples d'enzymes ont été rencontrés ponctuellement dans la suite du cursus, sans que leur nature, leur structure moléculaire, leur rôle et leur modalité d'action aient été abordés en tant que tels. Cette **unité 2** permet de mieux comprendre ce qu'est une enzyme. Elle permet aussi de réinvestir la notion de protéine, vue en 1^{ère} S, en insistant sur la notion de structure spatiale complexe et précise, et en montrant le lien entre cette structure tridimensionnelle, la séquence des acides aminés et la fonction de la protéine (aspect qui sera repris dans l'**unité 3**). Un approfondissement destiné aux élèves poursuivant après le baccalauréat dans le domaine des sciences du vivant pourra justement être proposé vers ce qui détermine la structure spatiale d'une protéine, comme les différents types d'acides aminés et leurs interactions. L'**exercice 5 p. 165** permet d'illustrer cette notion.

– La première partie de l'**unité 2** se fonde sur des activités pratiques (**doc. 1 et 2**) qui pourront être mises à profit lors de l'évaluation des compétences expérimentales.

Au **doc. 1**, le protocole est fourni, ce qui permet, la semaine suivante (**unité 3**, **doc. 1**), de laisser les élèves concevoir un protocole semblable, comme il peut être demandé à l'épreuve d'ECE. La manipulation peut être déclinée de bien d'autres manières : par exemple, elle peut permettre de comparer une catalyse enzymatique avec une catalyse chimique (en milieu acide, à chaud), d'étudier plus finement les conditions d'action de l'amylase en mettant en œuvre une gamme plus précise de températures, etc.

– Pour la réalisation de l'expérience du **doc. 2**, un protocole d'obtention de la gamme de tampons phosphate-citrate est proposé sur le site de l'académie de Toulouse : pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/labo/recette/tampon.html. Il convient de vérifier et d'ajuster le pH final à l'aide d'un pH-mètre électronique. L'expérience peut être intéressante à filmer, la décoloration des tubes à pH 6 ou 7 étant bien visible et démonstrative (et par ailleurs rapide, moins de 2 minutes dans les conditions décrites).

– Un modèle d'amylase semblable à celui du **doc. 3** peut être obtenu par les élèves, à l'occasion d'une activité informatique utilisant une base de données (Protein Data Bank, www.rcsb.org/pdb/home/home.do) et un logiciel de manipulation de fichiers de molécules au format pdb (avec Rastop par exemple). On pourra travailler par exemple sur l'amylase pancréatique de porc (référence 1PPI dans la base de données), ou sur l'amylase pancréatique humaine (référence 3BAJ). Une démonstration Rastop est proposée en complément pédagogique sur le Lib'.

Exploitation des documents par les activités

Mener une démarche expérimentale, raisonner, réaliser un schéma
Un bilan illustré est proposé **p. 160** (Bilan de l'**unité 2**). Nous donnons ici des éléments d'exploitation des documents, en respectant la logique de l'aide associée à la tâche complexe.

Effet de l'amylase sur l'hydrolyse de l'amidon et conditions de son action

DOC. 1 L'amidon est présent dans de nombreux aliments, notamment les féculents (pomme de terre, riz, pâtes, etc.). Son hydrolyse lors de la digestion est un préalable indispensable à l'absorption intestinale des glucides simples (glucose) dont il est formé. L'expérience décrite au **doc. 1** permet d'étudier *in vitro* les conditions de cette hydrolyse. On utilise deux tests pour mettre en évidence l'hydrolyse de l'amidon : un test à l'eau iodée, positif s'il reste tout ou partie de l'amidon initialement présent dans le milieu de réaction, et un test à la liqueur de Fehling, positif si des glucides réducteurs tels que le glucose, le maltose ou des dextrines, produits de l'hydrolyse de l'amidon, sont apparus dans ce milieu.

Les tubes 2, 4 et 6 contiennent initialement une solution d'amidon et de l'eau distillée. Ils sont incubés 15 minutes à 37 °C (température à laquelle s'effectue la digestion *in vivo*), 0 °C et 95 °C respectivement. On constate que, dans ces tubes, l'amidon est toujours présent après 15 minutes (tests à l'eau iodée positifs), et qu'il n'est pas apparu de produits d'hydrolyse (tests à la liqueur de Fehling négatifs). Il n'y a donc pas eu d'hydrolyse notable de l'amidon. Autrement dit, l'amidon est une molécule assez stable, qui ne s'hydrolyse pas spontanément, en tout cas pas de façon détectable dans le temps de l'expérience.

Dans les tubes 1, 3 et 5, l'eau distillée est remplacée par une solution d'amylase, molécule présente dans les sécrétions salivaires. À 37 °C (tube 1), on constate à la fois une disparition progressive de l'amidon (test à l'eau iodée négatif après 15 minutes d'incubation), et une apparition de glucides réducteurs (test à la liqueur de Fehling positif). La seule différence entre les tubes 1 et 2 étant la présence ou non d'amylase, on peut en déduire que l'amylase permet, à 37 °C, l'hydrolyse de l'amidon. En revanche, à 0 °C (tube 3) et à 95 °C (tube 5), l'hydrolyse n'a pas lieu. (on peut signaler que l'amylase n'est pas seulement active à 37 °C exactement, mais dans une gamme de températures autour de 37 °C).

En conclusion, l'amylase permet l'hydrolyse de l'amidon, autour de 37 °C.

DOC. 2 *In vivo*, l'amylase présente dans la salive rencontre des conditions de pH variables (pH proche de la neutralité dans la bouche, puis pH acide dans l'estomac). On cherche à tester l'influence du pH sur l'activité de l'amylase. Pour cela, on colore une solution d'amidon à l'eau iodée (très diluée), et on impose dans différents tubes à essais des pH allant de 2 à 7, et une température de 35 °C (favorable à l'action de l'amylase). On constate une décoloration rapide à pH 7, et pH 6 ce qui témoigne d'une hydrolyse. À pH 5, l'hydrolyse

est plus lente, et elle n'est pas détectable à pH 4, 3 et 2 (*prévoir en classe une batterie de tubes témoins sans amylase*).

En conclusion, l'amylase permet l'hydrolyse de l'amidon à un pH proche de celui de la cavité buccale, mais pas au pH acide de l'estomac (les pH basiques n'ont pas été testés dans l'expérience, on peut signaler qu'ils ne sont pas favorables à l'activité de l'amylase).

L'amylase, une enzyme digestive

Reprenons dans l'interview du biochimiste Vincent Rioux les principaux éléments de définition d'une enzyme, et vérifions si l'amylase salivaire répond à cette définition :

– « Les enzymes sont généralement de nature protéique » : le **doc. 3** montre que l'amylase salivaire est une molécule constituée d'une chaîne de 495 acides aminés, repliée en une structure globulaire. Il s'agit donc bien d'une protéine.

– Les enzymes « sont des catalyseurs », capables « d'accélérer des réactions chimiques sans apparaître dans leur bilan » : l'expérience du **doc. 1** (comparaison du tube 1 et du tube témoin 2) a bien montré que l'hydrolyse de l'amidon est plus rapide en présence d'amylase qu'en son absence. Le **doc. 3** montre de plus qu'elle peut prendre en charge l'amidon (son substrat), au niveau d'une cavité (le site actif).

Il existe une remarquable complémentarité de forme entre ce site actif et le substrat. L'hydrolyse de l'amidon est effectuée lorsque l'amidon est associé à l'amylase au niveau du site actif. L'amylase n'agit donc pas à distance, mais en s'associant de façon intime à son substrat. On peut argumenter que l'amylase n'intervient pas dans le bilan de cette hydrolyse en constatant que, dans les conditions de l'expérience du **doc. 2**, les molécules d'amylase sont en large sous-effectif par rapport au nombre de liaisons à hydrolyser (d'un facteur 1 000 environ). Chaque molécule d'amylase a donc dû servir de nombreuses fois pour faire disparaître l'amidon, ce qui suppose que l'amylase n'apparaît pas dans le bilan de l'hydrolyse.

– « Les enzymes ont la particularité d'être efficaces dans des conditions de pH et de température compatibles avec l'intégrité des structures biologiques » : les expériences des **doc. 1** et **2** ont effectivement montré que l'amylase est active autour de 37 °C et à un pH proche de la neutralité.

L'amylase salivaire, active dans la bouche, inactive dans l'estomac

La représentation de la structure de l'amylase salivaire dans la bouche puis dans l'estomac peut s'inspirer de celle du bilan de l'**unité 2**, p. 160.

UNITÉ 3 La spécificité des enzymes digestives

[pp. 156-157 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

Les enzymes sont des protéines qui agissent de manière spécifique en catalysant les transformations chimiques (ici celles de la digestion).

Conseils et suggestions

– L'**unité 3** permet de mettre en évidence un aspect particulièrement important de la catalyse enzymatique : la notion de double spécificité enzymatique, c'est-à-dire spécificité de substrat et d'action. La première pourra être mise en évidence de manière expérimentale, la deuxième est apportée à partir de l'étude d'un document.

– L'accent est mis sur l'influence de la structure spatiale de l'enzyme sur son activité (déjà évoquée dans l'**unité 2**) et, partant, de l'importance de sa séquence peptidique. Les **documents 4** et **5** permettent de réinvestir la notion de mutation étudiée en 1^{ère} S et d'apporter un éclairage nouveau en illustrant de manière précise l'effet d'une mutation faux sens sur la fonction de la protéine mutée, et donc sur le phénotype à l'échelle moléculaire. Cet éclairage peut d'ailleurs être intéressant à replacer dans une perspective évolutionniste, en montrant bien que la mutation d'une enzyme peut faire émerger une nouvelle fonction chez cette dernière.

– L'activité proposée au **doc. 1** est une activité expérimentale très complète qui pourra faire l'objet d'une séance de travaux pratiques évaluée. Le protocole à concevoir est très similaire à celui du **doc. 1 p. 154**, ce qui permet de s'assurer que les principes de conception d'un protocole de ce type ont bien été acquis. L'activité peut d'ailleurs être déclinée avec d'autres enzymes digestives et d'autres substrats. Une alternative intéressante – mais l'enzyme n'est pas digestive –

est l'étude ExAO de la spécificité de la glucose-oxydase (voir l'**exercice 1** « objectif BAC » p. 204).

Exploitation des documents par les activités

Concevoir un protocole expérimental et le mettre en œuvre, mettre en relation des informations, tester une hypothèse.

① L'expérience du **doc. 1** montre que l'enzyme E1 permet l'hydrolyse du saccharose mais pas celle du lactose, et inversement pour l'enzyme E2. Or, le saccharose et le lactose sont deux disaccharides de même formule chimique brute (le 1^{er} formé d'une molécule de glucose et d'une molécule de fructose, le 2^{ème} d'une molécule de glucose et d'une molécule de galactose, voir **doc. 3 p. 152**) et de structure spatiale similaire. Les deux enzymes testées ont donc la capacité de discriminer des molécules très semblables. Cette expérience illustre donc un aspect fondamental de la catalyse enzymatique, à savoir qu'une enzyme donnée n'agit que sur un substrat précis. On parle de spécificité de substrat. (*On peut signaler que la spécificité n'est pas aussi stricte que le suggère l'exemple choisi. Par exemple, la saccharase humaine a aussi une activité isomaltase*). En s'inspirant du nom de l'amylase, qui catalyse l'hydrolyse de l'amylose (une forme d'amidon), on peut proposer pour E1 le nom de « saccharase » et pour E2 celui de « lactase ».

② Les deux enzymes ont des structures spatiales complexes et assez proches (**doc. 2**, comparer la position des structures en feuillets et en hélices). Comme elles catalysent l'hydrolyse du lactose ou du

(...)

saccharose, elles appartiennent à la catégorie des hydrolases (**doc. 3**). Les catégories utilisées dans la classification des enzymes regroupent des enzymes catalysant des types de réactions précis. Cela met en évidence le deuxième aspect fondamental de la catalyse enzymatique, à savoir qu'une enzyme donnée ne catalyse qu'un type de réaction précis. On parle de spécificité d'action.

③ Le **doc. 4** présente un modèle moléculaire avec le substrat de l'amylase (on peut signaler qu'il s'agit en fait d'un analogue de substrat, l'acarbose, et expliquer l'intérêt d'utiliser un analogue) en place dans le site actif de l'enzyme. Les acides aminés ayant un rôle catalytique sont à proximité immédiate de la liaison chimique à hydrolyser. Or, ces acides aminés, ASP197, GLU233 et ASP300, ne sont pas particulièrement proches les uns des autres le long de la chaîne d'acides aminés. C'est le repliement de cette chaîne qui les rapproche au niveau du site actif. Ce document met donc en lumière l'importance de la structure spatiale de l'enzyme, et

notamment comment cette structure spatiale permet l'aménagement d'un site actif dans lequel le substrat est à proximité d'acides aminés bien précis ayant une fonction catalytique.

④ Le **doc. 5B** nous montre l'amidon en place dans le site actif d'une enzyme bactérienne, la CGTase. Deux acides aminés du site actif, les phénylalanines 183 et 259, sont particulièrement proches du substrat. Le **doc. 5C** montre que par rapport à une CGTase non mutée, la substitution de l'une ou l'autre ou de ces deux phénylalanines entraîne une diminution de l'activité de formation de cyclo-dextrines, et accroît l'activité d'hydrolyse de l'amidon. En quelque sorte, les CGTases mutées sont « transformées » en amylases. Ces expériences de mutagenèse dirigée montrent donc que la spécificité d'action d'une enzyme donnée est intimement liée à la structure et à la composition en acides aminés de son site actif.

⑤ **EN CONCLUSION.** Voir le bilan de l'unité 3 p. 161.

UNITÉ 4 Le devenir des nutriments glucidiques et la glycémie

[pp. 158-159 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

La glycémie est un paramètre du milieu intérieur. Son maintien par l'organisme dans une gamme de valeurs étroite est un signe et une condition de bonne santé.

Conseils et suggestions

– Cette unité assure une transition intéressante entre le **chapitre 1**, plutôt axé sur des connaissances biochimiques, et le **chapitre 2** plus centré sur la physiologie. Elle permet d'introduire un organe dont on verra par la suite le rôle central, le foie (**doc. 2 et 5**). De plus, elle replace le chapitre dans une perspective d'éducation à la santé, en soulignant l'importance de la glycémie en tant que paramètre de biologie médicale à surveiller (**doc. 3 et 4**). Sur le plan méthodologique, elle permet de mettre en œuvre une modélisation mathématique simple d'une fonction biologique, et l'exploitation du modèle à l'aide d'un tableur-grapheur (**doc. 1**). Un fichier de correction du travail à réaliser sous tableur-grapheur est fourni en complément pédagogique sur le Lib'.

