

Réviser son bac

avec **Le Monde**

PROGRAMME
2015

SVT Sciences de la vie et de la Terre

Term S



L'ESSENTIEL DU COURS

- Des fiches synthétiques
- Les points et définitions clés du programme
- Les repères importants

DES SUJETS DE BAC

- Des questions types
- L'analyse des sujets
- Les plans détaillés
- Les pièges à éviter

DES ARTICLES DU MONDE

- Le texte intégral des articles du *Monde*
- Un accompagnement pédagogique des articles

UN GUIDE PRATIQUE

- La méthodologie des épreuves
- Astuces et conseils de révisions

Antilles 7,90 €, Réunion 9,80 €,
Maroc 80 DH, Tunisie 10,30 DT.

M 05407 - 4H - F: 7,90 € - RD




rue des écoles

En partenariat avec



Réviser son bac avec *Le Monde*

Sciences de la vie et de la Terre T^{erm} S

Une réalisation de  rue des écoles

Avec la collaboration de :

Manon Corbin
Marie-Noël Morin-Ganet
Sandrine Henry
Mary Sroda

En partenariat avec



AVANT-PROPOS

Cet ouvrage, consacré au programme spécifique de Sciences de la vie et de la Terre de terminale S et conçu par des professeurs enseignant ce niveau, constitue une préparation originale et efficace à l'épreuve écrite du baccalauréat en SVT.

Pour vous préparer au mieux au baccalauréat, vous trouverez à la fin de l'ouvrage, dans le *Guide pratique*, la présentation détaillée de l'épreuve de SVT, les exigences des correcteurs et des recommandations – y compris des conseils de méthode et d'organisation – pour réussir cette épreuve.

Dans la double page de *L'essentiel du cours*, les principales notions de chaque chapitre, accompagnées de schémas, sont expliquées et présentées de manière structurée et synthétique, dans le respect du contenu et de l'esprit du programme officiel de SVT de terminale S. Dans les colonnes, sont précisément définis les mots et les notions clés du cours et des *zoom sur* certains points du programme vous permettent d'approfondir vos connaissances.

Dans *Un sujet pas à pas*, un sujet complet vous est proposé, accompagné de son corrigé et des conseils de l'enseignant sur les principaux pièges à éviter. Pour chaque chapitre, c'est l'un des trois exercices de l'épreuve écrite de SVT qui est traité. L'ensemble des sujets couvre les différents exercices de l'épreuve écrite de SVT au baccalauréat : partie 1 (restituer ses connaissances lors d'une question de synthèse ou d'un QCM), partie 2 exercice 1 (raisonner dans le cadre d'un problème scientifique) et partie 2 exercice 2 (pratiquer une démarche scientifique). Cette rubrique se révèle donc être un outil efficace pour s'entraîner tout au long de l'année à l'épreuve du baccalauréat.

Pour chaque chapitre, des articles issus du quotidien *Le Monde*, ont été sélectionnés pour leur intérêt et leur pertinence au regard d'une ou de plusieurs notions abordées dans le cours. Il s'agit d'articles récents, qui montrent combien les problématiques des Sciences de la vie et de la Terre s'inscrivent dans l'actualité, suscitent des polémiques ou des controverses, que ce soit dans le domaine de la santé ou dans celui de l'environnement. Ces articles montrent également la rapidité de l'évolution des connaissances en biologie et en géologie notamment. Les articles choisis vous permettent d'approfondir les notions du cours, d'étayer vos propos lors des épreuves, grâce à des exemples issus du *Monde*, d'alimenter votre réflexion critique et, finalement, d'appréhender les sciences comme un savoir toujours en construction.

Cet ouvrage est une aide précieuse pour réussir l'épreuve de SVT, et au-delà, pour découvrir la richesse des Sciences de la vie et de la Terre.

M.-N. M.-G.

Message à destination des auteurs des textes figurant dans cet ouvrage ou de leurs ayants-droit : si malgré nos efforts, nous n'avons pas été en mesure de vous contacter afin de formaliser la cession des droits d'exploitation de votre œuvre, nous vous invitons à bien vouloir nous contacter à l'adresse plusproduit@lemonde.fr.

En partenariat avec



Complétez vos révisions du bac sur www.assistancescolaire.com :
méthodologie, fiches, exercices, sujets d'annales corrigés... des outils gratuits et efficaces
pour préparer l'examen.

Edité par la Société Editrice du Monde – 80, boulevard Auguste Blanqui – 75013 Paris

Tél : +(33)01 57 28 20 00 – Fax : +(33) 01 57 28 21 21

Internet : www.lemonde.fr

Président du Directoire, Directeur de la Publication : Louis Dreyfus

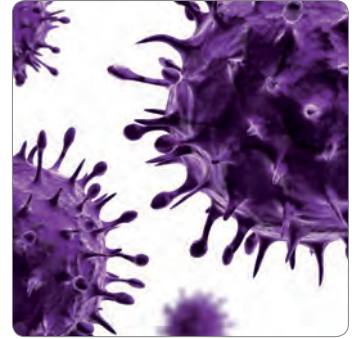
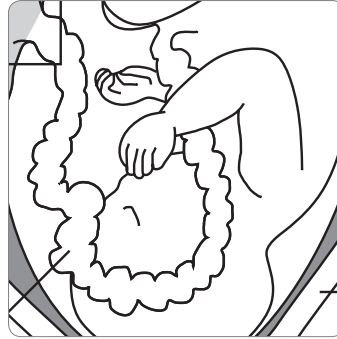
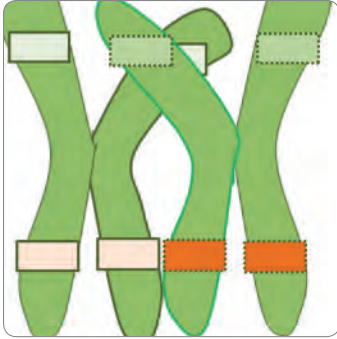
Directeur de la rédaction : Gilles Van Kote

Dépôt légal : mars 2015 - Imprimé par Maury - Achevé d'imprimer : mars 2015

Numéro hors-série réalisé par Le Monde - © Le Monde – rue des écoles 2015

GÉNÉTIQUE ET ÉVOLUTION	p. 5
chapitre 01 – Le brassage génétique et sa contribution à la diversité génétique	p. 6
chapitre 02 – Diversification génétique et diversification des êtres vivants	p. 12
chapitre 03 – De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité	p. 18
chapitre 04 – Un regard sur l'évolution de l'homme	p. 24
chapitre 05 – Les relations entre organisation et mode de vie, résultat de l'évolution : l'exemple de la vie fixée chez les plantes	p. 30
LE DOMAINE CONTINENTAL ET SA DYNAMIQUE	p. 37
chapitre 06 – La caractérisation du domaine continental : lithosphère continentale, reliefs et épaisseur crustale	p. 38
chapitre 07 – Contexte de la formation des chaînes de montagnes et disparition des reliefs	p. 44
chapitre 08 – Le magmatisme en zone de subduction : une production de nouveaux matériaux continentaux	p. 50
ENJEUX PLANÉTAIRES CONTEMPORAINS	p. 55
chapitre 09 – Géothermie et propriétés thermiques de la Terre	p. 56
chapitre 10 – La plante domestiquée	p. 60
LE MAINTIEN DE L'INTÉGRITÉ DE L'ORGANISME : QUELQUES ASPECTS DE LA RÉACTION IMMUNITAIRE	p. 65
chapitre 11 – La réaction inflammatoire, un exemple de réponse innée	p. 66
chapitre 12 – L'immunité adaptative, prolongement de l'immunité innée	p. 72
chapitre 13 – Le phénotype immunitaire au cours de la vie	p. 78
NEURONE ET FIBRE MUSCULAIRE : LA COMMUNICATION NERVEUSE	p. 83
chapitre 14 – Le réflexe myotatique, un exemple de commande réflexe du muscle	p. 84
chapitre 15 – Motricité volontaire et plasticité cérébrale	p. 88
LE GUIDE PRATIQUE	p. 93

GÉNÉTIQUE ET ÉVOLUTION



MOTS CLÉS

ALLÈLES

Versions différentes d'un même gène, caractérisées par de légères différences au niveau de leur séquence nucléotidique.

CHROMOSOMES HOMOLOGUES

Chromosomes appartenant à une même paire dans le caryotype d'une espèce diploïde. Ils portent les mêmes gènes, au même locus, mais pas forcément les mêmes allèles.

DIPLOÏDE (2N)

Qui possède deux représentants homologues de chaque chromosome, c'est-à-dire des paires de chromosomes.

GAMÈTE

Cellule reproductrice haploïde (ovule chez la femelle, spermatozoïde chez le mâle).

HAPLOÏDE (N)

Qui possède un seul exemplaire de chaque chromosome.

ZOOM SUR...

LE BRASSAGE INTERCHROMOSOMIQUE

Il correspond à la migration indépendante des différentes paires de chromosomes au cours de la première division de méiose. On peut le mettre en évidence en analysant les résultats de croisements étudiant des gènes portés par des paires de chromosomes différents (gènes indépendants).

LE BRASSAGE INTRACHROMOSOMIQUE

Il augmente la diversité des gamètes en formant des chromatides recombinés par *crossing-over* en prophase de première division de méiose. Les gamètes de type recombiné possèdent une nouvelle combinaison d'allèles qu'aucun des parents ne présentait. On peut mettre en évidence ce brassage en analysant les résultats de croisements étudiant des gènes portés par une même paire de chromosomes (gènes liés).

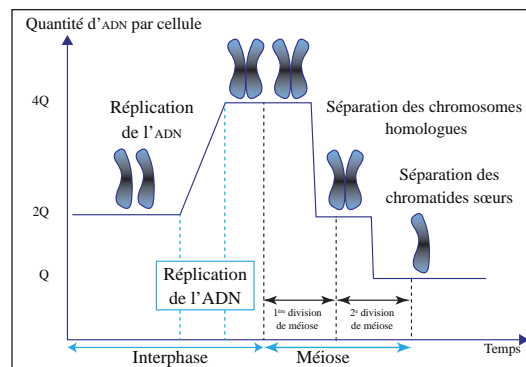
Le brassage génétique et sa contribution à la diversité génétique

Tous les individus appartenant à une même espèce possèdent le même nombre de chromosomes et les mêmes gènes, occupant la même position le long de l'ADN. Au cours de l'évolution, des mutations peuvent conduire à l'apparition de différentes versions des gènes : les allèles. Différents brassages au cours de la reproduction sexuée expliquent que chaque individu (hormis les jumeaux vrais) soit génétiquement unique, c'est-à-dire possède une combinaison unique d'allèles.