Exploitation des documents par les activités

Réaliser et exploiter une modélisation numérique, formuler une hypothèse et la tester, croiser des données et des résultats expérimentaux, rédiger une courte synthèse.

① Le **doc. 1** montre que la concentration sanguine de glucides (principalement du glucose, mais aussi d'autres oses comme le fructose) fluctue légèrement dans une fourchette étroite de valeurs au cours de la journée : entre 0,8 et 1,2 g.L⁻¹, pour une valeur moyenne de l'ordre de 0,9 g.L⁻¹. Elle augmente pendant 1 à 2 heures après chaque repas et diminue légèrement lors des phases d'activité physique. Enfin, la période de repos et de jeûne nocturne ne semble pas l'affecter outre mesure.

② Le taux de glucides circulants modélisé varie au cours de la journée dans une fourchette beaucoup plus large (entre 0 et 13 g.L⁻¹ !) que le taux effectivement mesuré (voir graphique du **bilan de l'unité 4 p. 161**). Cette différence suggère qu'il existe des mécanismes de régulation dans l'organisme, qui amortissent les fluctuations de ce taux liées à l'intermittence des apports alimentaires de glucides et aux variations de la consommation cellulaire de glucides.

③ On observe sur l'image obtenue par PET scan (**doc. 2**) que de nombreux organes peuvent prendre en charge rapidement le glucose après son entrée dans la circulation sanguine. Pour certains organes comme le cerveau, cette prise en charge est essentiellement pour une consommation immédiate. Pour d'autres organes comme le foie ou les muscles, cette prise en charge est principalement destinée à une mise en réserve. Ainsi, on comprend qu'une mise en réserve des nutriments glucidiques provenant de la digestion permet d'amortir l'importante augmentation du taux de glucides circulants qui aurait lieu à la suite d'un repas s'il n'y avait pas ce stockage. On peut aussi supposer que les glucides mis en réserve peuvent être redistribués pendant les périodes de jeûne, qui entraîneraient sans ce relargage une baisse importante du taux de glucides circulants.

④ Le glucose est le principal glucide circulant. Sa concentration plasmatique, aussi appelée glycémie, est un paramètre sanguin couramment évalué lors des analyses sanguines (**doc. 3**). La glycémie à jeun doit se trouver dans une fourchette de valeurs étroite pour être considérée comme normale, entre 0,70 et 1,10 g.L⁻¹. Le **doc. 4** montre que les écarts par rapport à ces valeurs normales entraînent des effets délétères pour la santé. L'hypoglycémie a des conséquences immédiates, potentiellement graves en cas de forte hypoglycémie, mais le plus souvent bénignes. Quant à l'hyperglycémie, elle ne pose pas de problème majeur si elle est exceptionnelle, mais lorsqu'elle devient chronique (en cas de diabète), elle est à l'origine de lésions de nombreux organes, et d'une diminution de l'espérance de vie.

5 Le résultat obtenu (**doc. 5**) montre que l'eau iodée a pris une teinte brun acajou au contact du composé extrait du tissu hépatique, comme dans le tube témoin n° 3. La forme de stockage hépatique du glucose est donc le glycogène, et non pas l'amidon comme dans la plupart des tissus végétaux.

6 **EN CONCLUSION.** Voir le bilan de l'unité 4 p. 161.

CHAPITRE 2 La régulation de la glycémie

La notion d'homéostasie a déjà été abordée à plusieurs occasions dans le parcours des élèves : nécessité d'apport de nutriments et excrétion des déchets en cinquième, régulation des taux d'hormones sexuelles en quatrième et première, régulation de la pression artérielle en seconde. Les moyens de communication au sein de l'organisme sont donc connus (communication nerveuse et hormonale). Par ailleurs, les élèves ont étudié le rôle important du glucose dans la couverture des besoins en énergie. Ils l'ont découvert en cinquième,

réinvesti en seconde et approfondi en terminale dans le **thème 1** et dans le **chapitre 1** du **thème 3**.

Il s'agit dans ce chapitre de comprendre comment s'effectue le maintien d'une glycémie à peu près constante malgré des apports de glucose discontinus et une consommation variable au cours du temps. On pourra faire de ce paradoxe apparent un problème que l'on cherchera à résoudre.

UNITÉ 1

Mise en évidence de la fonction hormonale du pancréas

[pp. 170-171 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

La régulation de la glycémie repose notamment sur les hormones pancréatiques : insuline et glucagon.

Conseils et suggestions

– La première unité a un triple objectif pour l'élève : (i) se représenter l'organisation anatomique du pancréas à travers la série de "zoom" du **doc. 2**. (ii) comprendre la démarche expérimentale utilisée en endocrinologie, qui est résumée dans le **doc. 3**. (iii) replacer dans son contexte historique la découverte du rôle du pancréas dans la régulation de la glycémie (**doc. 1, 4 et 5**).

– On pourra signaler, soit ici, soit dans le chapitre 3 consacré au diabète, que la purification de l'insuline est à l'origine du premier traitement du DT1 : en effet, dès décembre 1921, Banting et Best ont administré de l'insuline à Leonard Thompson, jeune diabétique de 14 ans au seuil de la mort, démontrant qu'il était désormais possible de vivre avec le diabète. Radio Canada propose dans ses archives un dossier sur le diabète, dont l'un des clips audio retrace l'histoire de la découverte de l'insuline : archives.radio-canada.ca/sante/maladies/dossiers/788/

– Concernant l'expérience de Mering et Minkowski, on peut insister sur le fait qu'elle met en évidence, non pas l'hyperglycémie, mais ses conséquences : la glycosurie, liée au caractère saturable de la réabsorption de glucose présent dans l'urine primitive, et la polyurie, due à des phénomènes d'osmose.

– Le questionnement est formulé dans l'esprit de l'exercice d'analyse de documents du baccalauréat : les élèves sont invités à mettre

en relation les différents documents pour répondre à une question et résoudre un problème scientifique. Ils peuvent construire leur démarche en s'appuyant sur les suggestions du paragraphe « Un peu d'aide ».

Exploitation des documents par les activités

Recenser, extraire et exploiter des informations afin de comprendre la démarche expérimentale en endocrinologie et de mettre en évidence la fonction endocrine du pancréas. Effectuer un geste technique en observant une coupe de pancréas au microscope, afin de comprendre l'organisation anatomo-fonctionnelle de cet organe.

Des hypothèses pour expliquer l'hyperglycémie consécutive à l'ablation du pancréas

La première expérience historique abordée (**doc. 1**, Mering et Minkowski, 1890) consiste en une ablation totale du pancréas chez le chien. Cette ablation a pour conséquence une abondante production d'urine (polyurie) contenant du glucose (glycosurie). (*Mering et Minkowski reconnaissent là les symptômes d'une maladie d'origine inconnue, le diabète*). L'état général du chien pancréatectomisé se détériore (amaigrissement, affaiblissement), puis l'animal meurt après un mois. Certains symptômes (polyurie, glycosurie) sont des conséquences d'une forte hyperglycémie. Le pancréas a donc, en plus de son rôle digestif (connu depuis la classe de cinquième), un rôle dans le métabolisme du glucose. (*On peut illustrer le caractère*

(...)

parfois fortuit de la recherche scientifique : Mering et Minkowski, qui s'intéressaient au rôle des enzymes digestives sécrétées par le pancréas, mettent en évidence sans le vouloir une fonction du pancréas inconnue auparavant).

Plusieurs hypothèses sont susceptibles d'expliquer l'hyperglycémie consécutive à l'ablation du pancréas :

- soit le pancréas consomme ou stocke beaucoup de glucose,
- soit il commande son stockage ou sa consommation par d'autres organes. Dans ce cas, la commande peut être nerveuse ou hormonale.

Le pancréas est un organe constitué de deux tissus (**doc. 2**), d'apparence distincte en microscopie optique. Le tissu majoritaire (acini pancréatiques) produit des enzymes digestives. Dès 1900, des anomalies du tissu minoritaire (îlots de Langerhans) ont été identifiées chez des individus diabétiques.

L'hyperglycémie observée suite à une pancréatectomie résulte donc probablement de l'absence des îlots de Langerhans. Les îlots de Langerhans sont richement irrigués et innervés, ce qui est compatible à la fois avec l'hypothèse d'une commande hormonale et avec celle d'une commande nerveuse de la régulation de la glycémie. Leur faible masse suggère qu'ils ne sont pas un important lieu de stockage de glucose.

Des expériences permettant de tester les hypothèses

Pour tester les différentes hypothèses sur le rôle du pancréas on pourra reconnaître dans les expériences historiques rapportées, différentes étapes de la démarche exposée dans le **doc. 3**, à savoir : ablation (expérience de Mering et Minkowski, puis de Hédon), greffe (expérience de Hédon), injection (expérience de Banting et Best).

Supposons que le pancréas contrôle la glycémie par une commande hormonale ou nerveuse (en excluant pour le moment l'hypothèse d'une consommation et d'un stockage). Si la commande est hormonale, on s'attend à ce que, chez un animal pancréatectomisé, une greffe ou une transplantation d'un pancréas corrige l'hyperglycémie. En effet, le pancréas greffé/transplanté sécréterait alors l'hormone, qui pourrait agir sur ses tissus cibles après transport sanguin. Inversement, si la commande est nerveuse, la greffe ou la transplantation d'un pancréas ne doivent pas corriger l'hyperglycémie, car l'organe greffé/transplanté n'a pas de connexions nerveuses avec le reste du corps. (*On peut signaler que dans certains cas, commande nerveuse et hormonale coexistent. C'est l'objet de l'exercice « Esprit critique » 8 p. 185.*)

L'expérience de Hédon fournit les résultats d'une transplantation de pancréas chez un chien pancréatectomisé. On constate que la glycémie, de l'ordre de 4 g.L^{-1} avant la transplantation (hyperglycémie), diminue pour atteindre environ 1 g.L^{-1} (normoglycémie) 3 heures après la transplantation. La glycémie conserve cette valeur de l'ordre de 1 g.L^{-1} jusqu'à suppression du pancréas. La glycémie remonte alors rapidement, et reprend la valeur de 4 g.L^{-1} , tandis qu'apparaît une glycosurie. Ces résultats permettent d'exclure une commande nerveuse, et sont compatibles avec une commande hormonale. L'expérience de Banting et Best (1921) montre que des extraits de pancréas, c'est-à-dire des substances qui y sont présentes, sont capables d'agir par voie sanguine et de faire baisser la glycémie. Il ne peut donc s'agir de la part du pancréas ni de consommation ni de stockage du glucose mais d'une commande à distance (contrôle hormonal de la glycémie). L'hormone est isolée dès 1923. Il s'agit d'une protéine baptisée insuline, dont l'effet est hypoglycémiant.

UNITÉ 2 Les hormones pancréatiques

[pp. 172-173 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

La régulation de la glycémie repose notamment sur les hormones pancréatiques : insuline et glucagon.

Conseils et suggestions

L'unité précédente a permis de mettre en évidence une participation du pancréas à la régulation de la glycémie, et d'identifier une hormone pancréatique hypoglycémiante, l'insuline.

Dans l'unité 2, on montre l'existence d'une autre hormone pancréatique, le glucagon, puis on étudie les deux hormones et les modalités de leur sécrétion par le pancréas.

Le **doc. 1** explique comment une observation fine des effets de l'injection d'extraits pancréatiques a conduit à la découverte du glucagon. Le **doc. 2** présente les deux hormones insuline et glucagon. Les fichiers de molécules ayant servi à construire les modèles moléculaires ont pour références 1TRZ (insuline) et 1GCN (glucagon) dans la Protein Data Bank (www.rcsb.org). L'antagonisme entre les deux hormones peut être rapidement établi à l'aide du **doc. 3**,

qui représente leurs effets sur la glycémie. Le **doc. 4** montre que les îlots de Langerhans, déjà identifiés comme responsables de la libération d'insuline, possèdent deux populations de cellules : β au centre qui synthétisent l'insuline et α en périphérie qui synthétisent le glucagon. La technique d'immunofluorescence utilisée permet de réinvestir des connaissances d'immunologie vues en enseignement obligatoire (spécificité des anticorps).

La deuxième partie de l'unité permet de comprendre comment est contrôlée la libération des hormones pancréatiques à plusieurs échelles : de l'organe à l'échelle cellulaire et moléculaire. Au niveau intracellulaire, le **doc. 7** est volontairement simplifié. Un exercice du **chapitre 3 (6 p. 199)** sur le « diabète du bébé » permet de préciser la chaîne de causalité qui lie l'augmentation de la concentration intracellulaire d'ATP consécutive à l'hyperglycémie et l'exocytose de granule d'insuline. Dans les cellules α , la sécrétion de glucagon fonctionne sur un modèle semblable, mais elle est inhibée par le glucose lorsqu'il atteint une concentration d'environ $0,54 \text{ g/L}$ et par l'insuline (action paracrine).

Exploitation des documents par les activités

Exploiter des résultats d'expériences historiques pour établir le rôle de l'insuline et du glucagon. Interpréter une coupe histologique immunomarquée. Recenser, extraire et exploiter des informations pour comprendre une voie d'activation intracellulaire (contrôle de la sécrétion d'insuline).

❶ Une ablation du pancréas se traduit pas une hyperglycémie. Comme démontré par Banting et Best, cet effet s'explique par l'absence de sécrétion d'une hormone hypoglycémisante, l'insuline. Toutefois, un extrait pancréatique (mélange de nombreuses molécules, non purifié) peut avoir un court effet hyperglycémiant, avant que se manifeste son effet hypoglycémiant (**doc. 1**). Cette observation a conduit à suspecter dès 1923 l'existence d'une autre hormone pancréatique que l'insuline. L'alloxane, poison dont la prise déclenche un diabète, a permis de confirmer cette hypothèse. En prélevant le pancréas d'animaux traités à l'alloxane, on a pu préparer des extraits pancréatiques sans insuline (les cellules sécrétrices d'insuline ayant été détruites), ayant un fort effet hyperglycémiant, puis isoler une hormone hyperglycémisante, le glucagon.

L'insuline et le glucagon sont deux hormones de nature peptidique (**doc. 2**, à compléter éventuellement par la résolution de l'**exercice 5 p. 183**). L'injection d'insuline provoque une baisse de la glycémie et l'injection de glucagon augmente la glycémie (**doc. 3**). L'insuline a donc un effet hypoglycémiant et le glucagon un effet hyperglycémiant. On dit que ces deux hormones sont antagonistes. L'utilisation d'anticorps marqués (**doc. 4**) permet de repérer les cellules produisant l'insuline et le glucagon. Les anticorps anti-insuline associés à un composé vert marquent les cellules du centre des îlots de Langerhans. Ces cellules, appelées cellules β , synthétisent donc l'insuline. Les anticorps anti-glucagon associés à un composé rouge marquent les cellules de la périphérie des îlots. Ces cellules, appelées cellules α , synthétisent donc le glucagon. Les deux hormones antagonistes sont ainsi produites par des populations de cellules endocrines distinctes, toutes deux localisées dans les îlots de Langerhans du pancréas.

❷ Suite à un repas riche en glucides (**doc. 5**), la glycémie augmente. Dans le même temps, l'insulinémie, très faible avant le repas, augmente fortement, et la glucagonémie, élevée avant le repas,

diminue légèrement. Le pancréas adapte donc la sécrétion d'hormones à la glycémie, d'une façon propre à corriger l'hyperglycémie post-prandiale. En travaillant sur des îlots de Langerhans isolés (**doc. 6**), on peut montrer que ces îlots sont directement sensibles à la glycémie : la sécrétion de glucagon (par unité de temps et par îlot) est d'autant plus élevée que la concentration de glucose est faible, alors que la sécrétion d'insuline est d'autant plus élevée que la concentration de glucose est élevée. La sécrétion d'hormone hypoglycémisante est ainsi activée par l'hyperglycémie, alors que la sécrétion d'hormone hyperglycémisante est activée par l'hypoglycémie, ce qui tend à ramener la glycémie à une valeur normale. La demi-vie des hormones pancréatiques est courte, de l'ordre de 5 minutes. Il n'y a donc pas de mémoire durable des sécrétions antérieures : à tout moment, la concentration plasmatique des deux hormones reflète la glycémie instantanée. Le système hormonal de régulation de la glycémie est donc très réactif.

❸ Le **doc. 7** résume le lien de causalité entre hyperglycémie et sécrétion d'insuline par les cellules β . Le glucose pénètre dans ces cellules par des transporteurs membranaires (GLUT-2), puis il est métabolisé par la voie de la respiration cellulaire (glycolyse + respiration mitochondriale). Cette dégradation du glucose est couplée à une importante synthèse d'ATP. En conséquence, une augmentation de la glycémie se traduit par une augmentation de la concentration intracellulaire d'ATP dans les cellules β . Selon des modalités non décrites, cette augmentation déclenche la fusion de granules contenant l'insuline avec la membrane plasmique, donc la libération d'insuline dans le milieu extracellulaire, d'où elle diffuse jusqu'au sang.

Si le glucose est bien une molécule transportée par le sang et qui provoque une réponse sur des cellules (α et β), il n'est pas produit par un autre type cellulaire de type endocrine et il ne se fixe pas sur des récepteurs spécifiques membranaires ou cytoplasmiques. Il ne peut donc pas être considéré comme une hormone. De plus, en tant que nutriment, il est présent dans le sang en quantité bien plus importante que les hormones (1 g/L pour le glucose au lieu de quelques mg/L voire ng/L selon les hormones).

❹ Le pancréas endocrine est capable de réagir aux variations de glycémie en libérant de l'insuline lors des périodes d'hyperglycémie et du glucagon en période d'hypoglycémie.

UNITÉ 3

L'action des hormones pancréatiques sur les cellules cibles

[pp. 174-175 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

- La glycémie est un paramètre du milieu intérieur. Son maintien par l'organisme dans une gamme de valeurs étroite est un indicateur et une condition de bonne santé.
- La régulation de la glycémie repose notamment sur les hormones pancréatiques : insuline et glucagon.

Conseils et suggestions

- Dans l'**unité 2**, les élèves ont établi que le pancréas sécrète deux hormones aux effets antagonistes, l'insuline et le glucagon. L'**unité 3** aborde leurs effets, au niveau de certains organes, jusqu'à l'échelle cellulaire.

– Les **doc. 1 à 4** permettent d'étudier un effecteur de la régulation de la glycémie : le foie. Le **doc. 1** montre que cet organe peut stocker le glucose absorbé au niveau intestinal avant qu'il ne se dilue dans la circulation générale. Ce stockage «à la source» limite considérablement l'hyperglycémie post-prandiale. En période de jeûne, le foie peut restituer le glucose préalablement stocké, ce qui évite l'hypoglycémie à distance des repas. Le foie joue donc un rôle tampon dans la régulation de la glycémie. *(On peut présenter rapidement les multiples rôles du foie, dont chacun connaît le nom et l'importance vitale, mais très peu les fonctions. Il intervient dans la digestion (fabrication de la bile), le métabolisme des glucides, des lipides, des protéines (convertit l'ammoniac en urée), l'excrétion (excrète la bilirubine), ou encore la détoxification).* Le texte de Claude Bernard (**doc. 2**), résume son expérience historique du foie lavé (que l'on pourra mener en classe) et montre que Claude Bernard a proposé un programme de recherche pour identifier la nature de la molécule qui "se change en sucre", le glycogène. Les élèves pourront ainsi comprendre que si le foie stocke effectivement du glucose, c'est sous une forme différente, non soluble. Les expériences d'injection d'insuline et de glucagon (**doc. 3 et 4**), permettent de faire le lien entre le pancréas endocrine et le foie en démontrant qu'insuline et glucagon agissent respectivement sur le stockage et le déstockage du glycogène.

– Les élèves savent qu'une hormone agit sur des cellules cibles. Des expériences classiques d'injection d'hormones marquées sont résumées dans le tableau du **doc. 5** et montrent que si l'insuline agit sur la plupart des cellules de l'organisme, le glucagon n'agit que sur les hépatocytes. Par rapport aux années antérieures, on pourra pousser plus loin la compréhension de la communication endocrinienne, jusqu'au niveau intracellulaire. Dans le **doc. 7**, volontairement simplifié, seules certaines actions des hormones pancréatiques sont représentées. Les voies de signalisation intracellulaires de l'insuline et du glucagon sont aujourd'hui bien connues, mais non présentées ici.

Exploitation des documents par les activités

Recenser, extraire et exploiter des informations d'expériences historiques et de graphiques afin de mettre en évidence le stockage du glucose et les effets de l'insuline et du glucagon. Comprendre et interpréter un immunomarquage pour repérer les cellules cibles des hormones pancréatiques.

① En principe, du sang arrive à un organe par une artère et en ressort par une veine, et les organes sont disposés en parallèle dans la circulation générale, si bien que tout organe reçoit du sang en provenance directe des poumons, via le cœur gauche. Or, dans le foie, du sang arrive effectivement par une artère dérivant de l'aorte mais aussi, plus étonnamment, par une veine (la veine porte hépatique) qui a déjà irrigué d'autres organes comme le petit et gros intestin (*veines mésentériques supérieure et inférieure*), la rate et le pancréas (*veine splénique*) et l'estomac (*veine gastrique*) puis le sang quitte le foie par une veine (la veine sus-hépatique) en direction de la veine cave et donc du cœur droit.

② Le foie reçoit environ 80 % de son débit sanguin par la veine porte et environ 20 % par l'artère hépatique. Si le foie ne consommait, ne stockait, ni ne libérait de glucose, on s'attendrait à ce que la

glycémie dans l'artère sus-hépatique soit une moyenne (pondérée par les débits relatifs) des glycémies dans la veine porte et l'artère hépatique, comme indiqué dans le tableau suivant (dernière ligne).

Situation physiologique	À jeun	30 minutes après un repas	3 heures après un repas
Glycémie (Ga) mesurée dans l'artère hépatique	1 g.L ⁻¹	1 g.L ⁻¹	1 g.L ⁻¹
Glycémie (Gp) mesurée dans la veine porte hépatique	0,10 g.L ⁻¹	2,85 g.L ⁻¹	0,20 g.L ⁻¹
Glycémie (Gv) mesurée dans la veine sus-hépatique	0,95 g.L ⁻¹	1,25 g.L ⁻¹	0,95 g.L ⁻¹
Glycémie attendue dans la veine sus-hépatique en l'absence de consommation-stockage-déstockage hépatique de glucose : 0,8 Gp + 0,2 Ga	0,28 g.L ⁻¹	2,48 g.L ⁻¹	0,36 g.L ⁻¹

À jeun, la glycémie en aval du foie (veine sus-hépatique) est supérieure (d'un facteur 3) à ce que l'on attendrait par simple mélange des arrivées sanguines. On en déduit que le foie libère du glucose. Trente minutes après un repas, à l'inverse, la glycémie en aval du foie est inférieure (d'un facteur 2) à ce que l'on attendrait. Le foie stocke donc du glucose. Trois heures après un repas, le foie est de nouveau en mode «déstockage». Le bilan hépatique en glucose dépend donc de l'état physiologique (voir **exercice 9 p. 185**).

③ L'expérience du foie lavé (**doc. 2**) prouve que le foie contient une substance peu soluble, capable de se transformer en sucre. Cette substance a été identifiée ultérieurement comme étant un polycondensat de glucose (voir **doc. 5 p. 159**), le glycogène. Le **doc. 3** montre que chez un chien pancréatectomisé (donc en l'absence d'hormones pancréatiques dans son sang), le foie perd peu à peu ses réserves de glycogène (elles sont quasiment épuisées 4 heures après la pancréatectomie). Des injections d'insuline permettent de reconstituer ces réserves. L'insuline commande donc le stockage de glucose au niveau hépatique. Le **doc. 4** montre que l'augmentation de la glycémie suite à une injection de glucagon n'a pas lieu chez un animal à jeun depuis 96 heures (donc ayant consommé ses réserves hépatiques de glycogène). Cela suggère que le tissu hépatique est la principale, voire la seule cible du glucagon. Chez un chien hépatectomisé, non seulement le glucagon n'a pas d'effet hyperglycémiant, mais la glycémie est anormalement basse, et diminue en fonction du temps. La différence entre la glycémie du chien à jeun depuis 96 heures et celle du chien hépatectomisé suggère que le foie a un autre rôle dans la régulation de la glycémie que celui de stocker/déstocker le glycogène (*on peut signaler à cette occasion l'existence de la néoglucogenèse hépatique*).

Les résultats expérimentaux montrent donc que le stockage et le déstockage de glucose dans le foie, sous forme de glycogène, sont contrôlés par les deux hormones pancréatiques. L'insuline favorise le stockage (glycogénogenèse) alors que le glucagon favorise le déstockage (glycogénolyse).

④ Une hormone agit sur ses cellules cibles en se fixant sur des récepteurs. Les cellules cibles ont donc une forte affinité pour l'hormone. En conséquence, on s'attend à ce que, suite à l'injection d'hormone radioactive, la radioactivité se retrouve concentrée dans les tissus cibles. Le **doc. 5** fournit les résultats d'une telle expérience : on constate que l'insuline marquée se lie aux hépatocytes, aux myocytes et aux adipocytes, ainsi, en moindre quantité, qu'à d'autres types cellulaires. En revanche, elle ne se fixe pas aux neurones. Les principales cibles de l'insuline sont donc probablement les cellules du foie, des muscles et du tissu adipeux. Le glucagon, quant à lui, ne se fixe de façon détectable que sur les hépatocytes, ce qui confirme que le tissu hépatique est sa seule cible. Le **doc. 6** confirme ces résultats : les cellules hépatiques, fixent l'insuline et le glucagon au niveau de récepteurs membranaires, mis en évidence ici par immunomarquage. Seuls les hépatocytes sont équipés de récepteurs au glucagon, alors que les récepteurs à l'insuline sont exprimés par de nombreux types cellulaires.

⑤ L'insuline est hypoglycémiant notamment car elle active la glycogène synthétase, donc le stockage de glucose sous forme de glycogène, et car elle inhibe la glucose-6-phosphatase, donc la

dégradation du glycogène. (Ses effets hypoglycémiant sont en réalité multiples : elle augmente l'utilisation du glucose par la glycolyse en stimulant la production des enzymes de la glycolyse, elle augmente la production de triglycérides à partir du glucose dans le foie et les adipocytes en stimulant les enzymes de la lipogenèse, elle active la fabrication du glucose par la néoglucogénèse en inhibant la production des enzymes qui y sont nécessaires).

À l'inverse, le glucagon est hyperglycémiant car il inhibe la glycogène synthétase et active la glycogène phosphorylase. (Par ailleurs, il inhibe la pyruvate kinase, donc la glycolyse, et active la néoglucogénèse, voir **exercice 6 p. 184**).

⑥ Les hormones pancréatiques, insuline et glucagon, ont des effets antagonistes sur la glycémie. L'insuline est hypoglycémiant, ce qui s'explique par la stimulation de l'entrée du glucose dans la plupart des cellules de l'organisme, son utilisation et son stockage sous forme de glycogène dans le foie et les muscles et sous forme de triglycérides dans les adipocytes. Le glucagon est hyperglycémiant, principalement car il stimule le déstockage de glycogène (glycogénolyse) dans les cellules hépatiques.

UNITÉ 4

L'homéostat glycémique, un système de régulation

[pp. 176-177 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

La glycémie est un paramètre du milieu intérieur. Son maintien par l'organisme dans une gamme de valeurs étroite est un indicateur et une condition de bonne santé. La régulation de la glycémie repose notamment sur les hormones pancréatiques : insuline et glucagon.

Conseils et suggestions

– Les unités 1 à 3 ont permis d'identifier les acteurs de la régulation de la glycémie. Cette unité 4 propose de consolider les acquis en construisant un modèle global, reprenant chacun de ces acteurs. L'analogie avec le régulateur de vitesse permet à l'élève d'accéder à la notion d'homéostasie, très importante en physiologie et en médecine et d'aboutir à l'élaboration d'un schéma fonctionnel. Des notions de cybernétique très simples (système réglé, perturbation du système, intervention d'un système réglant, retour à la consigne) sont présentées, généralisables à d'autres systèmes de régulation que l'homéostat glycémique.

– Le logiciel ModSim Glycémie (Jeulin) contient une multitude de données scientifiques sur la glycémie, sa régulation et le diabète, facilement accessibles. Son utilisation peut être intégrée à différents niveaux du cours, de la situation déclenchante à la construction d'un schéma bilan dynamique. Il permet de construire une démarche de modélisation complète, et de montrer l'intérêt de la modélisation en science. Un modèle sous-jacent permet d'utiliser le logiciel comme outil de simulation et prévision, ce qui peut par exemple servir à constater une anomalie chez un patient. Le logiciel peut servir d'outil d'éducation à la santé.