Une multitude de gamètes différents

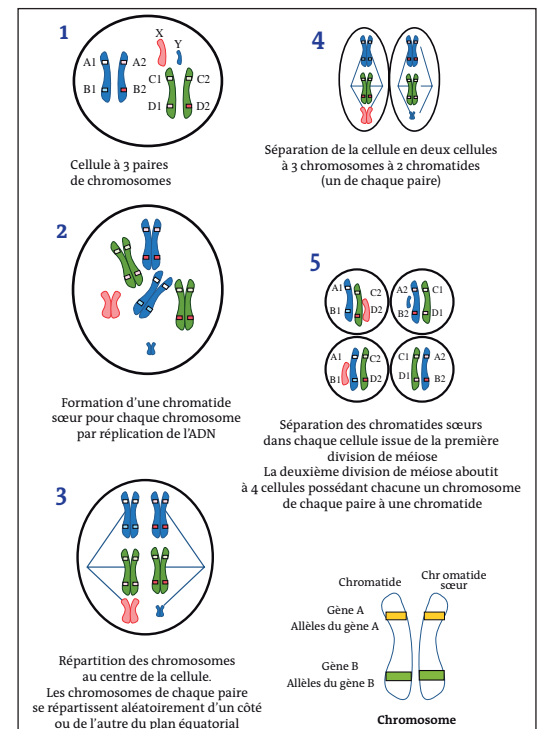
Chez les organismes diploïdes, la reproduction sexuée implique la formation de cellules reproductrices, ou **gamètes haploïdes**, contenant chacune la moitié de l'information génétique de l'individu qui les produit. À l'exception des gamètes, chacune des cellules d'un organisme diploïde possède des paires de chromosomes homologues : l'un d'origine paternelle et l'autre d'origine maternelle. La première étape de la formation des gamètes est une double division cellulaire appelée **méiose**, qui permet d'obtenir quatre cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde. Elle est précédée d'une copie à l'identique du matériel génétique (**réplication de l'ADN**). Chaque chromosome

homologues se placent côte à côte : ils s'apparient. En **métaphase I** (3), les chromosomes se disposent sur le plan équatorial, au centre de la cellule. En **anaphase I**, les deux chromosomes de chaque paire se séparent et migrent chacun aléatoirement vers l'un des pôles de la cellule. Les chromosomes d'origine paternelle ou maternelle se répartissent au hasard, les paires étant indépendantes les unes des autres. C'est le brassage interchromosomique. En fin de **télophase I**, deux cellules haploïdes, ne



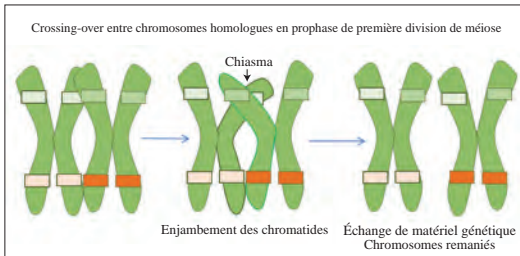
Variation de la quantité de matériel chromosomique lors de la méiose

passent alors d'une chromatide à deux chromatides sœurs. La méiose est une double division cellulaire (2). La **première division de méiose** se déroule en plusieurs étapes. Au cours de la **prophase I**, les chromosomes se condensent, puis **les chromosomes**



portant plus qu'un seul chromosome de chaque paire, sont formées (4).

La **seconde division** de méiose ressemble à une mitose : les deux chromatides sœurs de chaque chromosome sont séparées. Une cellule en méiose donnera donc quatre cellules différentes, contenant une copie de chaque gène, soit l'allèle d'origine paternelle, soit l'allèle d'origine maternelle (5).



Le brassage intrachromosomique

Les chromosomes homologues sont si étroitement accolés lors de la prophase I que des échanges de matériel génétique peuvent se produire entre chromatides : c'est le brassage intrachromosomique. Au hasard, les chromatides chevauchants se coupent, puis le bras coupé se ressoude avec l'autre chromatide. C'est le **crossing-over**.

Ainsi, à partir d'une cellule mère de gamètes mâles, on obtient quatre spermatozoïdes génétiquement différents. Pour les gamètes femelles, les divisions sont inégales car seule une cellule garde tout le cytoplasme ; les autres dégèrent. Si dans les gamètes mâles la méiose est achevée, pour les gamètes femelles, la méiose est arrêtée en cours de processus et s'achèvera après la fécondation (avant la fécondation on parle donc d'**ovocyte** et non d'**ovule**).

Le hasard de la fécondation

Les brassages au cours de la méiose permettent d'obtenir une grande diversité de gamètes contenant chacun **une combinaison unique et nouvelle d'allèles**. Chez chaque parent, un seul de ces gamètes sera impliqué dans la fécondation.

Dans une fratrie humaine, la probabilité que deux individus non jumeaux vrais soient génétiquement identiques est quasiment nulle.

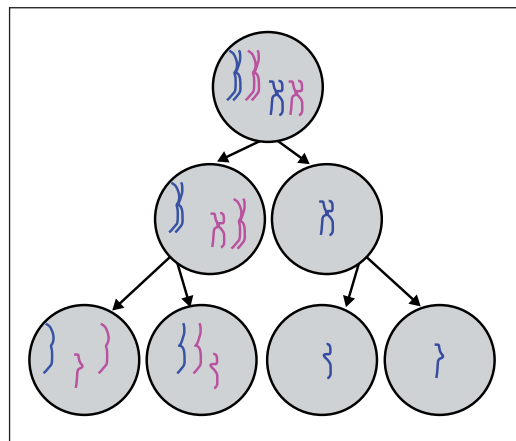
Dans l'espèce humaine, la migration indépendante des chromosomes (**brassage interchromosomique**) permet théoriquement la formation de 2^{23} types de gamètes différents et la rencontre au hasard avec un gamète de l'autre sexe conduit à chaque fécondation à $(2^{23})^2$, soit 70 000 milliards de combinaisons possibles pour **une cellule-œuf ou zygote**. Ce chiffre est très sous-évalué car il ne tient pas compte du brassage intrachromosomique dû aux **crossing-over**. Une quasi-infinité de combinaisons génétiques différentes sont en réalité possibles.

Toutefois, seule une fraction de ces zygotes est viable et peut poursuivre son développement. **Une anomalie chromosomique** peut par exemple em-

pêcher le déroulement des divisions de l'embryon et conduire à un avortement spontané.

Les anomalies au cours de la méiose : sources de troubles mais aussi de diversification

Lors de la méiose, deux chromosomes (**méiose I**) ou deux chromatides (**méiose II**) peuvent migrer vers le même pôle de la cellule. Dans ce cas, certains gamètes porteront **un chromosome de moins**, et d'autres **un chromosome surnuméraire**. Ces gamètes peuvent être féconds, mais le zygote ne possédera pas le nombre de chromosomes spécifique de son espèce : s'il est viable, l'individu sera porteur d'une anomalie chromosomique, comme **une monosomie** (45 chromosomes au lieu de 46) ou **une trisomie** (47 chromosomes).



Anomalie de répartition des chromosomes homologues en première division de méiose : la moitié des cellules filles aura un chromosome surnuméraire, l'autre moitié aura un chromosome en moins

Lors des **crossing-over**, des morceaux de chromatides peuvent être échangés de façon inégale : les gamètes qui résultent de ces divisions peuvent soit ne plus porter certains gènes (on parle de **délétion de gènes**), soit en avoir deux copies (on parle alors de **duplication de gènes**). Si la fécondation implique un gamète portant l'une de ces anomalies, l'embryon peut ne pas survivre ou présenter des malformations dues à cette anomalie génétique. Dans certains cas, la duplication de gènes a permis de créer des familles multigéniques, comme les gènes du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH) ou les gènes codant pour les globines. ■

UN ARTICLE DU MONDE À CONSULTER

• **Chromosomes – Le complexe du « Y »**

p. 10-11

(Florence Rosier, 30 avril 2014)

ZOOM SUR...

LES ANOMALIES CHROMOSOMIQUES

Des perturbations du déroulement de la méiose peuvent conduire à des anomalies chromosomiques dont quelques-unes peuvent être viables : trisomie 21, trisomie 18 (mortalité avant l'âge de 1 an) ou trisomie 13 (décès in utero ou avant 3 mois). Elles peuvent aussi toucher les chromosomes sexuels : trisomie XXY (syndrome de Klinefelter, homme stérile), trisomie XYY, trisomie XXX ou monosomie X (syndrome de Turner, femme stérile).

LES FAMILLES MULTIGÉNIQUES

• Certains ensembles de gènes se caractérisent par de grandes similitudes au niveau de leurs séquences. Ces gènes sont situés à des locus différents sur un même chromosome ou sur des chromosomes différents. Une ressemblance de plus de 20 % n'est pas le fait du hasard, mais d'une parenté. Ces gènes résulteraient de duplications à partir d'un gène ancestral. Ce mécanisme, associé à des mutations qui se produisent de manière indépendante sur les différents duplicatas, permettrait d'expliquer l'existence des familles multigéniques. La duplication d'un gène constitue une source de diversification car la protéine codée par gène peut acquérir de nouvelles fonctions par mutations du gène dupliqué, sans que le gène et la protéine d'origine ne soient affectés.

• L'exemple de la famille des globines chez l'homme.

L'hémoglobine est une protéine constituée de l'association de quatre chaînes polypeptidiques. Au cours de sa vie, l'organisme humain fabrique plusieurs types d'hémoglobines, constituées de chaînes de globines différentes : chaînes zêta, epsilon, alpha, bêta, gamma ou delta. Les six gènes codant pour ces globines sont situés sur des locus différents sur les chromosomes 16 et 11. La comparaison des séquences d'acides aminés des différentes globines permet de constater leur grande ressemblance.

NOTIONS CLÉS

CONVENTIONS D'ÉCRITURE EN GÉNÉTIQUE

En génétique, les différents allèles d'un gène sont désignés par une ou deux lettres.

L'allèle dominant est écrit en majuscule ou minuscule et porte le signe (+) en exposant ; l'allèle récessif est écrit en minuscules et ne porte pas de signe. Ex. : chez la drosophile, les ailes peuvent être vestigiales (allèle vg) ou normales (allèle vg^+). Le phénotype s'écrit entre crochets. Ex. : $[vg^+]$ signifie que la drosophile porte des ailes normales. Le génotype s'écrit entre parenthèses. Les deux allèles que possède l'individu diploïde sont séparés par deux traits dont chacun représente l'un des chromosomes homologues. Ex. : le génotype d'une drosophile hétérozygote s'écrit $(vg^+//vg)$.

CROISEMENT TEST, TEST CROSS

Croisement d'un individu présentant le phénotype dominant avec un homozygote récessif, c'est-à-dire porteur des allèles récessifs des gènes considérés. Le croisement test permet, par l'étude du phénotype des descendants, de mettre en lumière le génotype des gamètes du parent présentant le phénotype dominant.

DOMINANCE/RÉCESSIVITÉ/CODOMINANCE

Lorsque les deux chromosomes homologues portent des allèles différents pour un même gène, celui qui s'exprime au niveau du phénotype est appelé « allèle dominant ». L'autre est récessif. Si les deux allèles s'expriment, comme dans l'exemple du groupe sanguin AB, ils sont dits « codominants ».

HOMOZYGOTE/HÉTÉROZYGOTE

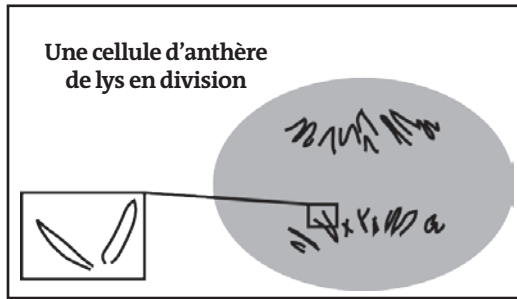
Un individu peut posséder deux allèles identiques pour un gène : il est alors homozygote pour ce gène. S'il possède deux allèles différents, il est hétérozygote.

Partie 1 : La méiose

Le QCM

Cochez la proposition exacte pour chaque question de 1 à 6.

1. Cette photographie représente une cellule à :



- a) $2n = 24$, en anaphase d'une mitose.
- b) $2n = 24$, en anaphase I d'une méiose.
- c) $2n = 12$, en métaphase d'une mitose.
- d) $2n = 12$, en anaphase II d'une méiose.

2. La mitose :

- a) est source de diversité génétique.
- b) donne naissance à 4 cellules à partir d'une cellule.
- c) conserve toutes les caractéristiques du caryotype.
- d) permet la production des gamètes.

3. La méiose produit :

- a) 4 cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde.
- b) 2 cellules diploïdes à partir d'une cellule diploïde.
- c) 4 cellules diploïdes à partir d'une cellule diploïde.
- d) 2 cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde.