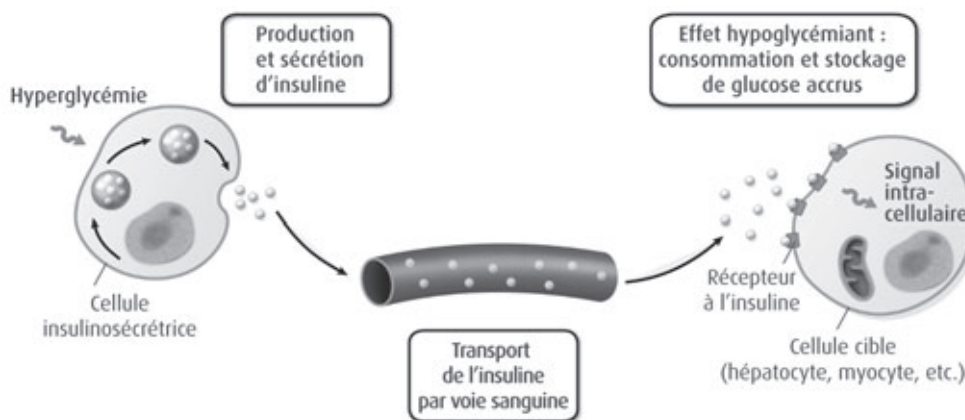
Exploitation des documents par les activités

Élaborer et réaliser un schéma fonctionnel. Utiliser un logiciel pour simuler ou modéliser numériquement la régulation de la glycémie.

① La loi et les conditions de route imposent au conducteur une valeur de vitesse, dite vitesse de consigne, par exemple 90 km/h. De même, la bonne santé d'un individu impose une valeur de glycémie, dite glycémie de consigne, par exemple 0,9 g/L. Les paramètres de l'environnement tels que l'inclinaison de la route ou le vent tendent à faire augmenter ou diminuer la vitesse de la voiture, tout comme la prise de nourriture ou l'activité physique tendent à faire augmenter (apport) ou baisser (consommation de glucose) la glycémie. Le capteur de vitesse de la voiture mesure les variations et compare la vitesse réelle à la valeur de consigne. Là aussi, les capteurs de glycémie de l'organisme, les cellules des îlots de Langerhans, mesurent ces variations et « comparent » la glycémie réelle à la valeur consigne. L'unité de contrôle du moteur agit alors en conséquence sur le régime moteur en le faisant accélérer ou ralentir. La voiture revient alors à la vitesse de consigne. Dans l'organisme, les cellules α et β agissent alors en conséquence sur la glycémie en favorisant la libération ou le stockage du glucose. La glycémie revient alors à sa valeur de consigne.

(On peut aussi choisir de présenter la comparaison entre régulateur de vitesse et homéostat glycémique sous forme de tableau).

② Voir schéma dans le bilan des unités, **unité 4, p. 179** du manuel.



4 Lors d'un effort physique de durée 2 heures, les données expérimentales (carrés verts sur le graphique) montrent que la glycémie ne devrait pas descendre sous 0,7g/L. Avec le modèle construit par l'élève (courbe violette), la glycémie baisse très fortement pendant l'effort. Plus généralement la courbe modélisée ne coïncide pas avec les données expérimentales. Cela s'explique par une erreur de modélisation commise par l'élève : dans le modèle proposé, le glucagon inhibe la glycogénolyse et la néoglucogénèse au lieu de les stimuler.

5 Pierre a eu une assez forte hypoglycémie de 8 h 00 à 10 h 00. Cela s'explique par une activité physique intense alors qu'il était à jeun, après le jeûne nocturne et sans petit-déjeuner. On remarque que cette hypoglycémie s'est accompagnée d'une augmentation de la glucagonémie et d'une baisse de l'insulinémie. Pierre a ensuite eu une légère hyperglycémie après le repas de midi. C'est une situation normale après une prise alimentaire. On remarque que

l'hyperglycémie a été corrigée par une sécrétion d'insuline et une baisse de sécrétion du glucagon. De même, il a eu une forte hyperglycémie de 17 h à 18 h 30, suite à la prise d'un copieux goûter riche en sucre. On peut conseiller à Pierre de s'alimenter avant de faire un effort important, car il demande une disponibilité en glucose. À l'inverse, il devrait éviter un apport trop important en glucose avant une phase de repos.

6 La glycémie est réglée à une valeur de consigne proche de 1 g/L. Tout écart par rapport à cette valeur est détecté par les cellules endocrines des îlots de Langerhans du pancréas (capteurs). Ces cellules répondent par une sécrétion plus ou moins abondante d'insuline hypoglycémiant et de glucagon hyperglycémiant (système de commande). Selon la concentration plasmatique de ces deux hormones, des cellules effectrices vont stocker (en cas de glycémie élevée), ou déstocker (en cas de glycémie faible) du glucose. L'ensemble de ce système, qui limite les variations de la glycémie, constitue l'homéostat glycémique.

CHAPITRE 3

Les diabètes, des défauts de régulation de la glycémie

L'objectif du **chapitre 3** est de montrer que différents facteurs, génétiques et environnementaux, sont à l'origine de défauts de régulation de la glycémie, les diabètes. Le diabète de type 2 peut avoir été traité en 1^{ère} S dans le thème 3-B, Patrimoine génétique et maladie, comme exemple non imposé de maladie dont le développement dépend de l'interaction complexe entre facteurs du milieu et génome. Il s'agissait de montrer l'utilisation indispensable d'un mode de pensée statistique pour déterminer les causes d'une maladie et les principes généraux d'une approche épidémiologique. La page d'ouverture du chapitre (p. 187) peut permettre de remobiliser ces connaissances de 1^{ère} S (facteurs déclencheurs du diabète, notion d'épidémie) et de poser la problématique générale

du chapitre.

L'augmentation rapide de la prévalence du diabète, aujourd'hui largement supérieure aux projections établies il y a dix ans, laisse prévoir un problème de santé publique et un fardeau financier très lourd sur les systèmes de santé dans les années à venir. En 2011, le diabète est responsable de plus de 10 % des dépenses totales en soins de santé des adultes (20-79 ans), à l'échelle mondiale. Le diabète et ses complications sont deux causes majeures de décès prématuré dans la plupart des pays. La cinquième édition de l'Atlas du diabète de l'IDF (Fédération Internationale du Diabète) est une source de nombreuses données officielles accessibles à l'adresse www.idf.org/diabetesatlas.

UNITÉ 1 Les diabètes et leurs conséquences

[pp. 188-189 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

Le diabète de type 1 résulte de la perturbation de la régulation de la glycémie provoquée par l'arrêt ou l'insuffisance d'une production pancréatique d'insuline. [...] Le diabète de type 2 s'explique par la perturbation de l'action de l'insuline.

Conseils et suggestions

- Dans cette première unité, l'élève est amené à rechercher et à comparer les éléments de diagnostic des deux grands types de diabète, et à constater qu'une même cause, l'hyperglycémie chronique, engendre les mêmes complications.
- Le choix a été fait d'aborder les traitements et la surveillance des diabètes de types 1 et 2 dès cette première unité et de ne pas y consacrer une unité supplémentaire. En effet, les mettre en relation avec les caractéristiques de l'insulinémie de chaque type de diabète permet à l'élève de comprendre leur nécessité et leurs objectifs. De plus, l'étude des traitements ne figure pas explicitement au programme officiel.

Exploitation des documents par les activités

(Recenser, extraire, organiser, mettre en relation des informations, communiquer à l'aide d'un tableau).

L'analyse du **doc. 1** permet de donner une définition du diabète (commune aux deux grands types de diabètes). (Pour porter le diagnostic de diabète, il n'est pas utile de mesurer l'insulinémie ou le taux sanguin de peptide C, ni de rechercher des anticorps anti-îlots, ni même de demander une échographie ou un scanner du pancréas. Ces examens sont parfois utiles pour l'enquête étiologique. Il n'est plus réalisé de test d'hyperglycémie provoquée orale sauf dans certains cas particuliers.)

Après analyse des **doc. 2**, et **4 à 7**, il est possible d'ajouter des informations au tableau précisant pour les diabètes de type 1 et 2 (DT1 et DT2), l'âge de déclaration de la maladie, la fréquence relative, les symptômes lors du diagnostic et les conséquences à long terme, dont certaines expliquent la surmortalité associée à la maladie.

Enfin, l'étude des **doc. 2** et **3** permet de préciser l'évolution de la glycémie et de l'insulinémie et d'expliquer les objectifs des différents traitements.

Type de diabète	DT1	DT2
Définition	Maladie caractérisée par une hyperglycémie chronique.	
Diagnostic	Deux mesures de la glycémie à jeun (faites des jours différents) supérieures à 1,26 g/L, ou une mesure de la glycémie à n'importe quel moment de la journée, supérieure à 2 g/L).	
Âge de déclaration de la maladie	Enfant, adolescent et jeune adulte.	Adulte (mais l'âge moyen de déclaration du DT2 a tendance diminuer).
Pourcentage des diabétiques	5,6 % des cas de diabètes.	91,9 % des cas de diabètes.
Symptômes au diagnostic	Amaigrissement, soif intense, émission importante d'urine, sucre et corps cétoniques dans les urines.	Généralement, personne en surpoids ou obèse. Pas de symptôme particulier.
Conséquences à long terme	Dégradation du système vasculaire ayant des conséquences sur de nombreux organes, et notamment sur l'œil (rétinopathie pouvant entraîner la cécité). Surmortalité par AVC, infarctus du myocarde, insuffisance rénale et infection. Mauvaise circulation dans les extrémités pouvant entraîner des amputations. Métabolisme des lipides provoquant une acidification du sang et potentiellement le coma et la mort.	
Caractéristiques de la glycémie et de la sécrétion d'insuline lors d'un test HGPO	Sécrétion d'insuline nulle ou quasiment nulle. En conséquence, augmentation de la glycémie importante et durable (par rapport au témoin).	Production d'insuline variable selon l'avancement de la maladie. Dans le cas présenté, l'insulinémie augmente plus lentement que chez le témoin, atteint une valeur maximale moindre et se maintient moins longtemps à une valeur élevée. Pourtant, la glycémie augmente plus que chez le DT1 qui ne produit pas d'insuline. L'insuline semble donc inefficace.
Traitements	Régime alimentaire, injection d'insuline (seringue, pompe) permettant de compenser l'absence de production d'insuline.	Régime alimentaire, exercice physique, prise de médicaments hypoglycémisants (stimulant les effets de l'insuline et la consommation ou le stockage de glucose). Chez le DT2 sévère, nécessité d'injections d'insuline pour compenser la baisse de la sécrétion de l'hormone.
	Greffe de pancréas, transplantation d'îlots de Langerhans, permettant une sécrétion d'insuline.	

Connaissances du programme

L'absence ou l'insuffisance de l'insuline est due à une destruction auto-immune des cellules β des îlots de Langerhans. [...] [Les mécanismes de la réaction auto-immune sont exclus]. Le déclenchement des diabètes est lié à des facteurs variés, génétiques et environnementaux.

Conseils et suggestions

– L'étude de l'**unité 1** a permis de mettre en évidence que l'hyperglycémie observée chez les individus diabétiques de type 1 est liée à une absence ou à une insuffisance de la production d'insuline. L'**unité 2** permet de comprendre l'origine de cette insuffisance. Les élèves connaissent la notion de maladie multifactorielle vue en 1^{ère} S, qui peut être remobilisée à l'aide du paragraphe « Quels facteurs déterminent le déclenchement d'une maladie ? » de la **page 149** « Mobiliser ses acquis ». Les documents fournis dans l'**unité 2** permettent de mettre en évidence le caractère multifactoriel du DT1. L'**exercice 5 p. 199** permet d'appliquer les connaissances abordées dans cette unité.

– Les données chiffrées du **doc. 1** sont issues d'une synthèse bibliographique. Notons que, selon les études, ces données chiffrées varient considérablement. Les causes de ces variations sont multiples : citons l'influence du groupe ethnique étudié, et celle de la durée du suivi. Par exemple, les deux tiers des jumeaux monozygotes dont le jumeau est déjà atteint au début du suivi, développeront des anticorps anti-cellules β ou un diabète à l'horizon 30 ans. Mais quand le premier jumeau atteint déclare un diabète après 25 ans, le risque pour le second jumeau est inférieur à 5 % alors que quand le premier jumeau le déclare avant 6 ans, le risque est au moins de 60 % pour le second jumeau.

Exploitation des documents par les activités

Analyser et interpréter un tableau et un graphique, formuler une hypothèse explicative, tester une hypothèse, réaliser une observation microscopique, construire un schéma fonctionnel.

1 Le DT1 n'étant pas contagieux, si son déclenchement est indépendant du contexte génétique, on s'attend à ce qu'on ait la même probabilité de le développer selon que l'on a ou non, dans sa famille, des individus atteints. Inversement, si l'apparition du DT1 a une composante génétique, on s'attend à ce que le risque de DT1 soit d'autant plus élevé que l'on est étroitement apparenté à une personne déjà atteinte. Les résultats du tableau du **doc. 1** permettent donc de tester l'hypothèse d'une composante génétique au DT1. On constate qu'en l'absence d'antécédents familiaux, le risque de développer un DT1 est de 0,5 %. Si l'on a un frère ou une sœur, ou l'un de ses deux parents atteints, le risque est plus élevé, de 3 à 10 % selon les cas. Enfin, si l'on a un vrai jumeau atteint, le risque

est supérieur à 50 %. Le risque est donc d'autant plus élevé que l'on est étroitement apparenté à un individu atteint, ce qui est en faveur de l'existence d'une composante génétique. Dans le même temps, le risque n'étant pas de 100 % lorsque l'on a un vrai jumeau atteint, le DT1 n'a pas seulement un déterminisme génétique.

Le **doc. 2** présente quelques gènes de susceptibilité au DT1. Par définition, ces gènes sont tels que certains génotypes à leur locus sont plus fréquemment associés au DT1 que d'autres. Parmi les gènes de susceptibilité identifiés, certains interviennent dans la réponse immunitaire (gènes HLA notamment), et un autre est le gène de l'insuline lui-même (sa partie non codante, qui joue un rôle régulateur dans l'expression du gène, donc dans la synthèse de l'insuline). Même les gènes pour lesquels le rapport de risque est le plus grand entre allèles de susceptibilité et allèles protecteur (rapport 7 pour HLA-classe II), ne peuvent pas rendre compte à eux seuls du risque élevé de développer un DT1 pour les jumeaux vrais d'individus atteints. Une combinaison d'allèles de susceptibilité ayant chacun un effet modeste peut expliquer ce risque élevé (voir **doc. 4 page 192**).