4. La réplication de l'ADN a lieu :

- a) entre les deux divisions de la méiose.
- b) uniquement avant une mitose.
- c) uniquement avant une méiose.
- d) avant la première division de la méiose

5. Lors d'une méiose se déroulant sans anomalie, il peut s'effectuer :

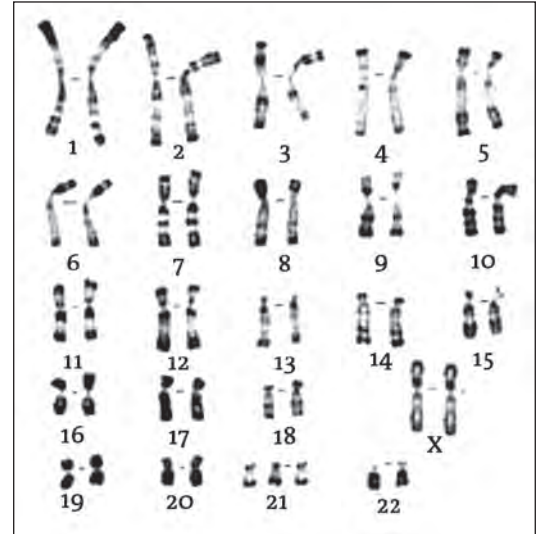
- a) un brassage intrachromosomique entre chromosomes non homologues.
- b) un brassage interchromosomique entre chromosomes homologues.
- c) un brassage interchromosomique puis un brassage intrachromosomique.
- d) un brassage intrachromosomique puis un brassage interchromosomique.

Le document suivant représente le caryotype d'un enfant atteint d'une anomalie chromosomique.

6. Le caryotype ci-dessous peut avoir pour origine :

- a) une duplication du chromosome 21 lors de la méiose.
- b) une non-disjonction de la paire chromosomique n° 21 lors de la division I de la méiose.

- c) une non-disjonction de la paire chromosomique n° 21 lors de la division II de la méiose.
- d) un accident génétique uniquement lors de la formation des gamètes femelles.



Le sujet de question de synthèse

La diversité du vivant a pour origine de nombreux mécanismes dont certains sont d'origine génétique. En prenant comme exemple la transmission de deux gènes liés, montrez comment lors de la méiose il peut s'effectuer un brassage de l'information génétique. Votre exposé sera accompagné de schémas.

Le corrigé

QCM : 1. b), 2. c), 3. a), 4. d), 5. d) 6. b)

L'analyse du sujet de question de synthèse

La précision « deux gènes liés » permet de limiter le sujet au brassage intrachromosomique. Il s'agit alors de trouver un génotype parental pertinent (hétérozygote) pour deux couples d'allèles portés par la même paire de chromosomes, puis de représenter les phases de la méiose appropriées, en insistant sur différents moments de la prophase I (*crossing-over*).

Proposition de corrigé

Introduction : La méiose est définie comme la division cellulaire permettant la production de gamètes haploïdes ne portant qu'un allèle pour chaque gène sur les deux que possède le parent.

Problématique générale : Comment expliquer que des parents ne puissent engendrer que des descendants génétiquement différents ?

Problématique limitée au sujet : Dans le cas de gènes liés, comment expliquer que des descendants

puissent porter des associations d'allèles différentes de leurs parents ?

Point de départ : Une cellule souche de gamète d'un parent hétérozygote pour deux gènes portés par la même paire de chromosomes.

I. Deux gènes liés sont censés migrer ensemble lors de l'anaphase I de la méiose

Résultat : on peut former deux types de gamètes seulement concernant les deux gènes étudiés.

II. Les résultats expérimentaux révèlent des recombinaisons

Les analyses de croisements entre un hétérozygote et un double homozygote récessif effectués en laboratoire, chez la drosophile par exemple, montrent que les parents hétérozygotes produisent en réalité quatre types de gamètes, mais dans des proportions qui ne sont pas équivalentes : une majorité de gamètes « parentaux » et une minorité de gamètes « recombinés » qui portent des associations d'allèles qui n'existaient pas chez le parent.

III. Les échanges entre chromosomes homologues

Les recombinaisons ont lieu en prophase I de méiose, au moment de l'appariement des chromosomes homologues. Des *crossing-over* se forment et les chromosomes échangent des portions de chromatides : c'est le brassage intrachromosomique. Cependant, pour un couple de gènes donné, les recombinaisons homologues n'ont lieu que dans un certain pourcentage des méioses au moment de la formation des gamètes.

Conclusion : L'étude de croisements concernant un couple de gènes liés permet de mettre en évidence le brassage intrachromosomique, qui augmente la diversité possible des gamètes. Si l'on considère l'ensemble des chromosomes et des gènes d'un individu, la combinaison du brassage intrachromosomique et du brassage interchromosomique (migration indépendante des différentes paires de chromosomes en méiose I) permet de produire une infinité de gamètes différents. La fécondation réunira au hasard deux gamètes parmi de nombreuses possibilités. ■

Ce qu'il ne faut pas faire

- Cocher plusieurs réponses par question dans le QCM : une seule est exacte.
- Confondre brassage interchromosomique (métaphase et anaphase I) et brassage intrachromosomique (prophase I).
- Négliger les schémas ou représenter des chromosomes trop petits.
- Se tromper en plaçant les allèles sur les chromosomes de la cellule parentale de départ.
- Omettre d'évoquer le brassage interchromosomique même si, en considérant uniquement deux gènes liés, ce brassage n'est pas visible.
- Traiter la fécondation alors que le sujet ne porte que sur la méiose.

ZOOM SUR...

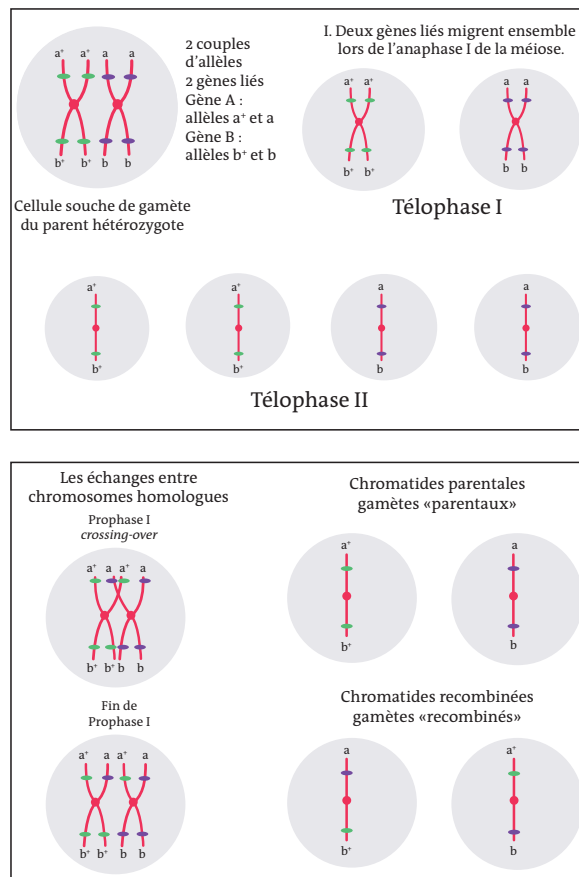
La drosophile, organisme modèle en génétique

La mouche drosophile est devenue un organisme modèle en génétique depuis le début du XX^e siècle. Elle présente notamment l'avantage de n'avoir qu'un petit nombre de chromosomes. Les résultats obtenus ont pu être extrapolés aux autres organismes. Ce sont notamment les travaux sur la drosophile qui ont permis de faire le lien entre les chromosomes et les caractères héréditaires.

DATES CLÉS

L'histoire de la génétique

- 1866 : Mendel, prêtre et botaniste, élabore les premières lois de la transmission des caractères héréditaires.
- 1879 : Fleming observe le comportement des chromosomes au cours de la mitose.
- 1888 : Strasburger observe le comportement des chromosomes au cours de la méiose.
- 1901 : De Vries introduit la notion de mutation.
- 1902 : Sutton et Boveri proposent que les chromosomes soient les porteurs de l'information génétique.
- 1906 : Johanssen introduit le terme « gène » pour désigner un facteur héréditaire.
- 1915 : Morgan apporte les preuves expérimentales de la théorie chromosomique de l'hérédité grâce à ses études sur les drosophiles.
- 1941 : Beadle et Tatum établissent qu'un gène est responsable de la synthèse d'une enzyme (protéine).
- 1944 : Avery, McLeod et McCarty découvrent que l'ADN est le support de l'information génétique chez la bactérie.
- 1953 : Watson et Crick élaborent le modèle de la structure en double hélice de l'ADN grâce aux travaux de Franklin.
- 1959 : Lejeune met en évidence l'anomalie chromosomique de la trisomie 21 (syndrome de Down).
- 1988 : lancement du projet Génome humain.
- 2003 : achèvement du séquençage complet du génome humain.



AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 1 : Synthèse sans documents

– Discutez des conséquences possibles des anomalies survenues lors de la méiose et de la fécondation. (schémas attendus)

Partie 2.1 : Rédigé (tableau à compléter)

– Ordonnez et annotez des clichés d'observation de différentes phases de la méiose.

Partie 2.1 : QCM avec document

– Étude d'un graphique représentant l'évolution de la quantité d'ADN au cours de la méiose et de la fécondation.

Chromosomes – Le complexe du « Y »

C'est le plus petit de nos chromosomes. Le « Y » est l'apanage des hommes. Certains prédisent sa disparition, d'autres soulignent sa résilience. Des études récentes relancent le débat. Premier volet d'une enquête sur science, sexe et genres.

Le chromosome mâle est-il menacé d'extinction ? Si petit mais précieux, tenu mais têtue, le « Y » est-il, comme le prétendent certains généticiens, condamné à s'amenuiser encore et encore, jusqu'à finir par s'effacer ? Ou bien est-il enfin devenu stable et résistant, comme l'affirment d'autres experts ? Depuis une dizaine d'années, le débat, souvent animé, parfois « haut en couleur » mais toujours élégant, oppose les meilleurs spécialistes du domaine. Il est aujourd'hui ravivé par plusieurs études, dont deux publiées le 24 avril dans *Nature*. Confondant paradoxe : c'est un bien chétif chromosome, fragile et peut-être éphémère, qui détermine le sexe fortiche. En soi, le Y est un oxymore : il est le frêle support du sexe fort, le socle gracile du sexe aux muscles si habiles, l'évanescence déterminant du sexe puissant... Bref rappel préliminaire : dans l'espèce humaine aujourd'hui, comme chez la plupart des mammifères placentaires et des marsupiaux, les individus masculins sont XY (dotés d'un chromosome sexuel X et d'un chromosome sexuel Y) et les individus femelles, XX (dotés de deux chromosomes X).

« À votre gauche, le grand et majestueux chromosome X. Sur sa droite, le minuscule et discret chromosome Y... Pourquoi riez-vous ? J'ai passé toute ma carrière scientifique à défendre l'honneur du chromosome Y, face aux insultes qui pleuvaient sur sa nature et ses perspectives d'avenir », témoignait, pince-sans-rire, le très distingué professeur David Page lors d'une conférence TED (*technology, entertainment, design*) à Boston, le 11 janvier 2013. La soixantaine élégante, le directeur du prestigieux *Whitehead Institute* (MIT, Cambridge, Mas-

sachusetts) porte haut le style de Harvard – jusque dans cet accent aristocratique qui signe l'upper-class de la Nouvelle-Angleterre. David Page est surtout l'un des plus éminents spécialistes du chromosome Y. C'est lui qui, en 1999, identifiait la première mutation d'un gène du Y responsable d'une infertilité masculine. Lui qui, en 2003, achevait le séquençage de ce chromosome. L'un des plus brillants défenseurs du plus exigu de nos chromosomes.

Face à lui, en avocate générale : la flamboyante Jenny Graves, 73 ans, qui n'a rien de l'austérité attendue d'un accusateur public. Volontiers provocatrice, elle aussi fait autorité dans son domaine : la génétique évolutive. « Une scientifique très impressionnante », estime Eric Pailhoux, de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) à Jouy-en-Josas (Yvelines). « Une forte personnalité, passionnée et très attachante, mais aussi très respectée », dit Edith Heard, professeure au Collège de France et spécialiste du chromosome X à l'Institut Curie (Paris).

Professeure émérite à l'Université nationale australienne, Jenny Graves prêche depuis plus de dix ans la « fin programmée » du chromosome Y : dans 10 millions d'années, annonçait-elle en 2002 dans *Nature*. Dans cinq millions d'années, prophétise-t-elle depuis 2009, tout en affûtant les arguments de cette sombre prophétie.