L'augmentation de la prévalence (nombre de personnes diabétiques rapporté à la population) ces dernières années dans un même pays, donc pour un même patrimoine génétique, confirme que l'environnement influence le déclenchement du DT1. Différentes études épidémiologiques (**doc. 3**) ont permis d'identifier des facteurs environnementaux associés au DT1 (inflammation, grande prise de poids, certaines protéines alimentaires ou virales, hygiène).

Le déclenchement du DT1 est donc lié à la fois à des facteurs génétiques et à des facteurs environnementaux.

2 Les facteurs environnementaux associés au déclenchement du DT1 ont en commun de pouvoir favoriser une réaction auto-immune contre les cellules insulino-sécrétrices du pancréas (**doc. 3**). Par exemple, certaines protéines virales ou alimentaires déclencheraient la production de lymphocytes T également réactifs contre des antigènes des cellules β pancréatiques. (*Concernant l'hygiène, on peut indiquer que la rareté des infections empêche l'activation de systèmes régulateurs du système immunitaire, chargés d'éliminer les lymphocytes dirigés contre les molécules du soi, en particulier contre des antigènes des cellules pancréatiques.*)

Les résultats expérimentaux du **doc. 4** montrent que la protéine vp-1 du rétrovirus Cocksachie est plus fréquemment exprimée par les cellules pancréatiques chez les individus DT1 que chez les individus sains. On peut proposer (mais d'autres interprétations sont possibles) que la protéine vp-1 active des lymphocytes T qui détruisent alors les cellules pancréatiques infectées par le virus. Une infection par un virus Cocksachie pourrait donc déclencher la destruction des cellules β pancréatiques et de ce fait l'absence ou l'insuffisance de production d'insuline caractéristique du DT1.

On peut alors formuler l'hypothèse suivante : l'absence ou l'insuffisance de la production d'insuline dans le DT1 seraient due à une destruction des cellules β pancréatiques par un processus auto-

immun, sous l'effet de facteurs déclenchants, chez des individus génétiquement susceptibles.

③ Au **doc. 5**, l'îlot de Langerhans du pancréas observé chez un individu DT1 présente moins de cellules endocrines que celui d'un individu non diabétique. L'îlot est envahi par des lymphocytes T qui pourraient être à l'origine de la destruction des cellules endocrines β . Cette destruction expliquerait l'absence ou la faible production d'insuline. Les symptômes n'apparaissent que lorsque 80 à 90 % des cellules β sont détruites. *(La coloration n'est pas la même pour les deux coupes, mais le caractère compact de l'îlot sain et la désorganisation de l'îlot d'individu DT1 sont bien visibles).*

Au **doc. 6**, Les îlots de Langerhans des souris NOD présentent au cours du temps de plus en plus de cellules marquées en brun, cellules qui ont fixé des anticorps anti-lymphocytes T. Les îlots pancréatiques sont donc peu à peu infiltrés par des LT, signe d'une réaction immunitaire. Il y a également au cours de la maladie de moins en moins de cellules marquées en rouge, donc ayant fixé des anticorps anti-insuline. Ceci indique une diminution de la sécrétion d'insuline.

Le **doc. 7** montre l'évolution du taux d'anticorps anti-îlots chez un individu, de sa naissance jusqu'à la déclaration d'un DT1, à l'âge de 14 ans. Environ 6 ans avant l'apparition de la maladie, on a constaté une augmentation rapide de la sécrétion d'anticorps anti-îlots, c'est à dire des anticorps produits contre des protéines propres aux cellules β .

L'ensemble des observations permet de valider l'hypothèse proposée à la question précédente. Les anticorps et les lymphocytes T sont produits contre des molécules et des cellules du soi : il y a une réaction auto-immune. *(Les mécanismes de la réaction auto-immune ne sont pas à expliquer, comme le précise le B.O.).* Le DT1 est donc une maladie auto-immune où l'attaque du système immunitaire via des anticorps et des lymphocytes T conduit à la destruction totale ou partielle des cellules β pancréatiques, ce qui explique l'insuffisance ou l'absence de production d'insuline, et donc l'hyperglycémie chronique.

④ Voir la partie du schéma essentiel p. 197 traitant du DT1.

UNITÉ 3 Le diabète de type 2

[pp. 192-193 du manuel de l'élève]

Connaissances du programme

Le diabète de type 2 s'explique par la perturbation de l'action de l'insuline. [...] Le déclenchement des diabètes est lié à des facteurs variés, génétiques et environnementaux. [La référence au surpoids, envisagée sous l'angle du lien avec le diabète de type 2, n'entraîne aucune étude exigible du tissu adipeux ou du métabolisme lipidique.].

Conseils et suggestions

- L'unité 3, construite comme l'unité 2, propose d'identifier les facteurs qui déterminent l'apparition du DT2, et permet de comprendre l'origine de l'hyperglycémie observée chez les patients DT2.
- Les données chiffrées du **doc. 3** sont issues d'une synthèse bibliographique. Tout comme pour le DT1, ces données chiffrées varient considérablement selon les études, notamment selon le groupe ethnique étudié.
- Pour expliquer l'origine de l'hyperglycémie chez le DT2, on a choisi de traiter la diminution de l'efficacité de l'insuline vis-à-vis de ses tissus cibles (ou insulino-résistance), connue depuis longtemps, mais aussi la diminution de la capacité de la cellule β à sécréter l'hormone, qui a été longtemps mise en doute et se trouve maintenant bien documentée. Le **doc. 8 p. 193** présente l'adaptation à long terme de la cellule β chez un individu DT2 ou sain soumis à des facteurs environnementaux (surcharge alimentaire et inactivité physique) induisant une insulino-résistance des cellules cibles de l'insuline. Cette adaptation est particulièrement marquée chez le sujet obèse non diabétique : il est capable de sécréter 2 à 5 fois plus d'insuline en réponse au glucose qu'un sujet maigre non diabétique, et de 5 à 10 fois plus qu'un sujet obèse DT2. On peut voir là

une des raisons majeures pour lesquelles près de 75 % des sujets obèses ne deviennent pas diabétiques.

– L'exercice 6 p. 199 permet, à partir de l'exemple du diabète du bébé, de préciser le mécanisme de libération d'insuline par une cellule β abordé au **chapitre 2** dans l'unité 2, au **doc. 7 p. 173**. Il permet également d'étudier le mode d'action de médicaments anti-diabétiques stimulant la sécrétion d'insuline : les sulfamides hypoglycémisants.

– L'exercice 9 p. 201 et l'atelier Enquête "Des projets innovants pour l'insulinothérapie" p. 202 proposent des pistes de réflexion sur les modes d'administration de l'insuline. Ils peuvent être associés à une recherche documentaire (B2i)

Exploitation des documents par les activités

Extraire des informations de tableaux, de graphiques et de textes et les interpréter. Formuler une hypothèse. Construire un schéma fonctionnel.

① D'après le **doc. 1**, la prévalence du DT2 a augmenté dans la population française entre 2000 et 2009, et ce quel que soit l'IMC des individus. De plus, la prévalence et son augmentation durant cette période sont d'autant plus grandes que l'IMC est important. Il existe donc une corrélation entre surpoids (ou obésité) et DT2. On peut formuler l'hypothèse que le surpoids est un facteur de risque vis à vis du DT2. Si c'est le cas, on s'attend à ce que le nombre de nouveaux cas de DT2 sur une période donnée (c'est à dire l'incidence du DT2) soit plus élevé chez les individus en surpoids que chez les individus de corpulence normale. C'est exactement ce que montrent les données

(...)

du **doc. 2** : si l'on s'intéresse par exemple aux individus sédentaires (dépense liée à l'activité physique inférieure à 2 000 kJ/semaine), l'incidence du DT2 est de 12,1 nouveaux cas par an pour 10 000 hommes d'IMC égal à 24 (corpulence normale), et de 49,6 nouveaux cas par an pour 10 000 hommes en surpoids ou obèses (IMC soit 4 fois plus. Ce constat vaut également pour les populations d'individus moyennement actifs ou physiquement très actifs. L'hypothèse d'un lien de cause à effet entre surpoids et DT2 est donc validée.

Le **doc. 2** permet d'identifier un autre facteur de risque pour le DT2 : la sédentarité. En effet, pour des individus en surpoids ou obèses (IMC ≥ 26), plus l'activité physique est faible, plus l'incidence du DT2 (nombre de nouveaux cas par intervalle de temps dans la population étudiée) est grande : lorsque la dépense énergétique est inférieure à 2 000 kJ par semaine, l'incidence est de 49,6 nouveaux cas par an pour 10 000 hommes, alors qu'elle est de seulement 33,2 nouveaux cas lorsque la dépense énergétique est supérieure à 8 000 kJ par semaine. L'activité physique a donc un effet protecteur vis à vis du DT2, chez les individus en surpoids ou obèses. (*On peut revenir ici sur le cas illustré p. 187 : les sumos, à la fois obèses et physiquement très actifs, ont un risque de DT2 accru par rapport à la population japonaise générale, mais un risque de DT2 diminué par rapport à des japonais sédentaires de même corpulence*). Lorsque l'IMC est de 24, l'incidence du DT2 est à peu près identique (environ 12 cas pour 10 000 hommes.an⁻¹) quelle que soit l'activité physique, et toujours nettement inférieure à celle des individus en surpoids.

Le manque d'activité physique (sédentarité) et le surpoids sont donc deux facteurs environnementaux qui favorisent le DT2.

Le **doc. 3** peut être étudié selon la même logique que le **doc. 1** page 190. On constate que le risque de devenir diabétique de type 2 est d'autant plus élevé que l'on est génétiquement proche d'un individu déjà atteint : ce risque, de 2 à 4 % dans la population générale, est de 25 % dans la fratrie d'un individu atteint, et atteint même 99 % pour le jumeau vrai d'un individu DT2. Ces résultats montrent que le DT2 a une forte composante génétique. En effet, d'après l'interview du **doc. 4**, la comparaison des génomes de familles diabétiques et non diabétiques a montré l'existence de diabètes dits monogéniques (un seul gène est modifié et entraîne l'apparition du diabète) et de diabètes dits polygéniques (il existe des allèles de susceptibilité dont la présence augmente modestement le risque de développer un DT2).

En conclusion, l'interaction de facteurs liés à l'environnement et de facteurs génétiques détermine le déclenchement d'un DT2.

② Le **doc. 5** montre que chez un individu non diabétique, suite à une prise orale de glucose (test HGPO), l'insulinémie augmente pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 90 $\mu\text{U/mL}$, 30 minutes après l'ingestion de glucose. Elle reste élevée environ 30 minutes avant de diminuer rapidement, et retrouve sa valeur initiale moins de 3 heures après la prise de glucose. Chez un individu pré-diabétique, l'insulinémie évolue normalement pendant la première demi-heure après la prise de glucose, mais au lieu de plafonner, elle poursuit son augmentation jusqu'à 1 h après l'ingestion. Elle atteint 150 $\mu\text{U/mL}$, et reste élevée pendant une heure avant d'amorcer une rapide diminution. Autrement dit, la sécrétion d'insuline et beaucoup plus importante lors d'un test HGPO que

chez un individu non diabétique. Un individu atteint de DT2 modéré retrouve une sécrétion d'insuline semblable en intensité à celle de l'individu non diabétique, mais le pic d'insulinémie est retardé de près d'une heure : la sécrétion d'insuline est donc moins rapide que chez un individu sain. Enfin, chez un individu atteint de DT2 sévère, on n'observe pas le pic d'insulinémie que l'ingestion de glucose devrait provoquer.

En conclusion, après une période d'hypersécrétion chez le pré-diabétique, la sécrétion d'insuline ne fait que diminuer au cours de l'évolution de la maladie.

③ Les résultats d'expériences menées chez la souris (**doc. 6**) montrent qu'il y a moins d'insuline fixée sur les protéines des membranes plasmiques des hépatocytes de souris diabétiques que sur celles des souris non diabétiques. Cela peut s'expliquer par une moindre quantité de récepteurs à l'insuline dans la membrane plasmique des hépatocytes de souris diabétiques (et ce bien que la quantité d'insuline fixée soit rapportée à la masse de protéines membranaires), et/ou par une moindre affinité de ces récepteurs vis à vis de l'insuline. Les cellules sont moins sensibles à l'insuline, on dit qu'elles sont insulino-résistantes.

Le **doc. 7** montre que les cellules musculaires absorbent d'autant plus de glucose par unité de temps que la concentration en insuline est élevée dans leur milieu. Cette observation est valable aussi bien chez les individus sains que chez les individus diabétiques, mais le flux entrant de glucose est moindre pour les cellules musculaires de diabétiques, et ce pour toutes les concentrations d'insuline testées. L'effet hypoglycémiant de l'insuline lié à cette absorption de glucose est donc réduit chez les diabétiques.

De plus, l'activité glycogène synthétase est plus faible chez les souris diabétiques que chez les souris non diabétiques (**doc. 7**). Or, la production de glycogène, en prélevant du glucose-phosphate intracellulaire, favorise l'entrée de glucose dans les cellules et a donc également un effet hypoglycémiant. Il y a donc abondance de glucose dans le sang, alors que l'entrée du glucose dans les cellules et son stockage sous forme de glycogène sont diminués : il y a privation en glucose (à l'échelle cellulaire) au milieu de l'abondance (dans le sang).

④ Des apports alimentaires importants et une faible activité physique, à l'origine d'une insulino-résistance des cellules cibles de l'insuline, induisent une sollicitation anormale des cellules endocrines β des îlots de Langerhans (**doc. 8**). Dans un premier temps, la masse fonctionnelle des cellules β augmente : ces cellules sont plus nombreuses et volumineuses et produisent plus d'insuline, comme en témoigne l'évolution de l'insulinémie lors d'un test HGPO, chez un individu pré-diabétique (**doc. 5**). Chez un individu ayant des cellules β dites « fortes », cette situation de compensation peut perdurer et la glycémie reste normale (**doc. 8**). Alors que chez un individu qui présente des cellules β « faibles », la compensation est incomplète, et l'hyperglycémie s'installe (DT2). Au cours de l'évolution de la maladie, la masse fonctionnelle β s'effondre, et la quantité d'insuline produite pour une même glycémie diminue peu à peu (**doc. 5**) jusqu'à engendrer chez le DT2 aggravé le besoin d'un apport exogène (**doc. 5**), par injection par exemple.

⑤ **EN CONCLUSION.** Voir la partie du schéma essentiel p. 197 traitant du DT2.



EXERCICES DU THÈME 3

Chapitre 1

[pp. 164-167 du manuel]

Les exercices de la rubrique «**Évaluer ses connaissances**», l'exercice guidé et l'exercice 10 sont corrigés à la fin du manuel élève (pp. 216-217).

⑤ MUTATIONS ET ACTIVITÉ D'UNE ENZYME

Analyser des données expérimentales.

Réponse attendue :

La modification d'un acide aminé situé loin du site actif entraîne une nette diminution de l'activité de l'enzyme (dans les deux exemples de substitutions présentés, le $V_{\max}$ de l'enzyme est divisé par deux). Ceci montre qu'une modification ponctuelle de la séquence d'acides aminés de l'enzyme peut altérer son activité, même si elle n'est pas située dans le site actif.

La modification d'un acide aminé appartenant au site actif de l'enzyme se traduit, dans les deux cas présentés, par une inactivation presque totale de l'enzyme (activité résiduelle de l'ordre de 0,5 % de celle de l'enzyme de séquence normale). Enfin, si la substitution entraîne une modification importante de la structure spatiale de l'enzyme, ce qui désorganise le site actif, l'enzyme devient quasiment inactive. Ces résultats expérimentaux soulignent l'importance pour l'activité catalytique :

- de la séquence d'acides aminés d'une enzyme, et en particulier, des acides aminés qui composent son site actif,
- de la conformation spatiale de l'enzyme.

(dans le cadre d'un approfondissement, il peut être intéressant d'analyser plus finement la nature des mutations, en s'intéressant aux propriétés des acides aminés substitués par rapport aux acides aminés d'origine).

⑥ UN PRODUIT NATUREL PROMETTEUR ?

Analyser des données et les mettre en relation.

Réponse attendue :

Le **doc. 2** permet de comparer l'évolution de la glycémie suite à un repas riche en amidon, chez des souris diabétiques ayant ou non ingéré du marc de raisin avant le repas, et ayant la même glycémie initiale ($1,5 \text{ g.L}^{-1}$). Des mesures sont effectuées 30 minutes, 60 minutes et 120 minutes après le repas. On constate que chez les souris témoins, qui n'ont pas ingéré de marc de raisin, la glycémie vaut $2,9 \text{ g.L}^{-1}$ après 30 minutes, puis diminue pour atteindre $2,4 \text{ g.L}^{-1}$ après 120 minutes. Chez les souris ayant ingéré du marc de raisin, la glycémie est, pour chaque mesure, inférieure à celle des souris témoins : le maximum n'est que de $2,6 \text{ g.L}^{-1}$ après 30 minutes, et la glycémie est d'environ 2 g.L^{-1} après 120 minutes. L'hyperglycémie post-prandiale est donc réduite par la prise de marc de raisin, en tout cas chez les souris diabétiques.

Dans le **doc. 1**, on observe que, *in vitro*, un extrait de marc de raisin réduit l'activité de la glucosidase. Cette réduction est de l'ordre de 50 %, pour la concentration de l'extrait utilisée. Le marc de raisin contient donc un inhibiteur de l'enzyme.

On peut donc proposer une explication aux résultats du **doc. 2**. Chez les souris traitées, par rapport aux témoins, l'activité de la glucosidase dans les voies digestives serait diminuée du fait de la présence d'extrait de marc de raisin.

En conséquence, la transformation en glucose des disaccharides issus de l'hydrolyse de l'amidon se ferait moins rapidement. Or, seuls les monosaccharides comme le glucose (et pas les disaccharides) ont la faculté de traverser la barrière intestinale et de passer dans la circulation sanguine. Le flux de glucose entrant dans la circulation sanguine serait donc réduit, et plus étalé dans le temps, ce qui rendrait compte de la moindre augmentation postprandiale de la glycémie.

⑦ ENZYME ET CUISINE

Analyser des données et raisonner.

Réponse attendue :

D'après le **doc. 1**, la consistance ferme d'un bavaois réussi est due à la présence de longues chaînes protéiques s'agencant en réseau et emprisonnant la partie liquide de la préparation. Ces protéines ont donc un effet gélifiant (d'où l'appellation de gélatine alimentaire). D'après le **doc. 2**, la mise en conserve de l'ananas s'accompagne d'une phase de chauffage à assez haute température (supérieure à 100°C). Le **doc. 3** nous informe que l'ananas est riche en une enzyme protéolytique, la broméline. On peut donc imaginer que si un cuisinier débutant réalise un bavaois avec de l'ananas frais, la broméline présente dans ce dernier catalyse l'hydrolyse des protéines gélifiantes, empêchant ainsi le bavaois de « prendre ». En revanche, l'ananas en conserve est passé par des températures élevées. Or, l'activité d'une enzyme dépend de sa structure spatiale, et cette structure peut être dénaturée par des températures trop grandes. Il est donc probable que, dans l'ananas en conserve, les différentes enzymes présentes – dont la broméline – aient perdu l'essentiel de leur activité catalytique. Les protéines de la gélatine ne sont donc pas hydrolysées, et le gel peut se former.

(Cet exercice peut faire l'objet d'une séance de travaux pratiques aussi pertinente qu'amusante).

⑧ L'ALBINISME THERMOSENSIBLE

Mettre en relation des données et raisonner.

(Cet exercice fournit un exemple de protéine intervenant dans une biosynthèse. On peut le traiter dans l'optique de montrer que les enzymes ne sont pas seulement les hydrolases digestives).

Réponses attendues :

1. Les individus albinos thermosensibles ont un phénotype particulier, et le **doc. 1** nous renseigne sur l'activité de la tyrosinase de ces

individus. La tyrosinase normale, si elle est peu active à des températures assez basses, le devient pleinement au dessus de 35 °C, et au moins jusqu'à 43 °C. Chez les individus souffrant d'albinisme thermosensible, la tyrosinase n'est pleinement active qu'entre 33 °C et 36 °C, et perd de son activité quand la température augmente au-dessus de 36 °C. Or, la tyrosinase permet la synthèse de la mélanine qui colore la peau, les cheveux, les poils, etc.

Chez un être humain, on peut penser que la surface du cuir chevelu ou des aisselles est à une température plus élevée que celle des bras ou des jambes. Chez les individus albinos thermosensibles, la tyrosinase ne serait donc pas active au niveau de la peau du cuir chevelu ou des aisselles, ce qui expliquerait l'absence de pigmentation des poils à ces endroits-là. En revanche, la tyrosinase serait active au niveau de la peau des bras ou des jambes, ce qui expliquerait la coloration des poils de ces zones du corps.

2. Le pelage du chat siamois adulte est caractéristique. On peut émettre une hypothèse sur son origine, sachant que cette race a une tyrosinase thermosensible. La pointe des oreilles, la face, le bout des pattes et de la queue et dans une moindre mesure le dos sont des zones où les poils sont foncés : on peut penser que dans ces zones, la température de la peau n'est pas très élevée et donc que la tyrosinase est active et permet la synthèse de mélanine. En revanche, les flancs et le ventre sont très peu pigmentés : la température de la peau doit être trop élevée pour que la tyrosinase soit active, ce qui explique l'absence de mélanine. Les chatons, eux, sont blancs à leur naissance.

Ceci peut s'expliquer par le fait qu'ils viennent de passer un peu plus de deux mois dans le ventre de leur mère, à une température où la tyrosinase ne peut pas être active. Ils acquerront leur pelage caractéristique quand de nouveaux poils pousseront « ex utero » et remplaceront les poils blancs.

⑨ LES EXPÉRIENCES DE RÉAUMUR

Esprit critique.

Réponse attendue :

L'expérience de Réaumur a permis d'étayer l'hypothèse que la digestion met en jeu des processus chimiques (et pas seulement des processus mécaniques). Néanmoins, on peut émettre quelques critiques sur sa mise en œuvre et proposer des améliorations. Tout d'abord, le morceau de viande a séjourné 24 heures dans l'estomac d'un oiseau, donc à une température de 40 °C environ. Rien ne permet de dire que ce n'est pas simplement cette température élevée qui a provoqué une modification du morceau de viande. Réaumur aurait donc pu ajouter un témoin à son expérience, en plaçant un morceau de viande dans un tube étanche et clos et en le faisant avaler à la buse.

Les résultats de l'expérience montrent qu'un morceau de viande peut être digéré sans avoir subi de malaxage ou de broyage, du fait qu'il est enfermé dans un tube métallique rigide. Mais rien ne permet de dire qu'une simple trituration n'aurait pas abouti au même résultat : Réaumur aurait donc pu aussi placer un morceau de viande dans une poche souple mais étanche aux liquides pour évaluer l'effet mécanique.

Une autre critique est que Réaumur utilise un oiseau comme modèle,

or le système digestif des oiseaux est assez différent de celui des mammifères. Enfin, pour pousser plus avant ses recherches, Réaumur aurait pu essayer de réaliser une digestion « *in vitro* » en prélevant les sucs digestifs dans l'estomac de la buse. (Cette dernière suggestion permet d'ouvrir sur les expériences ultérieures de Spallanzani ou de Beaumont).

Chapitre 2

[pp. 182-185 du manuel]

Les exercices de la rubrique « Évaluer ses connaissances », l'exercice guidé et l'exercice 5 sont corrigés à la fin du manuel élève (pp. 216-217).

Les exercices de la rubrique « Évaluer ses connaissances », l'exercice guidé et l'exercice 5 sont corrigés à la fin du manuel élève (pp. 216-217).

④ DES EXPÉRIENCES HISTORIQUES

Analyser des expériences.

Réponses attendues :

1. Dans l'expérience 1, on injecte du glucose dans la circulation sanguine d'un chien A, et on mesure la glycémie chez un chien B recevant du sang du chien A par une anastomose pancréatico-jugulaire. On constate que la glycémie diminue chez le chien B. On en déduit que l'anastomose a transporté un message à l'effet hypoglycémiant, sécrété par le chien A suite à l'injection de glucose. Ce message agissant à distance après transport sanguin est une hormone. La régulation de la glycémie apparaît donc, à l'issue de cette expérience, comme étant de nature hormonale.

2. On peut préciser, d'après les connaissances scientifiques actuelles, que l'hyperglycémie chez le chien A a été détectée par ses cellules endocrines du pancréas. L'insulinosécrétion a alors été activée, alors que la sécrétion de glucagon a été inhibée. L'insuline a été transportée par l'anastomose jusqu'au chien B, chez lequel, agissant notamment sur les hépatocytes, elle a provoqué une hypoglycémie.

3. Dans l'expérience 2, on injecte du glucose dans la circulation sanguine d'un chien A. La tête d'un chien B reçoit du sang en provenance du corps (dont le pancréas) du chien A. Le pancréas de ce chien B n'a aucune relation sanguine avec sa propre tête, seulement une relation nerveuse. Enfin, une anastomose semblable à celle utilisée dans l'expérience 1 permet à un chien C de recevoir le sang sortant du pancréas du chien B. On constate alors une hypoglycémie chez le chien C. Cela signifie que les cellules insulinosécrétrices du chien B ont été activées, sans que le pancréas du chien B soit soumis à une hyperglycémie. L'information est nécessairement parvenue au pancréas du chien B par voie nerveuse, via les nerfs pneumogastriques, dont certaines terminaisons sont situées dans les îlots de Langerhans. On peut supposer l'existence de capteurs de la glycémie, dans le cerveau ou le tronc cérébral. Ces capteurs doivent pouvoir stimuler les cellules β par voie nerveuse.

En conclusion, la sécrétion d'insuline ne résulte pas seulement d'une mesure de la glycémie par les cellules insulinosécrétrices, mais peut

aussi être déclenchée par des messages nerveux en provenance du cerveau (*on peut signaler que ces signaux nerveux sont par déclenchés par la vue d'un repas, ou par le goût sucré*).

⑥ L'ACTION DU GLUCAGON

Analyser des graphiques.

Réponses attendues :

1. Des hépatocytes en culture sécrètent d'autant plus de glucose dans leur milieu que ce milieu est riche en glucagon. Le glucagon a donc un effet hyperglycémiant, car il active le déstockage de glucose au niveau hépatique.
2. Le glucagon se fixe à des récepteurs membranaires des cellules hépatiques. Cette fixation active le déstockage du glucose et inhibe son stockage, en activant ou en inhibant des enzymes intervenant dans le métabolisme du glucose.
3. On constate (**doc. 2**) que le glucagon active la glycogène-phosphorylase, qui intervient dans la dégradation des réserves hépatiques de glycogène. Par ailleurs, il inhibe la glycogène synthase, qui catalyse la synthèse du glycogène, ainsi que la pyruvate kinase, enzyme intervenant dans la glycolyse. On peut proposer (hypothèse à tester) que le glucagon active la glucose-phosphatase, enzyme qui catalyse la déphosphorylation du glucose-6P. En effet, cette déphosphorylation est un préalable à la sécrétion de glucose.

⑦ INSULINE ET ÉVOLUTION

S'informer et raisonner.

Réponses attendues :

1. Les chaînes A de l'insuline de Porc et de l'insuline humaine ont des séquences d'acides aminés identiques, et leurs chaînes B ne diffèrent que par un acide aminé (T chez l'Homme et A chez le porc, en 30^e position). Cette différence d'un acide aminé n'affecte probablement ni la structure de l'insuline, si la composition en acides aminés de son site actif, ce qui explique que l'insuline de porc soit active chez l'Homme. Le raisonnement est le même pour l'insuline de bœuf, qui diffère de l'insuline humaine par 3 acides aminés. L'insuline de myxine a 20 acides aminés qui diffèrent de ceux de l'insuline humaine, si bien que son activité chez l'Homme est réduite. L'insuline de porc et de bœuf ont été les plus utilisées, historiquement, dans le traitement de diabète, car elles sont à la fois proches de l'insuline humaine, et d'approvisionnement relativement facile (le porc et le bœuf sont des animaux domestiques, dont on a des élevages, et on peut prélever le pancréas des animaux abattus pour la production de viande).
2. Certains acides aminés sont les mêmes pour les 4 espèces considérées. Ces acides aminés ont peut-être une importance particulière pour la structure de l'insuline (c'est par exemple le cas des cystéines (C) qui établissent des liaisons covalentes), pour la fixation de l'insuline à son récepteur. La bonne conservation de l'insuline au cours de l'évolution révèle des contraintes fonctionnelles fortes qui s'exercent sur cette molécule : l'insuline est une hormone vitale pour l'organisme, si bien que des mutations la rendant inactive sont fortement contre-sélectionnées.
3. Les distances (définies ici comme le nombre d'acides aminés qui diffèrent) entre séquences d'insulines des 4 Vertébrés considérés sont les suivantes :

	Homme	Porc	Bœuf	Myxine
Homme	0	1	3	20
Porc		0	2	20
Bœuf			0	20
Myxine				0

L'insuline est donc en faveur de la phylogénie suivante : (((Homme, Porc), Bœuf), Myxine). Toutefois, on ne peut établir de façon fiable une phylogénie sur la base d'une séquence aussi courte que celle de l'insuline, et avec un si petit nombre d'espèces (d'ailleurs, la phylogénie correcte, largement soutenue par ailleurs, est (((Porc, Bœuf), Homme), Myxine)).