Lors d'une « lecture », donnée le 28 janvier 2010 à la Carnegie Institution for Science, à Washington, Jenny Graves décrivait ainsi son approche : « La comparaison entre les mammifères et d'autres vertébrés partageant un lointain ancêtre, tels les kangourous et les ornithorynques, les "diaboles de Tasmanie" [des marsupiaux carnivores à l'apparence de petits

chiens] et les "lézards-dragons", nous aide à retracer l'histoire évolutive de nos chromosomes sexuels, mais aussi à comprendre leur caractère si étrange. Le chromosome X est ainsi rempli de gènes *brain and balls*. »

Brain, en anglais, désigne le cerveau. Quant au mot *balls*, il qualifie – en un terme fleuri que la décence interdit de traduire ici – les glandes génitales mâles. De fait, le chromosome X a accumulé, semble-t-il, des gènes importants dans la cognition et les fonctions reproductives mâles et femelles. Si bien que, dès 2002, Jenny Graves le qualifiait de chromosome « *smart and sexy* » (« intelligent et sexy »). Et la généticienne de poursuivre : « Les gènes du X ont joué un rôle important dans l'évolution rapide de l'espèce humaine. De son côté, le Y humain est devenu un chromosome pathétiquement petit : il a perdu la plupart de ses gènes, hormis le gène de détermination du sexe mâle [le gène SRY]. Il se dégrade rapidement et pourrait bien avoir entièrement disparu dans les prochains millions d'années, avec des conséquences inconnues pour notre espèce. »

Pour comprendre la suite, il nous faut revenir sur la fascinante histoire évolutive de nos chromosomes sexuels. Cette saga débute il y a environ 300 millions d'années. Auparavant, nos très lointains ancêtres étaient-ils hermaphrodites ? Leur sexe était-il déterminé par des facteurs de l'environnement – comme la température, aujourd'hui encore, chez le crocodile ? Quoi qu'il en soit, il n'y avait alors que des chromosomes non sexuels (chromosomes autosomes). Mâles et femelles étaient strictement semblables, d'un point de vue chromosomique.

Mais chez un ancêtre commun à tous les mammifères, il y a 300 millions d'années, la mutation

d'un gène (SOX3) a créé un nouveau gène, SRY, qui a déterminé les caractères du sexe mâle. Ce gène a surgi sur un des chromosomes d'une paire d'autosomes : l'ancêtre primitif du Y, ou « proto-Y ». L'autre chromosome de cette paire est devenu l'ancêtre du X : le « proto-X ». A ce stade, ces deux chromosomes restaient pourtant très semblables, hormis le gène de détermination du sexe.

Mais l'acquisition du gène SRY a entraîné l'accumulation progressive, sur le proto-Y, de mutations. Celles, bénéfiques pour le mâle, ont été conservées. Avec pour effet une divergence croissante entre le proto-Y et le proto-X. Devenus trop différents, ces deux chromosomes ont alors perdu la capacité de se « recombiner » entre eux – c'est-à-dire d'échanger des fragments de chromosome, lors de la formation des cellules reproductives. Or cet échange est crucial pour l'autoréparation des chromosomes.

Le proto-Y ne pouvant plus se recombinaison avec un partenaire, il est devenu vulnérable aux accumulations d'« accidents » génétiques. Il a ainsi collectionné les séquences d'ADN répétées, inversées, amplifiées (« amplicons ») ou en miroir (« palindromes »). D'où le surnom que lui a donné David Page : « *Le Palais de cristal génétique* ». Et cette accumulation a entraîné son amenuisement progressif. « Selon Jenny Graves, lorsqu'un chromosome comme le Y est bourré de séquences répétées, sa dégénérescence est inéluctable », explique Edith Heard. « Car ces séquences répétées ou en miroir se recombinent entre elles. Des boucles se forment, et des fragments d'ADN à l'intérieur de la boucle sont éliminés. » Le chromosome Y a ainsi perdu les deux tiers de son matériel génétique ancestral. Le chromosome X, de son côté, a été préservé : les femelles étant dotées

de deux X, ceux-ci ont conservé la possibilité de se recombiner entre eux – et de s'autoréparer.

Il y a 300 millions d'années, raisonne Jenny Graves, le proto-Y hébergeait environ 1 500 gènes. Or, aujourd'hui, le Y humain ne compte plus que quelques dizaines de gènes : il a perdu 97 % de ses gènes ancestraux. « À ce rythme, calcule Jenny Graves, le chromosome Y aura totalement disparu d'ici à 5 millions d'années. » Ajoutant, implacable : « Si le chromosome Y obtient un succès évolutif, c'est en matière de spirale descendante. »

Publiée dans *Science*, une étude du 24 novembre 2013 semble lui donner raison : chez la souris, seuls deux gènes du Y suffisent pour créer des mâles. L'équipe de Monika Ward (université de Hawaï) a modifié génétiquement des souris, les privant de chromosome Y. Puis les chercheurs ont doté ces souris de seulement deux gènes provenant du Y : le gène SRY, qui gouverne la différenciation des gonades en testicules, et un second gène impliqué dans la fabrication des spermatozoïdes. Or ces souris ont été capables de produire du sperme, avec toutefois des anomalies. Mais les précurseurs de leurs spermatozoïdes, après fécondation in vitro, ont permis la naissance de mâles fertiles.

De son côté, le chromosome X comporte de nombreux gènes essentiels à la spermatogenèse : un rôle qu'on n'attendait pas forcément de ce chromosome. Jenny Graves en déduit que le Y n'est plus indispensable pour assurer ces fonctions « mâles »... Beau joueur, David Page admet cette « double vie » du X. Dans un article publié par son équipe dans *Nature Genetics* le 21 juillet 2013, il montre d'ailleurs que de vastes fragments du chromosome X se sont spécialisés dans la production du sperme. Ainsi, le X humain compte 340 gènes uniquement actifs dans le testicule.

Loin de désarmer, David Page a réuni ses bataillons d'arguments génétiques pour sauvegarder l'honneur en péril du Y. La dégénérescence du chromosome Y, affirme-t-il, a été stoppée il y a

25 millions d'années. Avec Jennifer Hughes, il a comparé les chromosomes Y de l'homme et du Macaque rhésus, dont les ancêtres ont divergé à cette époque. Leur étude montre que le chromosome Y n'a perdu qu'un seul gène au cours des vingt-cinq derniers millions d'années – mais aucun durant le dernier million d'années (*Nature*, 22 février 2012). « Au début de son histoire, le chromosome Y était en chute libre. Ses gènes ont été d'abord perdus à un rythme incroyablement rapide. Mais le Y s'est ensuite redressé et depuis il se porte bien. Cet article détruit l'idée qu'il pourrait disparaître », commentait alors le chevalier servant du chromosome mâle.

La défense du Y peut aussi s'appuyer sur cette étude parue le 9 janvier dans *PLoS Genetics*. Melissa Wilson Sayres, de l'université de Berkeley (Californie), a comparé chez 16 hommes – huit Européens, huit Africains – les séquences d'ADN de 27 gènes du chromosome Y. Et cette comparaison révèle une étonnante conservation. Les auteurs expliquent cette très faible diversité par la « sélection positive » de gènes importants pour le succès reproductif de l'espèce.

Publiés le 24 avril dans *Nature*, deux autres articles font clairement pencher la balance en faveur de la préservation du Y. Dans le commentaire qui accompagne ces études, Andrew Clark (Cornell University) conclut ainsi : « Le chromosome Y semble avoir un potentiel d'adaptation très rapide

aux changements évolutifs. »

Dans le premier de ces articles, l'équipe d'Henrik Kaessmann (université de Lausanne) a comparé les gènes actifs du Y de 15 mammifères. Premier résultat : chez les mammifères placentaires, les chromosomes X et Y ont cessé de se recombiner il y a 180 millions d'années. Mais, surtout, ce travail montre que si certains gènes du Y ont subsisté, c'est parce qu'ils sont essentiels : ils gouvernent l'activité d'autres gènes, produisant des « facteurs de transcription ». Ce sont de surcroît des gènes « sensibles au dosage » : ils ont impérativement besoin d'être présents en double exemplaire, à la fois sur le Y et sur le X. D'où leur préservation sur le Y.

La seconde étude, publiée par l'équipe de David Page, confirme l'importance de ces gènes résiduels du Y. Les auteurs ont comparé les chromosomes Y de huit mammifères. Ils montrent aussi que la « sensibilité de dosage » de ces gènes cruciaux, sur le Y, a créé une pression de sélection qui les a préservés. Non seulement ces gènes ancestraux interviendraient dans la formation des testicules et la production du sperme, mais ils seraient aussi essentiels à la viabilité des mâles. Ils pourraient même jouer un rôle dans certaines maladies liées au sexe.

Ce résultat est peut-être à rapprocher de cette étude suédoise, publiée le 28 avril dans *Nature Genetics*. Chez les hommes âgés, la perte du Y est fréquente dans les cellules sanguines. Mais

l'équipe de Lars Forsberg montre que les hommes âgés qui ont le plus fort taux de perte du Y, dans ces cellules, ont aussi le plus de risques de cancer. Ils meurent en moyenne 5,5 ans plus tôt que ceux qui ont les plus faibles taux de perte du Y.

La polémique n'est pourtant pas close, car la thèse de Jenny Graves bénéficie d'un allié de poids, en la minuscule forme de rongeurs saugrenus, mâles bien que XX. Décivant le chromosome Y comme un « accident évolutif », lors d'une conférence donnée le 3 avril 2013 devant l'Académie australienne des sciences, Jenny Graves remuait sans pitié le couteau dans la plaie : « C'est une très triste nouvelle pour tous les hommes ici présents. » Adoucissant toutefois son propos : « La bonne nouvelle, c'est qu'il existe aujourd'hui une multitude de petits rongeurs qui vivent très bien sans chromosome Y et sans gène Sry. »

Dans son *Prologue aux Poètes*, Aragon écrivait : « Tout peut changer de sens et de nature/ Le bien le mal les lampes les voitures/ Même le ciel au-dessus des maisons/ Tout peut changer de rime et de raison/ Rien n'être plus ce qu'aujourd'hui nous sommes/ Tout peut changer mais non la femme et l'homme. » L'avenir dira s'il faut croire l'homme de lettres : la génétique rejoindra-t-elle ici la littérature ? Seuls nos lointains descendants le sauront. ■

Florence Rosier
(30 avril 2014)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article reprend des notions de 1^{re} S concernant la mise en place du phénotype mâle chez les mammifères, et présente également les résultats de recherches menées sur le devenir du chromosome Y. Ce chromosome est apparu il y a environ 300 millions d'années chez un ancêtre commun à tous les mammifères. Il possède notamment le gène SRY, responsable de la différenciation des gonades en testicules. Accumulant progressivement des mutations, le chromosome Y a divergé du chromosome X, interdisant toute possibilité de recombinaison avec celui-ci. Petit

à petit, le chromosome Y a perdu la majorité de ses gènes, tant et si bien que certains scientifiques prédisent sa disparition d'ici 5 millions d'années. Des études ont montré que le chromosome X possède ainsi de nombreux gènes impliqués dans la spermatogenèse, et chez une espèce de rongeur, on observe même des individus mâles et pourtant XX. D'autres travaux ont cependant mis en évidence le rôle crucial de certains gènes du Y et la préservation de ces gènes au cours du temps. Alors le chromosome Y est-il voué à disparaître ? La réponse reste en suspens.

MOTS CLÉS

CELLULES GERMINALES

Cellules à l'origine des gamètes. Leur patrimoine génétique est transmissible à la descendance de l'individu.

CELLULES SOMATIQUES

Toutes les cellules d'un organisme à l'exception des cellules germinales.

HYBRIDATION

Croisement de deux individus appartenant à deux espèces différentes ou deux variétés différentes d'une même espèce.

PLASMIDE

Chez les procaryotes, un plasmide est une molécule d'ADN surnuméraire généralement circulaire pouvant être transférée à d'autres bactéries.

PLÔIDIE

Nombre de lots de chromosomes que possède une cellule.

POLYPLOÏDE

Se dit d'un organisme qui possède plus de deux exemplaires de chacun de ses chromosomes.