⑧ LA « PIQÛRE DIABÉTIQUE » DE CLAUDE BERNARD

Esprit critique.

Réponse attendue :

Claude Bernard cherche à tester l'hypothèse d'un contrôle nerveux de la libération de glucose par le foie. Il est établi à l'époque que le foie est innervé, par des terminaisons nerveuses en provenance d'une région précise du cerveau. Claude Bernard stimule cette région (chez un animal), ce qui provoque une forte hyperglycémie. Ces résultats sont compatibles avec son hypothèse. Si l'hypothèse est correcte, il doit s'attendre à ce que l'hyperglycémie provoquée par cette « piqûre diabétique » cesse lorsque la communication nerveuse entre le cerveau et le foie est interrompue. Or, la section du nerf splanchnique abolit l'effet de la piqûre diabétique. L'hypothèse de Claude Bernard est donc validée par ses expériences. Toutefois, en sciences, la validité d'une hypothèse peut toujours être remise en cause par des résultats incompatibles avec cette hypothèse : une hypothèse validée n'est pas nécessairement vraie ; elle est vraie jusqu'à preuve du contraire.

Le **doc. 1** montre que la stimulation du nerf splanchnique active la sécrétion d'adrénaline, une hormone sécrétée par les glandes surrénales. Le **doc. 2** représente l'effet d'une perfusion d'adrénaline sur la sécrétion de glucose par le foie, et sur la glycémie. On constate que l'adrénaline a un effet hyperglycémiant. Cet effet est dû à une activation de la sécrétion de glucose par le tissu hépatique. De plus, les cellules hépatiques sont équipées de récepteurs membranaires à l'adrénaline. Ces résultats suggèrent que la piqûre diabétique stimule la sécrétion d'adrénaline, qui elle-même active le déstockage hépatique (*en toute rigueur, les doc. 1 et 2 ne suffisent pas à démontrer qu'une voie directe d'existe pas également*). Le lien entre stimulation du cerveau et hyperglycémie est donc plus indirect que ce qu'avait envisagé Claude Bernard, mais ses expériences ne lui permettaient pas d'entrevoir cette complexité, et sa conclusion était la plus parcimonieuse au vu des résultats dont il disposait. (*Le site bilingue français-anglais www.claude-bernard.co.uk/ peut permettre d'aller plus loin, ou d'effectuer un travail en enseignement de DNL SVT*).

⑨ LA RÉGULATION HÉPATIQUE DE LA GLYCÉMIE

B2i.

Réponses attendues :

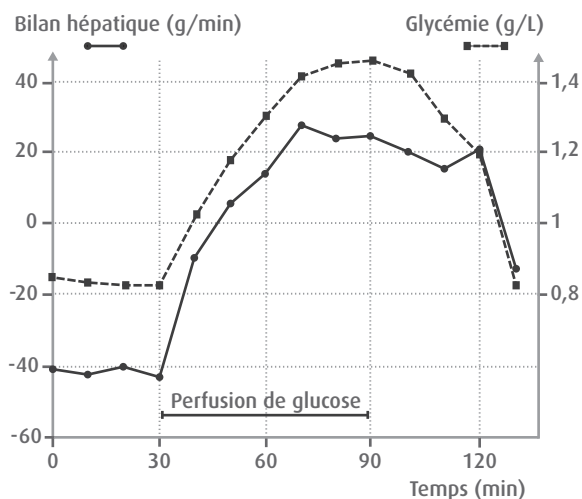
1. Le sang n'arrive au foie que par l'artère hépatique, du fait du

court-circuit réalisé chirurgicalement entre la veine porte hépatique et la veine cave. Ce court-circuit permet aux hormones pancréatiques d'atteindre le foie, mais de façon moins directe que lorsque la veine porte irrigue le foie. Dans cette situation expérimentale, le bilan hépatique en glucose s'exprime $(G_a - G_v) \times D$ où G_a est la glycémie dans l'artère hépatique (en g/L), G_v la glycémie dans la veine sus-hépatique (en g/L) et D le débit sanguin hépatique (en L/min). L'unité du bilan hépatique est le g/min. Un bilan hépatique positif ($G_a > G_v$) signifie que le foie prélève plus de glucose sanguin qu'il n'en libère (stockage), alors qu'un bilan hépatique négatif ($G_a < G_v$) signifie que le foie prélève moins de glucose qu'il n'en libère (déstockage).

2.

Temps (min)	Bilan hépatique (g/min)
0	-0,0416
10	-0,042
20	-0,04
30	-0,0432
40	-0,01
50	0,0052
60	0,0135
70	0,027
80	0,0232
90	0,024
100	0,0196
110	0,015
120	0,0208
130	-0,0125

3. Évolution de la glycémie et du bilan hépatique



On constate que le bilan hépatique est corrélé à la glycémie : il est négatif (foie en mode déstockage) lorsque la glycémie est faible, comme lorsque l'individu est à jeun, et positif (foie en mode stockage) lorsque la glycémie est élevée (comme après un repas, mais ici, le chien est à jeun, et du glucose lui est directement injecté en intraveineuse).

Chapitre 3

[pp. 198-201 du manuel]

Les exercices de la rubrique «**Évaluer ses connaissances**», l'exercice guidé et l'exercice 5 sont corrigés à la fin du manuel élève (p. 217).

⑥ LES CAUSES DU DIABÈTE DU BÉBÉ

Construire un schéma.

Réponses attendues :

1. Étape 1 : le glucose entre dans la cellule par un transporteur GLUT2 de la membrane plasmique. Étape 2 : il est alors métabolisé par la voie de la glycolyse, puis par la respiration mitochondriale, ce qui génère de l'ATP (voir **doc. 7 p. 173** et schéma essentiel **p. 43**). Étape 3 : la fixation d'ATP sur un canal potassique favorise la fermeture de ce canal, ce qui limite le flux sortant d'ions potassium (K^+). Étape 4 : la membrane se dépolarise. Cette dépolarisation déclenche l'ouverture de canaux calciques et l'entrée d'ions calcium (Ca^{2+}). Étape 5 : les ions calcium permettent la migration des granules de sécrétion d'insuline vers la membrane plasmique, la fusion de ces vésicules avec la membrane, et la libération de l'hormone dans le milieu extracellulaire.

Le canal potassique permet donc de faire varier la polarisation de la membrane. Quand il est fermé, les ions potassium ne peuvent plus sortir par ce canal, ce qui entraîne une variation de la différence de potentiel électrique de part et d'autre de la membrane plasmique de la cellule β : la membrane se dépolarise.

2. Sur le schéma devraient figurer les étapes notées ci-après en italique. Chez Mathis, atteint de diabète néonatal, il y a une *mutation d'un gène codant le canal potassique* → (qui entraîne) *ouverture permanente du canal potassique* → *absence de dépolarisation membranaire* → *absence d'ouverture des canaux calciques* → *absence d'entrée d'ions calcium dans le cytoplasme* → *absence de sécrétion d'insuline*.

3. Sur le schéma, *fixation des sulfamides hypoglycémiantes* → *fermeture du canal potassique* → *dépolarisation membranaire* → *ouverture des canaux calciques* → *entrée d'ions calcium* → *migration des granules de sécrétion et libération d'insuline*.

⑦ LE POLYMORPHISME DE LA GLYCOGÈNE SYNTHÉTASE

S'informer et raisonner.

Réponses attendues :

1. La digestion de l'allèle A1 du gène *gys* par l'enzyme Xba I donne 3 fragments de restriction de longueurs 23 kb, 6,8 kb et 5,3 kb (**doc. 2**). On peut en déduire que l'allèle A1 possède deux sites de restriction Xba I. L'allèle A2 est digéré en 4 fragments de 23 kb, 5,3 kb (fragments observés après digestion de l'allèle A1), 5,1 kb et 1,7 kb (à la place du fragment de 6,8 kb obtenu par digestion de l'allèle A1). L'allèle A2 possède donc un site Xba I supplémentaire, situé dans le fragment de 6,8 kb de l'allèle A1. On peut poser l'hypothèse que l'un des deux allèles dérive de l'autre par une mutation (substitution, addition, délétion) qui a fait apparaître (si A2 dérive de A1) ou disparaître (si A1 dérive de A2) une séquence nucléotidique TCTAGA (**doc. 1**), cible de XbaI.

2. D'après le **doc. 3**, l'allèle A1 est largement majoritaire dans la

population finlandaise non diabétique : 92 % des individus sont homozygotes A1A1, et 8 % des individus ont une ou deux copies de l'allèle A2. Dans la population DT2, la fréquence des génotypes A1A2 et A2A2 est presque 4 fois plus importante (30 %). La probabilité est plus grande de développer la maladie chez un individu possédant l'allèle A2 que chez un individu ne le possédant pas : l'allèle A2 est donc un allèle de susceptibilité au DT2.

⑧ DIABÈTE DE TYPE 2 ET CONTRÔLE DE LA GLYCÉMIE

Mettre en relation des informations.

Réponses attendues :

1. L'hémoglobine glycosylée HbA1C est une molécule d'hémoglobine ayant fixé du glucose. Une hyperglycémie chronique se traduit par un taux sanguin d'HbA1C élevé (supérieur à 7 %). Alors que la glycémie peut fluctuer fortement chez un diabétique, en fonction de l'heure de la journée, des prises alimentaires et de l'activité physique, le taux d'HbA1C reflète la glycémie moyenne au cours des 3 mois précédant la mesure. C'est donc un paramètre biologique intéressant en diabétologie, qui renseigne sur la qualité de l'équilibre glycémique du patient de façon plus fidèle qu'une mesure de glycémie isolée.

2. Dans l'expérience rapportée au **doc. 1**, tous les patients DT2 avaient initialement un taux d'HbA1C compris entre 7 et 9 % (pour information, cela correspond à une glycémie moyenne comprise entre 1,7 et 2,4 g.L⁻¹). Leur équilibre glycémique n'était donc pas satisfaisant. Dans le groupe de patients ayant bénéficié d'un suivi intensif, le taux d'HbA1C a diminué et est passé en dessous de 7 % chez 57,1 % des individus après 3 mois de suivi. Pour comparaison, dans le groupe de patients ayant reçu un accompagnement standard, 33,3 % des individus avaient un taux d'HbA1C inférieur à 7 % après 3 mois. Le suivi intensif, plus personnalisé, permet donc une meilleure amélioration de l'équilibre glycémique des patients que le suivi standard. Cette amélioration est aussi plus durable, comme en témoignent les résultats après 6 mois de suivi. On peut proposer que le suivi intensif, plus personnalisé, permet l'acquisition de réflexes comportementaux, alors que les individus peu suivis finissent par oublier les conseils donnés hors contexte individuel et reviennent peu à peu à leurs habitudes initiales.

L'incidence cumulée de la rétinopathie diabétique augmente bien entendu au cours du temps (par définition), mais de façon plus importante chez les individus ayant eu un suivi standard que chez ceux ayant bénéficié d'un suivi intensif (**doc. 2**) : neuf ans après le début de l'étude, presque 5 fois plus de patients sont atteints dans le groupe ayant eu l'accompagnement standard (58 %) que dans celui ayant eu le suivi intensif (12 %). On peut proposer la chaîne de causalité suivante : le suivi intensif se traduit par une meilleur contrôle de la glycémie (**doc. 1**), qui lui-même limite les risques de développer une rétinopathie diabétique, et probablement d'autres pathologies associées au diabète.

⑨ LE PANCRÉAS ARTIFICIEL

Esprit critique.

Réponses attendues :

1. Il est conseillé aux diabétiques de type 2 d'avoir une alimentation équilibrée, associée à une activité physique. Ils peuvent éventuel-

lement prendre des médicaments hypoglycémisants ou stimulant la sécrétion d'insuline. Enfin, chez des personnes atteintes de DT2 aggravé, chez lesquelles la sécrétion d'insuline est faible à nulle, les thérapies seront similaires à celles des diabétiques de type 1 : il faut un apport d'insuline ou une greffe de pancréas ou d'îlots pancréatiques. Les diabétiques de type 1 doivent également suivre un régime alimentaire. L'administration d'insuline peut se faire grâce à des stylos ou des pompes à insuline.

2. L'administration d'insuline par pompe ne permet pas d'éviter les piqûres au bout du doigt pour effectuer les contrôles glycémiques et elle peut aussi provoquer des hypoglycémies, si les apports d'insuline exogène sont mal dimensionnés à la prise alimentaire et à l'activité physique.

3. Le pancréas artificiel est composé d'un glucomètre sous-cutané fonctionnant en continu. Les piqûres au doigt pour mesurer la glycémie ne sont donc plus nécessaires. Il contient également deux pompes qui injectent sous la peau non seulement de l'insuline hypoglycémisante, mais aussi du glucagon hyperglycémiant. Les doses des hormones sont calculées à chaque instant par l'ordinateur en fonction des données reçues du glucomètre. Ce « pancréas » mime plus donc étroitement l'activité du pancréas endocrine normal et permet d'éviter les hypoglycémies.

4. Pour que le pancréas artificiel puisse être utilisé par les malades en routine, la taille de l'ordinateur doit être considérablement réduite. Des tests où le programme informatique est exécuté par une minuscule puce électronique sont en cours.

⑩ LE DIABÈTE MODY

B2i.

Réponses attendues :

L'allèle normal et l'allèle muté (associé au diabète MODY 2) du gène de la glucokinase ont le même nombre de nucléotides dans leur partie codante. Leurs séquences sont identiques, à l'exception du 835e nucléotide, qui comporte une base azotée thymine dans l'allèle muté au lieu d'une guanine dans l'allèle normal. L'allèle muté porte donc une mutation G835T. En conséquence, un triplet GAG de l'allèle normal devient TAG dans l'allèle responsable du diabète MODY 2.

À l'aide du code génétique (icône « AUG » dans la barre des tâches), on peut rechercher l'acide aminé codé par le triplet modifié chez l'individu MODY 2 (*Une lecture de trois en trois des nucléotides est possible après avoir cliqué au début de la séquence et choisi dans Options, Règle en triplets*) :

	Allèle normal	Allèle muté responsable du diabète MODY 2
279 ^e codon du gène de la glucokinase		
(brin non transcrit = brin codant)	GAG	TAG
279 ^e codon de l'ARN messager	GAG	UAG = codon stop
279 ^e acide aminé de la glucokinase	Glu (acide glutamique)	

On s'attend donc à ce que la protéine anormale soit tronquée après le 278^e acide aminé. On peut, dans Anagène, afficher la séquence des protéines issues de l'expression des deux allèles : pour cela, on sélectionne les séquences nucléotidiques, on les convertit en séquences protéiques et on demande de placer le résultat dans la fenêtre d'affichage. On constate que le polypeptide codé par l'allèle muté est effectivement plus court que le polypeptide normal : il ne comporte que 278 acides aminés.

Or, la glucokinase est une protéine hépatique intervenant dans l'utilisation du glucose après un repas. On peut penser que la protéine tronquée n'est pas fonctionnelle, et que cette utilisation est perturbée. Le métabolisme du glucose dans d'autres organes que le foie, comme les muscles, n'est a priori pas touché, mais le glucose se maintient plus longtemps dans le sang après un repas, d'où une hyperglycémie caractéristique d'un diabète.

Objectif Bac

[pp. 204 à 207 du manuel]

1 LA SPÉCIFICITÉ DE L'ENZYME GLUCOSE-OXYDASE

Réponse attendue :

La GOX est une enzyme qui catalyse l'oxydation du glucose. On s'intéresse à la spécificité de cette enzyme : spécificité vis-à-vis du substrat, et spécificité d'action.

DOC. 1 Lorsqu'on injecte l'enzyme GOX dans la solution de glucose, la concentration en dioxygène dans le milieu de réaction diminue rapidement. Cela signifie que la réaction d'oxydation catalysée par l'enzyme se produit et consomme le dioxygène présent dans le milieu. En revanche, on observe que ni avec le fructose, ni avec le galactose, un tel phénomène ne se produit : la concentration en dioxygène ne varie pas (il n'y a pas de rupture de pente suite à l'injection de la GOX).

DOC. 2 Les modèles moléculaires des 3 glucides montrent qu'ils ont, outre la même formule brute, une structure spatiale très proche (surtout le glucose et le galactose).

DOC. 3 On observe que le remplacement d'un acide aminé du site actif entraîne une diminution du $V_{\max}$ (divisé par 3 pour la mutation R516K, et même par 30 pour la mutation R516Q) et une augmentation du K_m (multiplié par 90 et 120 respectivement, pour ces deux mutations). Cela signifie que les mutations réalisées entraînent une diminution de l'activité catalytique de l'enzyme et de l'affinité pour son substrat.

DOC. 4 Ce document montre la structure du site actif de la GOX normale et des deux versions mutées. On observe que la conformation spatiale du site actif change, et ce de façon plus marquée avec la mutation R516Q qu'avec R516K. De plus, la position relative du glucose et du FAD est considérablement modifiée par ces mutations. Or, l'oxydation du glucose est couplée à la réduction du FAD, ce qui nécessite une disposition particulière de ces deux molécules au niveau du site actif.

EN CONCLUSION, on peut observer que la GOX est très spécifique vis à vis de son substrat le glucose, puisque qu'elle ne peut pas agir avec des glucides de structure extrêmement proche, comme

le fructose ou surtout le galactose. Cette spécificité est liée à la composition en acides aminés de son site actif, qui en détermine la conformation spatiale. En effet, le changement expérimental d'un seul acide aminé du site actif entraîne un changement dans la structure de ce site, et se traduit par une baisse d'affinité pour le substrat de l'enzyme. La spécificité d'action de la GOX, qui est une oxydo-réductase, est due à sa capacité à coupler l'oxydation du glucose avec la réduction d'un accepteur d'électrons, le FAD. Cette spécificité d'action est elle aussi liée à la structure du site actif, puisque l'activité catalytique de l'enzyme est affectée par des mutations des acides aminés du site actif modifiant la position relative du FAD et du glucose. La GOX a donc une double spécificité déterminée par la structure de son site actif.

2 ACTIVITÉ DES INSULINES ANIMALES CHEZ L'HOMME

Réponse attendue :

L'insuline utilisée dans le traitement de certains diabètes est aujourd'hui produite par des bactéries génétiquement modifiées. Mais pendant des décennies, l'industrie pharmaceutique a extrait l'insuline du pancréas d'animaux, principalement des bœufs et des porcs. On cherche à expliquer pourquoi l'insuline de ces animaux est active chez l'Homme.

Le **doc. 1** rappelle la structure de l'insuline humaine. Cette protéine est constituée de deux chaînes polypeptidiques (A et B) de 21 et 30 acides aminés respectivement. Certains acides aminés sont essentiels au maintien de la structure de la protéine : c'est le cas des 6 cystéines (C) qui établissent entre elles des liaisons covalentes participant à la cohésion d'ensemble de l'insuline. D'autres acides aminés sont impliqués dans la liaison entre l'insuline et son récepteur. Ces acides aminés sont essentiels à la fonction de l'insuline.

Le tableau du **doc. 2** permet de comparer les séquences d'acides aminés de l'insuline de 5 espèces de Vertébrés. Après avoir reporté dans ce tableau les informations du **doc. 1** sur le rôle des différents acides aminés, on constate que les acides aminés fortement impliqués dans le maintien de la structure de l'insuline, ou dans sa liaison à son récepteur, sont identiques pour les 5 espèces de Vertébrés (du fait d'une contre-sélection des mutations affectant ces acides aminés). Les acides aminés de moindre importance sont plus variables d'une espèce à l'autre. Les contraintes fonctionnelles sur l'insuline expliquent que sa séquence soit très conservée d'une espèce à une autre.

Le **doc. 3** montre la sensibilité de cellules adipeuses humaines isolées à la concentration d'insuline dans leur milieu. Pour les 3 insulines animales testées, la consommation de glucose par les cellules adipeuses augmente en fonction de la concentration d'insuline (c'est l'une des raisons de l'effet hypoglycémiant de l'insuline, in vivo). Toutefois, l'insuline de cochon d'Inde est moins active sur les cellules humaines que l'insuline de saumon, elle-même moins active que l'insuline de porc. Cela peut être mis en relation avec la proximité des séquences de ces insulines et de l'insuline humaine : plus les séquences diffèrent, moins l'insuline animale est active.

Le **doc. 4** montre les conséquences de quelques mutations de la chaîne A de l'insuline sur son affinité pour son récepteur. On constate

que certaines mutations n'affectent pas cette affinité : c'est le cas de la mutation T8A et de la mutation I10V, qui toutes deux différencient l'insuline humaine et l'insuline de bœuf. En conséquence, l'insuline de bœuf, bien qu'ayant 3 acides aminés différents de ceux de l'insuline humaine, est très active chez l'Homme. D'autres mutations, à l'inverse, ont des conséquences importantes sur l'affinité insuline-récepteur. C'est le cas de deux mutations qui distinguent l'insuline humaine et celle du saumon : L13I (80 % de l'affinité normale) et Q15D (68 % de l'affinité normale).

EN CONCLUSION, l'insuline de certains animaux peut être utilisée chez l'Homme car elle a une séquence très semblable à celle de l'Homme. L'hormone animale se fixe au récepteur à l'insuline humain, en particulier si les rares mutations affectent des acides aminés sans rôle fonctionnel majeur. Malgré cela, l'insuline animale n'est plus utilisée actuellement, notamment pour des raisons de risque allergique, et de quantité disponible.

3 DIAGNOSTIC ET SUIVI DES DIABÈTES

Réponse attendue :

Diagnostiquer le type précis de diabète dont un patient est atteint n'est pas toujours évident. On cherche à montrer comment le dosage du peptide-C peut être un indicateur du type et de l'évolution d'un diabète.

Le **doc. 1** présente l'origine du peptide-C : situé à la jonction entre les futures chaînes A et B de l'insuline, il est libéré lors de la maturation de son précurseur la proinsuline. En conséquence, autant de molécules de peptide-C et d'insuline sont sécrétées par les cellules. Cela ne signifie pas que le taux de peptide-C sanguin égale celui de l'insuline : en effet, la demi-vie plasmatique de l'insuline est plus courte (5 minutes) que celle du peptide C (15 minutes). Les fluctuations de l'insulinémie sont donc plus importantes que celles du taux de peptide-C.

Le **doc. 2** nous précise que le dosage de l'insuline endogène (sécrétée par le pancréas) peut être perturbé par différents facteurs. Chez les individus DT1, la présence d'anticorps anti-insuline dans le sang peut rendre l'insuline en partie inaccessible lors du dosage. De plus, le dosage prend aussi en compte l'insuline exogène (injectée), chez les personnes qui s'administrent l'hormone (DT1 ou DT2 aggravé). Le taux de peptide C sanguin est donc un meilleur reflet de la capacité d'insulino-sécrétion du pancréas que le taux d'insuline.

Le **doc. 3** nous apprend que le taux de peptide-C dans le sérum sanguin est différent chez les individus diabétiques DT1 ou DT2 et chez des non diabétiques. Il peut donc être indicateur d'un diabète et de son type. Les diabétiques de type 1 ou de type 2 aggravé sécrètent, à jeun, moins de peptide-C que les individus non diabétiques ($< 1 \mu\text{g.L}^{-1}$ contre $1 \text{ à } 5 \mu\text{g.L}^{-1}$). La faible sécrétion d'insuline est liée, pour le DT1, à la destruction auto-immune des cellules β pancréatiques. Pour le DT2, elle traduit la diminution de la masse fonctionnelle β au cours de la maladie. À jeun, après une injection de glucagon, hormone qui provoque une augmentation de la glycémie (**doc. 3 p.172**), la sécrétion de peptide-C est multipliée par 2 à 3 chez les non diabétiques alors qu'elle augmente moins et reste < 2 chez les diabétiques de type 1 et de type 2 aggravé. Un taux de peptide C (mesuré à jeun ou à jeun avec injection de

glucagon) anormalement faible est donc un élément de diagnostic d'un DT1 ou un DT2 aggravé.

On a mesuré les valeurs moyennes du taux de peptide-C chez des individus ayant déclaré leur DT1 moins de 100 jours avant le début de l'étude (**doc. 4**). Dans les 12 mois suivant le début du suivi, ce taux diminue passant de $1,9 \text{ à } 1 \mu\text{g.L}^{-1}$, ce qui est cohérent avec la destruction auto-immune des cellules β pancréatiques qui continue après la déclaration de la maladie, puisque les symptômes apparaissent lorsque 80 à 90 % des cellules β sont détruites (**doc. 5 page 191**). Pour un même temps après le début de l'année de suivi, il y a un faible écart type par rapport à la valeur moyenne. Le taux de peptide-C, comparé aux valeurs de référence que peuvent constituer les données du **doc. 4**, peut donc être un indicateur de l'évolution d'un diabète de type 1, voire permette de distinguer un DT1 et un DT2 aggravé.

Chez les DT2 en début d'évolution, le taux de peptide-C est normal à élevé à jeun ou à jeun après injection de glucagon (doc. 3). Un taux de peptide-C élevé indique donc un DT2 en début d'évolution.

En conclusion, le dosage du peptide C est un indicateur de la sécrétion d'insuline et donc du type de diabète. Une sécrétion faible à nulle de peptide-C et donc d'insuline est indicatrice d'un DT1 ou d'un DT2 aggravé, une sécrétion normale à élevée est indicatrice d'un DT2 en début d'évolution. Aux côtés d'autres paramètres comme l'âge, la masse du patient et les symptômes, le dosage du peptide-C peut donc participer au diagnostic des diabètes, et au suivi de leur évolution.

4 MODE D'ACTION D'UNE MOLÉCULE ANTIDIABÉTIQUE : L'ACARBOSE

Réponse attendue :

L'acarbose est une molécule utilisée dans le traitement du diabète de type 2. On cherche à mettre en évidence ces propriétés anti-diabétiques, et à les interpréter.

On observe dans le **doc. 2** que chez des patients diabétiques, l'augmentation de la glycémie postprandiale est moins importante après une prise orale d'acarbose que chez des patients témoins. La glycémie maximale est d'environ 155 % de la valeur préprandiale, alors que chez les témoins, cette valeur est de 180%. En outre, l'acarbose a pour effet de modérer l'augmentation de l'insulinémie suite au repas : l'insulinémie double chez les patients ayant pris de l'acarbose, alors qu'elle triple chez les témoins. Ainsi, l'acarbose semble efficace pour réduire l'hyperglycémie et l'hyperinsulinémie postprandiales observées classiquement dans un diabète de type 2. D'après le **doc. 1**, l'acarbose est constitué d'une chaîne de deux oses et deux dérivés d'oses. Il a donc une structure proche de celle d'un fragment d'amidon ou d'un oligosaccharide. Or, le **doc. 4** montre qu'il peut se loger dans le site actif d'une hydrolase digestive : l'amylase. On peut donc supposer que l'acarbose, en occupant le site actif de l'amylase, inhibe cette enzyme digestive, et ralentit la digestion de l'amidon, ce qui pourrait rendre compte de l'effet anti-diabétique de la molécule.

Les résultats du **doc. 3** permettent de tester cette hypothèse : *in vitro*, l'activité de deux hydrolases digestives, l'amylase et la maltase, a été mesurée en présence de différentes concentrations d'acarbose. On constate que l'acarbose a un fort effet inhibiteur sur

ces deux enzymes. Par exemple, avec 500 µg/mL d'acarbose dans le milieu réactionnel, l'α-amylase et la maltase ont respectivement une activité résiduelle de seulement 10 % et 30 % de leurs activités sans acarbose. L'acarbose a donc un effet inhibiteur sur au moins deux hydrolases intervenant dans la digestion des glucides. On peut donc proposer un mécanisme d'action pour cette molécule : l'acarbose inhibe l'activité de l'α-amylase et de la maltase (et peut-être celle d'autres enzymes dont il mimerait aussi le substrat), dans le tube digestif. Ainsi, l'hydrolyse de l'amidon en glucose

est ralentie, ce qui se répercute sur son absorption intestinale. L'hyperglycémie postprandiale est alors limitée, ainsi que le pic d'insulinémie.

(On peut signaler que l'acarbose a des effets indésirables : une partie des glucides alimentaires atteint le colon au lieu d'être absorbée au niveau intestinal. Des bactéries présentes dans le colon consomment ces glucides et se développent, ce qui peut provoquer des flatulences et des diarrhées).