NOTION CLÉ

LES GÈNES HOMÉOTIQUES

Les gènes homéotiques, ou architectes, sont impliqués dans l'identité cellulaire le long de l'axe antéropostérieur lors du développement embryonnaire. L'expression de chacun d'entre eux est restreinte à un groupe de cellules délimité dans l'espace, ce qui détermine le plan d'organisation. Répartis sur quatre chromosomes chez les vertébrés et un seul chromosome chez les insectes, ils forment une famille multigénique. Les séquences de ces gènes sont si ressemblantes entre les différentes espèces qu'il peut être possible, par manipulation génétique, de remplacer un gène homéotique d'insecte par son homologue de vertébré, sans conséquence sur le phénotype.

Diversification génétique et diversification des êtres vivants

Les mutations et la rencontre au hasard de deux gamètes génétiquement uniques ne suffisent pas à expliquer la totalité de la diversification des êtres vivants. Celle-ci s'est réalisée au cours du temps, depuis les premières formes de vie, il y a quatre milliards d'années. Les mécanismes mis en jeu sont variés et ne sont pas toujours liés à une diversification génétique.

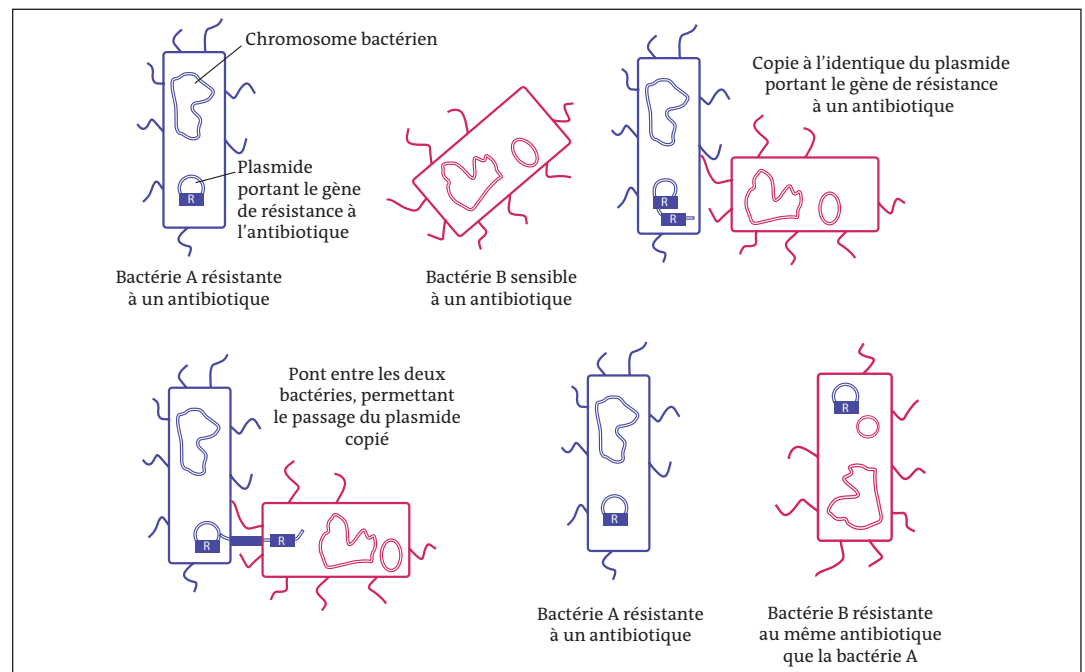
Le transfert horizontal de gènes

Le transfert vertical qualifie la transmission de matériel génétique d'une génération à une autre. Des transferts horizontaux sont possibles entre des bactéries qui ne descendent pas les unes des autres, qu'elles appartiennent ou non à la même espèce. Par exemple, des **gènes de résistance aux antibiotiques** sont portés par des plasmides, courtes molécules d'ADN circulaires. Deux bactéries peuvent s'échanger directement du matériel génétique plasmidique grâce à des **ponts cytoplasmiques**. Une bactérie acquiert alors la résistance à certains antibiotiques à partir d'une autre bactérie. Il s'agit d'un mécanisme de diversification rapide. L'usage excessif de traitements

antibiotiques a favorisé le développement de populations bactériennes de plus en plus résistantes.

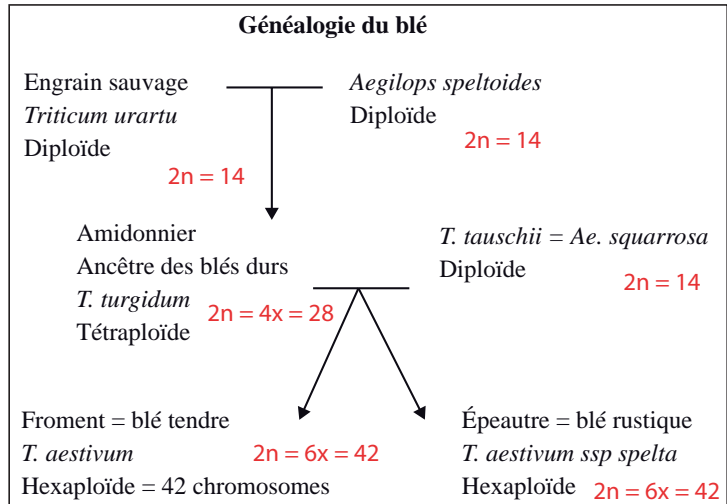
Hybridation et polyploïdisation

Deux espèces végétales voisines peuvent être **interfécondes**. Leur croisement, naturel ou artificiel, peut donner des hybrides présentant des critères variés, susceptibles d'intéresser les agriculteurs : productivité, goût, résistance au froid, à un insecte... Parmi les plants issus des graines obtenues à partir de ces croisements seront sélectionnés ceux qui expriment les caractères les plus intéressants pour l'agriculture. Les céréales destinées à la consommation, comme le blé ou le maïs, sont issues d'une **succession de**



Transfert d'un plasmide portant un gène de résistance à un antibiotique, d'une bactérie résistante à une bactérie non résistante (conjugaison)

croisements. Dans le cas de ces végétaux, il y a eu augmentation du nombre de chromosomes : on parle de **polyploïdisation**. Ce phénomène est fréquent chez les végétaux, mais beaucoup plus rare chez les animaux. Il peut notamment résulter d'une absence de réduction du nombre de chromosomes lors de la formation des gamètes ou d'un doublement des chromosomes suite à une erreur dans une mitose ou une méiose.



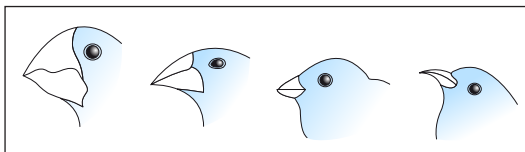
L'engrain sauvage et l'égilope faux épeautre sont **diploïdes** (ils ont 7 paires de chromosomes) et ont été croisés. Cela a d'abord donné un hybride stérile qui a pu ensuite subir une polyploïdisation et donner une plante tétraploïde (2×7 paires, soit 28 chromosomes), qui a été elle-même croisée avec un plant diploïde. Cela a donné, après hybridation suivie de polyploïdisation, deux sortes de céréales à 42 chromosomes (3×7 paires). La **domestication** a eu plusieurs effets, telle l'augmentation de la taille de l'épi mais également du nombre de grains par épi. La productivité a donc été améliorée.

L'infection par un virus

Près de 10 % du génome des mammifères proviennent de virus. Ils sont des **parasites intracellulaires** : leur génome s'insère dans celui des cellules infectées. Cet ajout de matériel génétique peut être défavorable, mais aussi procurer un avantage transmissible à la descendance s'il s'agit de cellules germinales.

Des variations dans l'expression de certains gènes

Charles Darwin au XIX^e siècle, les Grant au XX^e siècle



Géospizes (10 à 20 cm) de gauche à droite : fuligineux – à bec pointu – modeste – des mangroves

ont étudié les pinsons des Galápagos. On a découvert plus récemment que la forme de leur bec était liée à l'expression de certains gènes, dont le gène BMP4 (*bone morphogenetic protein*) : plus intensément et plus tôt ce gène est exprimé au cours du développement embryonnaire, plus le bec de ces oiseaux devient robuste, ce qui a des conséquences sur leur alimentation. La protéine BMP4 est le produit de l'expression de ce gène, elle agit sur la **différenciation des cellules** lors du développement embryonnaire.

Si un **gène homéotique** s'exprime à un endroit inapproprié, les conséquences sont visibles sur le plan d'organisation. Chez les serpents, le gène Hox6, responsable de la formation de côtes, s'exprime tout le long de l'axe antéropostérieur, contrairement à ce qui se passe chez les autres vertébrés. Ceci explique la présence de côtes sur toutes les vertèbres des serpents.

Les variations de la localisation, de la chronologie et de l'intensité de l'expression des gènes homéotiques sont une source importante de diversification des êtres vivants.

Des associations entre espèces différentes

Une **diversification des êtres vivants** est possible sans modification de leur génome, par l'association d'espèces différentes. Dans le cas des symbioses, les deux individus tirent un avantage à s'associer : échanges de substances nutritives, protection, hébergement, défense... sont des exemples de bénéfices réciproques.

La transmission de comportements nouveaux

Chez les oiseaux, le chant est indispensable au choix des mâles par les femelles pour la reproduction. Il s'agit d'un comportement transmis par les parents aux jeunes par apprentissage.

Chez les chimpanzés, le choix et l'utilisation de cailloux pour casser des noix sont transmis des adultes aux jeunes de certaines communautés seulement, durant un apprentissage de cinq années.

Les comportements nouveaux sont transmis de génération en génération par **voie non génétique**. ■

DEUX ARTICLES DU MONDE À CONSULTER

• **Le secret dévoilé de la poule aux œufs bleus** [p.16](#)

(Hervé Morin, 28 août 2013)

• **Casser des noix, une question de culture chez le chimpanzé** [p.17](#)

(Jérôme Grenèche, 19 mai 2012)

NOTIONS CLÉS

EMPREINTE

Processus d'apprentissage mis en jeu au cours du développement des jeunes, et entraînant une modification durable du comportement, qui peut être héréditaire mais de manière non génétique.



Chimpanzés

SYMBIOSE

Association à bénéfices réciproques entre deux organismes appartenant à des espèces différentes.

Exemples de symbioses :

- les lichens sont constitués d'une association entre une algue unicellulaire et un champignon : l'algue fournit les produits de la photosynthèse, tandis que le champignon permet la survie dans un milieu sec ;

- certaines colonies de fourmis sont en symbiose avec des arbres tel le cécropia, elles y sont hébergées et nourries tout en participant activement aux défenses de l'arbre contre les herbivores ;

- les mycorhizes sont une association entre les racines des végétaux et des champignons ;

- les nodosités des fabacées, comme le haricot, associent les racines de ces plantes à des bactéries du genre *Rhizobium* : la plante fournit les produits de la photosynthèse, tandis que les bactéries apportent les produits azotés issus de la fixation de l'azote atmosphérique.

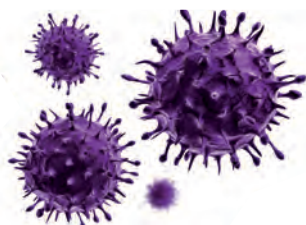
ZOOM SUR...

LE CYCLE DE RÉPLICATION D'UN RÉTROVIRUS

Un rétrovirus est constitué d'ARN dans une enveloppe protéique. Il peut infecter les cellules qui présentent à leur surface des protéines auxquelles il peut s'amarer : ce sont ses cellules-cibles. Le virus peut alors y transférer son matériel génétique en fusionnant avec la membrane cellulaire. L'ARN viral est converti en ADN par rétrotranscription grâce à une enzyme virale : la transcriptase inverse. L'ADN viral s'intègre au génome de la cellule-hôte et s'exprime. Ainsi, ARN viraux et protéines virales sont produits, permettant l'assemblage de nouvelles particules virales qui vont être disséminées.

DES VIRUS... PARTOUT !

L'étude des milieux naturels à partir des génomes qui s'y trouvent, la métagénomique, permet désormais le comptage et l'identification des virus de l'atmosphère, malgré leur petite taille, inférieure au micromètre. Résultat : dans un mètre cube d'air, on trouve entre 1,7 et 40 millions de virus selon les saisons. Pour les bactéries, la fourchette est plus basse : entre 860 000 et 11 millions d'individus par mètre cube. Au repos, un adulte pompe en moyenne 10 litres d'air par minute. À chaque minute qui passe, entre 17 000 et 400 000 virus pénètrent ainsi dans nos poumons... De quoi pousser un hypochondriaque à cesser de respirer ! L'atmosphère est un réservoir de virus encore largement inexploré auquel il serait temps de s'intéresser, notamment pour identifier des entités susceptibles de s'attaquer aux cultures... et aux hommes.
Source : d'après Pierre Barthélémy, *Combien de virus inhalez-vous chaque minute ?* sur le blog *Passeur de sciences*, le 10 octobre 2012



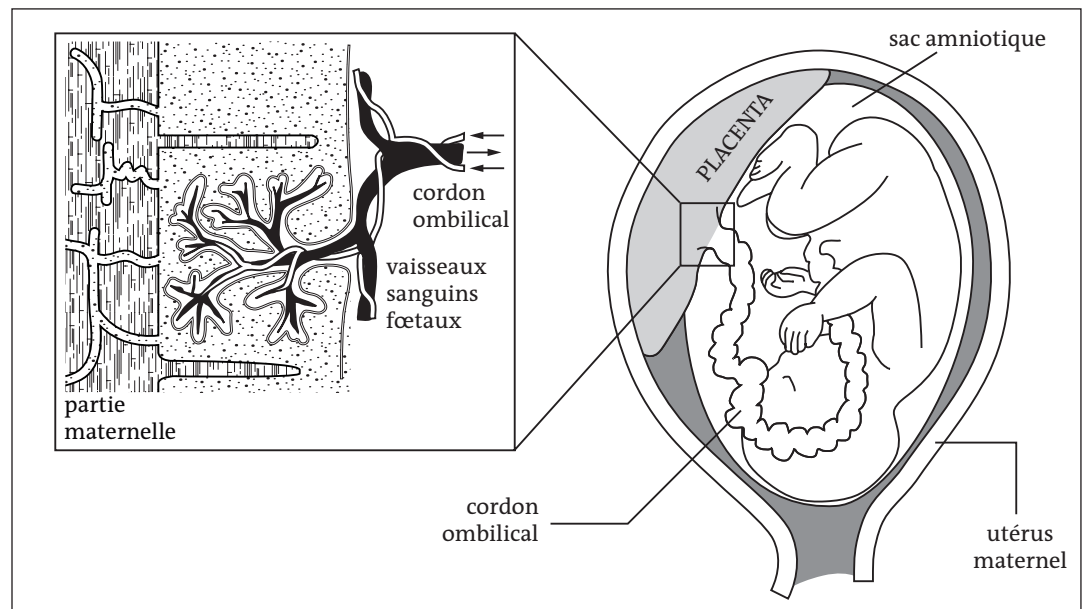
Partie 2.2 : L'origine virale du placenta

L'intitulé complet du sujet

Chez les mammifères, le placenta constitue une zone d'échanges entre le sang maternel et le sang foetal, nécessaire au développement du fœtus. En 2009, des chercheurs ont émis l'hypothèse d'une origine virale de certains gènes indispensables à la mise en place du placenta. Proposez les différentes étapes du scénario ayant pu mener à l'apparition du placenta chez un ancêtre des mammifères actuels afin de montrer comment les virus peuvent jouer un rôle majeur dans la diversification du vivant. Votre réponse s'appuiera sur l'exploitation du dossier. Aucune étude exhaustive des documents n'est attendue.

Document de référence

Le placenta, une zone d'échanges entre le sang de la mère et le sang de l'enfant qui nécessite la fusion des cellules



Les documents

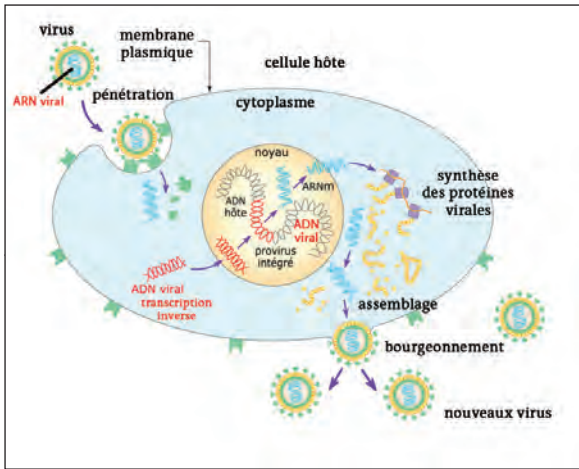
Document 1 : Un virus à l'origine du placenta ?
L'apparition des mammifères placentaires, dont l'embryon est alimenté et protégé grâce à un placenta, il y a près de 100 millions d'années, serait-elle liée à une contamination virale ? C'est l'hypothèse que font des chercheurs après avoir découvert que le gène syncytine A, d'origine virale, est essentiel

au développement du placenta chez la souris. En effet, les syncytines sont des protéines de surface permettant aux cellules qui les portent de fusionner entre elles, comme le fait un virus pour entrer dans une cellule. Ces fusions permettent la fabrication d'une « nappe cellulaire » multinucléée*, constituant essentiel du placenta, formée par la réunion de cellules individuelles en des « syncytia ». Pour les chercheurs, qui ont publié leurs travaux en juin 2009, une contamination virale pourrait donc avoir été un événement fondateur dans le passage d'un développement embryonnaire externe, chez les animaux qui pondent des œufs, à un mode « interne ».
* Multinucléée : qui comporte de nombreux noyaux.
Source : d'après le journal du CNRS, n° 236, septembre 2009

Document 2 : Le cycle de réplication d'un rétrovirus
Un rétrovirus est un virus dont le génome est constitué d'ARN. Sa particularité est de posséder une enzyme qui permet la « transcription inverse »

de l'ARN viral du génome en molécule d'ADN « complémentaire » capable de s'intégrer à l'ADN de la cellule-hôte. Il utilise ensuite la machinerie cellulaire pour se répliquer.

Document 3 : Des rétrovirus endogènes
Les rétrovirus infectieux possèdent la propriété remarquable de s'intégrer dans l'ADN de nos chro-



mosomes. En général, les cellules infectées sont des cellules somatiques qui ne sont pas impliquées dans la transmission de notre patrimoine génétique. Cependant, lorsqu'un rétrovirus parvient à infecter une cellule de la lignée germinale*, le rétrovirus intégré peut se transmettre à la descendance comme n'importe quel gène : il devient alors un « rétrovirus endogène ». Le génome de tous les vertébrés est ainsi envahi par de telles structures, et le séquençage systématique d'un grand nombre de génomes, dont ceux de l'homme et de la souris, montre que les rétrovirus endogènes représentent près de 8 % du matériel génétique de ces espèces.

Fort heureusement, la plupart des rétrovirus endogènes sont inactifs. Quelques rares éléments sont cependant toujours capables de produire des protéines d'origine rétrovirale.

*Cellule de la lignée germinale : cellule à l'origine des gamètes.

Extrait d'une publication du CNRS 2009

Source : <http://www.cnrs.fr/insb/recherche/parutions/articles09/t-heidmann.htm>

Ce qu'il ne faut pas faire

- Recopier à l'identique des phrases issues des documents.
- Utiliser systématiquement les documents dans l'ordre du sujet.
- Étudier les documents de manière exhaustive sans les mettre en relation.

Analyse du sujet

Il s'agit de reconstituer une étape de l'histoire du génome des mammifères, dans laquelle les rétrovirus infectieux semblent avoir joué un rôle majeur. L'apparition, par des mécanismes qui auront été déduits des documents, d'une structure nouvelle comme le placenta est un exemple de diversification génétique du vivant.

Pour le baccalauréat, il n'est pas attendu de connaître tous les mécanismes de diversification de manière détaillée. Ils sont à étudier en relation avec leurs conséquences sur la diversification des êtres vivants.

Les objectifs prioritaires sont la pratique du raisonnement scientifique et l'argumentation à partir de documents.

Le corrigé

Le scénario ayant mené à l'apparition du placenta chez un ancêtre des mammifères actuels :

Exploitation des documents 2 et 3

- Infection par un rétrovirus d'une cellule germinale d'un ancêtre des mammifères, par fusion avec sa membrane.
- Intégration de l'ADN viral, issu de la « transcription inverse » de l'ARN viral, dans le génome de la cellule germinale.
- Transmission à la descendance via les gamètes porteurs des gènes viraux.
- Certains gènes viraux restent actifs chez les descendants et s'expriment par la production de protéines virales.

Exploitation du document 1

- Certaines protéines virales de surface, les syncytines, exprimées par les cellules des descendants, permettent leur fusion pour former des syncytia.
- Les gènes viraux codant pour ces protéines de fusion cellulaire s'expriment au moment du développement embryonnaire et permettent la mise en place d'une zone d'échange entre le sang de la mère et le sang du fœtus : le placenta.

Les virus joueraient un rôle majeur dans la diversification du vivant

Le séquençage des génomes de vertébrés montre que les gènes issus de rétrovirus représentent près de 8 % du matériel génétique.

Dans l'exemple des syncytines, l'intégration et l'expression de gènes viraux a permis l'apparition du placenta.

Cette structure nouvelle a permis de passer d'un développement dans des œufs à un développement interne. ■

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 2.1 :

– Exploiter des documents pour établir le lien entre des variations de l'expression de gènes homéotiques et un exemple de diversification du vivant.

– Exploiter des documents sur l'évolution du génome des espèces cultivées.

Partie 2.2 :

– Exploiter des documents pour montrer que certains exemples de diversification du vivant se réalisent sans modification du génome.

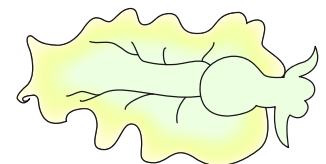
ZOOM SUR...

L'ENDOSYMBIOSE

L'endosymbiose est une coopération à bénéfices mutuels entre deux organismes, l'un étant contenu dans l'autre. Les cellules eucaryotes possèdent des mitochondries, des organites cellulaires spécialisés dans la production d'énergie qui contiennent de l'ADN. Une comparaison génétique a permis de montrer de grandes similitudes entre le génome des mitochondries et celui des bactéries de type *Rickettsia*, ce qui suggère une origine endosymbiotique de ces organites cellulaires. Toutefois le génome mitochondrial a perdu certains gènes, qui sont inclus dans le génome du noyau de la cellule eucaryote.

UNE LIMACE MARINE CHLOROPHYLLIENNE

La limace marine *Elysia chlorotica* est marron à sa naissance et broute des algues. Elle devient alors verte. À la lumière du soleil, la limace déploie des expansions de son corps – des parapodes – pour capter la lumière. Élevée à l'obscurité, elle se replie, redevient marron et doit brouter des algues. À la lumière, elle n'a pas besoin de manger car l'animal agit comme un végétal chlorophyllien, produisant les molécules dont elle a besoin grâce à la photosynthèse. Des chloroplastes ont été extraits des premières algues mangées. Ils sont conservés dans les cellules de la paroi intestinale mais ne sont pas transmis à la descendance. Des gènes nécessaires à la photosynthèse se trouvent dans le génome de la limace. Ils ont dû être acquis au cours de l'évolution par transfert horizontal entre les algues et une ancêtre de cette limace. Ce transfert a permis la mise en place de cette endosymbiose particulière.



Elysia chlorotica (2 à 3 cm)

Le secret dévoilé de la poule aux œufs bleus

L'insertion fortuite d'un rétrovirus dans le génome de « *Gallus gallus* » serait responsable de la teinte bleutée de la coquille.

Outre-Manche, on peut trouver dans certaines épiceries fines des œufs dotés d'une coquille bleutée, à plus de quatre livres la douzaine. Certains chefs médiatiques en ont vanté les mérites. Les poules qui les ont pondus sont de lointaines descendantes de celles qui, dans des villages mapuches du Chili ou des communautés du sud-ouest de la Chine, ont été sélectionnées il y a des siècles par des paysans friands d'originalité.

Jusqu'à ces derniers mois, on ignorait l'origine de ce prodige. Mais, coup sur coup, deux publications scientifiques viennent d'en livrer la clé génétique. Début 2013, dans la revue *PLoS Genetics*, une équipe chinoise l'attribuait à la présence d'un rétrovirus dans le génome des poules en question. Une équipe internationale vient de le confirmer, au terme d'analyses génétiques décrites dans *PLoS One* du 19 août. « *Nous avons été un peu déçus d'aboutir juste après les Chinois*, confie Olivier Hanotte (université de Nottingham), qui a dirigé ces travaux. *Mais c'est aussi une grande satisfaction d'arriver aux mêmes conclusions de façon indépendante.* »

Pourquoi s'est-il consacré à ce sujet ? De nombreuses espèces d'oiseaux – canards, coucous – pondent des œufs bleus. Étudier ce mécanisme chez la poule pourrait expliquer l'origine de ce phénomène, espérait le chercheur. « *On pouvait aussi penser*

en savoir plus sur l'origine des poulets sud-américains : venaient-ils d'Europe ou plutôt d'Asie, foyer de la poule domestique, après avoir traversé le Pacifique ? » Las, ces deux questions restent en suspens : la mutation observée chez les poules aux œufs bleus n'a pas son équivalent chez le canard, par exemple. Et, si elle est identique chez les poules chiliennes et chinoises, elle ne se trouve pas au même endroit de leur génome, mais à quelques paires de bases de distance seulement. Il n'y a donc rien à en conclure sur les éventuelles pérégrinations transpacifiques de la poule.

« Mutations »

« *Ces mutations constituent deux événements distincts, intervenus sur une portion génomique quasi identique*, souligne Michèle Tixier-Boichard (INRA Jouy-en-Josas), qui a fourni des échantillons issus d'un troupeau de poules aux œufs bleus constitué dans les années 1970 au centre de Tours. C'était totalement inattendu, comme si la foudre était tombée deux fois au même endroit. » La foudre étant dans ce cas un rétrovirus.

Les rétrovirus ont la faculté d'insérer leur patrimoine génétique au sein de celui de leur hôte. Les génomes des organismes supérieurs en sont truffés (450 000 chez l'homme), et l'on sait désormais que, si certains sont nocifs et d'autres inoffensifs, ils peuvent

jouer à l'occasion un rôle dans la régulation des gènes.

C'est le cas chez les poules aux œufs bleus : le rétrovirus conduit le gène normal qu'il flanque à s'exprimer dans des tissus où il n'est normalement pas actif. « *Ce rétrovirus tout à fait inoffensif induit la capture d'un produit de dégradation de l'hémoglobine, la biliverdine, lors de la formation de la coquille* », explique Olivier Hanotte. Chez les poules produisant naturellement des œufs blancs, cette mutation se traduit par une coloration bleue tandis que, chez celles pondant des œufs bruns, elle les « peint » en vert.

Dans les années 1970, Philippe Mérat, à l'INRA, avait montré que la membrane coquillière des œufs

bleus était un peu plus épaisse que celle des œufs « normaux ». Mais la race « bleue » était par ailleurs moins performante, si bien que les grands producteurs ont délaissé cette caractéristique. « *Mais, maintenant que l'on connaît précisément le mécanisme génétique, on pourrait concevoir un programme d'introduction contrôlée* », estime Michèle Tixier-Boichard, qui y verrait un beau message en faveur de la biodiversité : ou comment des races venues de villages perdus de Chine ou du Chili contribuent à renouveler le contenu de nos assiettes standardisées. ■

Hervé Morin
(28 août 2013)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article montre le rôle joué par des virus, plus particulièrement d'un rétrovirus dans le cas présent, dans la diversification des êtres vivants. Ici, la couleur bleue de la coquille des œufs de poules provient de l'insertion du patrimoine génétique d'un rétrovirus dans leur génome. Cette insertion a entraîné une modification dans la régulation d'un gène, provoquant l'expression de ce gène dans des tissus dans lesquels il ne s'exprime pas normalement. Cette expression est à l'origine

de la capture d'une molécule : la biliverdine, responsable de la coloration bleue.

Les œufs bleus présentent une membrane coquillière plus résistante, caractéristique intéressante pour les producteurs, mais du fait d'une moindre performance, cette race de poule n'a cependant été que peu exploitée.

Cette découverte offre donc des perspectives en matière de diversification alimentaire. Si l'on parvient à maîtriser de façon contrôlée l'insertion du génome du rétrovirus chez ces poules, les œufs bleus pourraient donc devenir plus fréquents dans nos assiettes.

Casser des noix, une question de culture chez le chimpanzé

La forme et la matière des outils utilisés varient selon la communauté d'appartenance des primates.

La culture est-elle véritablement le propre de l'homme ? La question est relancée par une étude sur le chimpanzé à paraître, le 22 mai, dans la revue *Current Biology* et conduite par Lydia Luncz, de l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste de Leipzig. Pendant neuf mois, la primatologue a étudié les comportements de sélection d'outils destinés à casser des noix de coula chez les chimpanzés sauvages (*Pan troglodytes verus*) de trois communautés voisines de la forêt de Taï, en Côte d'Ivoire.

L'utilisation d'outils pour casser ces noix, très nourrissantes mais presque aussi dures que de la pierre, est certainement le comportement le plus sophistiqué observé chez ces primates connus pour leur organisation sociale complexe. Tous ont la même technique, qui consiste à placer le fruit sur une racine qui sert d'enclume et à le frapper à l'aide d'un percuteur en bois ou en pierre. En tenant compte de la disponibilité des outils de cassage et de la résistance des noix de coula au cours de la saison, l'étude révèle des différences dans le type et la taille des outils sélectionnés entre les communautés riveraines de chimpanzés.

En début de saison, ces groupes choisissent principalement des pierres, plus dures que le bois, pour casser les noix encore fraîches. Mais, la saison avançant, quand les noix deviennent sèches donc plus

faciles à casser, les communautés du nord et de l'est de la forêt de Taï privilégient les marteaux en bois, plus abondants. Seuls les chimpanzés situés au sud continuent d'utiliser des marteaux en pierre pendant toute la saison.

« *La culture est avant tout un phénomène social. Les communautés de chimpanzés qui vivent dans le même environnement gardent néanmoins leurs préférences pour des types d'outils de cassage différents* », souligne Christophe Boesch, coauteur de l'étude et directeur du département de primatologie de l'Institut Max-Planck. Il y a transmission d'une tradition entre générations au sein d'un groupe.

Adaptation des comportements

Selon les communautés, les chimpanzés sélectionnent aussi des marteaux en bois de tailles variables : petits au nord et grands dans les deux autres groupes. « *Les différences culturelles dans la sélection des outils sont maintenues malgré quelques échanges d'individus entre les communautés de chimpanzés, notamment lors de la migration des femelles d'une communauté à l'autre* », ajoute le chercheur. Des groupes riverains auraient ainsi développé leur propre culture afin d'adapter leur comportement de cassage selon la résistance des noix pendant la saison.

Jusqu'à présent, les primatologues pensaient que seuls les chimpanzés vivant dans des

territoires géographiquement éloignés utilisaient des outils différents pour casser les noix de coula. « *Les populations étudiées par le passé présentent beaucoup de différences dans l'usage d'outils, mais l'argument des différences culturelles a été mis en doute, notamment en raison de possibles variations d'ordre écologique ou génétique. En effet, 100 à 1 000 km séparent les populations de chimpanzés qui utilisent des outils différents pour se nourrir*, précise Christophe Boesch. *Cette fois-ci, notre étude souligne le maintien de ces différences culturelles chez des chimpanzés vivant dans des environnements similaires et avec un certain brassage génétique, ce qui est difficilement contestable. Reste à savoir si ces différences sont liées à des différences d'efficacité* », confie le chercheur.

Longtemps sujet à controverse, la question de l'héritage culturel chez le chimpanzé resurgit donc avec l'étude de Lydia Luncz, qui met en évidence de fortes similarités avec

l'homme. « *Chez les humains, les différences culturelles sont une partie essentielle de ce qui distingue les groupes voisins qui vivent dans des environnements très similaires. Pour la première fois, une situation très semblable a été observée chez les chimpanzés sauvages vivant dans le parc national de Taï, et cela démontre qu'ils partagent avec nous une capacité de différenciation culturelle à une échelle fine* », conclut Lydia Luncz.

Ces travaux qui révèlent la dimension culturelle du comportement des chimpanzés soulignent l'urgente nécessité de préserver l'habitat de cette espèce menacée d'extinction. Pour son bien propre mais aussi pour le nôtre : la disparition de ces hominidés qui partagent plus de 98 % de leurs gènes avec *Homo sapiens* pourrait compromettre la compréhension des racines de la culture humaine. ■

Jérôme Grenèche
(19 mai 2012)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article révèle que la technique du cassage des noix de coula par les chimpanzés est plus complexe qu'il n'y paraît et qu'il s'agit d'une « question de culture ». Ce comportement transmis par apprentissage est un

exemple de diversification non génétique des êtres vivants. La question de la culture animale reste sujette à controverse tant elle fait vaciller les certitudes quant aux spécificités de l'espèce humaine. En sciences de la vie et de la terre, l'homme doit être étudié comme toute autre espèce.

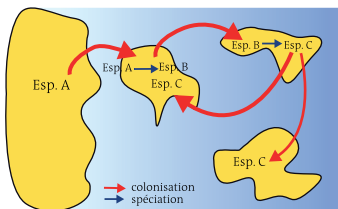
ZOOM SUR...

MÊME ESPÈCE OU ESPÈCES DIFFÉRENTES ?

Les lions (*Panthera leo*) et les tigres (*Panthera tigris*) peuvent engendrer des descendants uniquement en captivité, mais leurs petits (tigrons, ligres) sont stériles. Ils n'appartiennent donc pas à la même espèce

Le fuligule morillon (*Aythya fuligula*) et le fuligule milouin (*Aythya ferina*) sont des canards qui peuvent donner expérimentalement des descendants fertiles alors qu'ils n'habitent pas les mêmes milieux. Ils sont pourtant considérés comme deux espèces différentes par les ornithologues bien que pouvant s'hybrider car, du fait de leurs milieux de vie très différents, les hybridations sont très rares.

LES PINONS DES GALÁPAGOS



Chez les pinons de Darwin, qui occupent différentes îles, des formes de bec variées ont été sélectionnées en fonction de la nourriture disponible.

Une population d'individus issus d'une espèce A colonise une île. Au bout d'un certain temps, elle peut devenir une espèce B, dont certains individus colonisent une autre île et forment une espèce C. Cette dernière colonise les îles alentours, dont celle qui est déjà occupée par l'espèce B. Elles ne sont pas interfécondes. Leur possibilité de cohabitation dépend du fait qu'elles occupent ou non la même niche écologique. Si c'est le cas, les deux espèces entrent en compétition ce qui peut entraîner la disparition de l'une d'elles.



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

Depuis l'apparition de la vie sur la Terre et leur hypothétique ancêtre commun LUCA (*last universal common ancestor*), les êtres vivants se sont diversifiés. La biodiversité, qui se définit à différentes échelles, correspond notamment à la diversité des espèces, mais aussi à la diversité au sein de celles-ci. Au cours de l'histoire de la Terre, la biodiversité a explosé à certaines périodes et a chuté lors de crises biologiques, en lien avec des modifications des milieux de vie. Ainsi, la biodiversité évolue constamment selon divers mécanismes, les innovations se maintenant ou non dans les populations sous l'effet de la dérive génétique et de la sélection naturelle.

La diversité des populations change au cours des générations

Dans une population, la fréquence des différents allèles peut évoluer de manière aléatoire si ces allèles n'apportent ni avantage ni désavantage aux individus qui les portent. Le hasard des brassages au cours de la reproduction sexuée détermine l'évolution de la population, de façon d'autant plus marquée que celle-ci est petite. Il s'agit de la **dérive génétique**. Dans un milieu donné, selon les allèles dont ils sont porteurs, certains individus vont mieux survivre (ils se nourrissent plus facilement ou échappent aux prédateurs) et/ ou davantage se reproduire (ils attirent davantage les partenaires). Ces individus engendrent ainsi davantage leurs allèles aux générations suivantes. La conséquence dans la population est une augmentation de la fréquence des allèles dont ces individus sont porteurs, c'est la **sélection naturelle**.

L'espèce : un concept délicat à définir

La définition de l'**espèce** a été modifiée au cours de l'histoire de la biologie. Plusieurs définitions se sont succédées et reposent sur des critères variés.

– Cuvier (1769-1832) : « Une espèce est un ensemble d'êtres vivants partageant des critères anatomiques et physiologiques. » Or, deux animaux se ressemblant fortement peuvent ne pas appartenir à la même espèce, car ils ne répondent pas à la définition biologique de l'espèce.

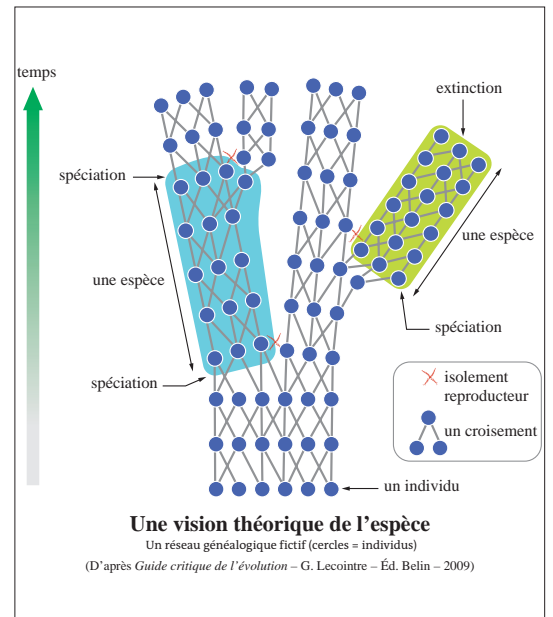
– Définition biologique adoptée par Buffon (1707-1788) : « Une espèce est une communauté d'êtres vivants pouvant produire des descendants eux-mêmes féconds » (critère d'interfécondité).

– Définition écologique : une espèce est une popu-

lation adaptée à une niche écologique particulière.

– Définition génétique : « Deux individus doivent avoir le même nombre de chromosomes et sur chaque chromosome le même nombre de nucléotides pour appartenir à la même espèce » Dawkins (1941-). Actuellement, on considère que « les espèces sont des populations d'individus suffisamment isolées génétiquement des autres populations ».

Dans tous les cas, **une espèce n'est définie que durant un certain laps de temps**, délimité par son apparition (spéciation) et son extinction ou son évolution vers une autre espèce.



La spéciation ou création de nouvelles espèces

Plusieurs **mécanismes** permettent d'expliquer la naissance d'une nouvelle espèce à partir d'une espèce ancestrale.

– **La séparation de populations par un obstacle physique.** En effet, la spéciation peut être liée à la séparation de populations par une barrière physique (cours d'eau, relief) qui va empêcher les échanges génétiques entre deux populations de la même espèce initiale et aboutir à la divergence en deux espèces.

– **La colonisation d'une nouvelle niche écologique.** Des individus fondateurs se séparent de l'espèce mère pour coloniser une nouvelle niche, isolée (île) ou adjacente, mais soumise à d'autres pressions de sélection. Comme peu d'individus ont migré, tous les allèles de la population de départ ne sont pas forcément représentés aux mêmes fréquences que dans la population d'origine. Les facteurs environnementaux pouvant être différents dans le nouveau milieu colonisé, la pression de sélection peut favoriser certains allèles ou le maintien de certaines innovations génétiques.

– **La spéciation sans isolement géographique.** Dans un même milieu, au sein d'une population, l'apparition d'un nouvel allèle peut aboutir à former une nouvelle espèce qui exploite différemment les ressources de l'environnement ou ne peut plus se reproduire avec l'espèce initiale. En cause : l'incompatibilité des parades sexuelles ou, pour des oiseaux ou des grenouilles, le fait que leurs chants soient devenus très différents et ne leur permettent plus de se reconnaître.

L'individualisation d'une nouvelle espèce peut prendre une durée variable, de quelques années à des millions, selon la population de départ, l'espèce considérée, le milieu et les possibilités d'échanges génétiques entre les individus.

L'extinction des espèces

Une espèce est considérée comme éteinte si l'ensemble de ses individus a disparu ou s'ils cessent d'être isolés génétiquement. Il existe des **extinctions locales** (dans une niche écologique donnée) ou **globales** (à la surface de la Terre).

L'extinction d'une espèce peut entraîner celle d'une autre espèce. Ainsi, si les abeilles disparaissent, toutes les espèces végétales dont la pollinisation est strictement dépendante de ces insectes disparaîtront.

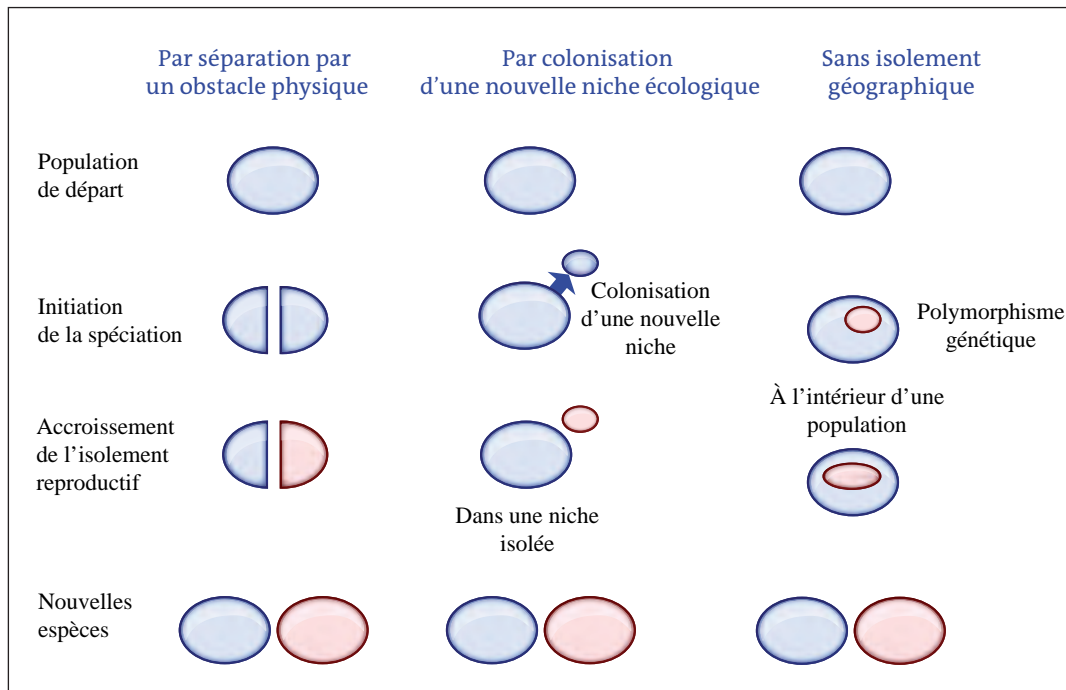
Au cours de l'histoire de la Terre, des diminutions massives de la biodiversité ont eu lieu : la période crétacé-tertiaire est un exemple de crise biologique, avec notamment la disparition des ammonites et des dinosaures (dont les oiseaux sont les descendants). ■

UN ARTICLE DU MONDE À CONSULTER

• **Maurice, laboratoire de biodiversité**

p. 22-23

(Viviane Thivent, 28 mai 2014)



Des mécanismes de spéciation

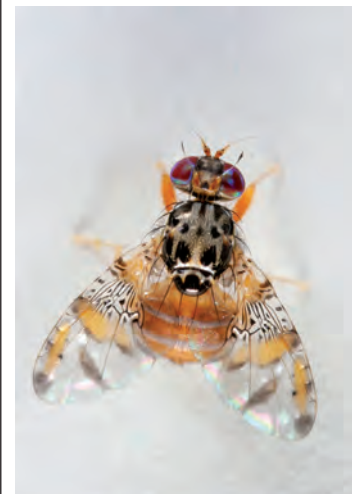
ZOOM SUR...

Des exemples de spéciation

• Dans l'archipel de Madère, six espèces apparentées aux souris domestiques européennes présentent entre 22 et 30 chromosomes au lieu de 40, suite à la fusion de certains chromosomes. Ces populations non interfécondes proviennent de l'évolution de souris apportées par les bateaux des découvreurs de cette île au relief escarpé (les Vikings au IX^e siècle, les Portugais au XV^e siècle). Il s'agit d'un exemple de spéciation par isolement géographique.

• Dans les sous-sols de Londres, des moustiques *Culex pipiens molestus* sont génétiquement différenciés selon les lignes de métro. Ils ont évolué depuis une centaine d'années à partir d'une espèce de surface, avec laquelle ils ne sont plus interféconds. La profusion de leurs proies (les mammifères, humains comme rongeurs) transitant par ce moyen de transport, la chaleur des lieux et la présence de flaques d'eau ont accéléré le rythme de reproduction (plusieurs cycles par an), ce qui a permis une spéciation rapide.

• Aux États-Unis, les larves des mouches *Rhagoletis* consomment les baies de l'aubépine. Le développement de la culture des pommes a favorisé l'individualisation, sans isolement géographique, d'une nouvelle espèce consommatrice de pommes.



ZOOM SUR...

La vie de Charles Darwin
1809

Le 12 février : naissance à Shrewsbury (Angleterre) de Charles Darwin. En France, Lamarck présente sa théorie transformiste.

1831

Le 27 décembre, Darwin s'embarque comme naturaliste sur le *Beagle* pour un voyage autour du monde qui durera cinq ans.

1835

Le *Beagle* fait escale aux Galápagos, où Darwin note des variations dans la forme des becs de pinsons, ce qui inspirera sa théorie.

1837

Première esquisse, par Darwin, d'un arbre évolutionnaire figurant dans son *Notebook on Transmutation of Species*.

1858

Présentation à Londres d'articles en commun avec Wallace sur la perpétuation des variétés et des espèces par les moyens naturels de la sélection.

1859

Publication de *De l'origine des espèces par voie de sélection naturelle ou la Préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie*.

1871

Darwin livre ses vues sur l'origine de l'homme dans *La Filiation de l'homme et la sélection liée au sexe*.

1882

Mort de Darwin dans sa demeure de Down, dans le Kent. Il sera enterré à l'abbaye de Westminster.

Source : « Dates clés de la vie de Charles Darwin », *Le Monde*, 6 février 2009.

PERSONNAGE CLÉ

STEPHEN JAY GOULD (1941-2002)

Paléontologue américain, coauteur de plusieurs idées théoriques sur l'évolution. Il doit sa renommée à ses nombreux essais, dont *Le Pouce du panda*, et à sa participation active à la lutte contre le créationnisme aux États-Unis.

Partie 2.2 : Le sixième doigt des pandas

L'intitulé complet du sujet

Il existe actuellement deux espèces de pandas : le panda roux (*Ailurus fulgens*) et le grand panda (*Ailuropoda melanoleuca*). Tous deux sont végétariens, se nourrissant de grandes quantités de feuilles de bambou. Ils présentent par ailleurs une particularité anatomique remarquable : la présence d'un sixième doigt (ou « faux pouce ») à chaque main, longtemps interprétée comme une adaptation à leur régime alimentaire.

En 2005, on a découvert en Espagne un fossile daté de 9 millions d'années (*Simocyon batalleri*) apparenté aux pandas actuels et présentant lui aussi un sixième doigt. Montrez comment l'interprétation du sixième doigt des pandas en termes d'adaptation au régime alimentaire végétarien (adaptation dont vous expliquerez les mécanismes) s'est nuancée à la lumière de nouvelles découvertes.




Votre réponse s'appuiera sur l'exploitation du dossier. Aucune étude exhaustive des documents n'est attendue.

Document 2

Les grands pandas géants sont des ours d'un type bien défini, membres de l'ordre des carnivores. Les ours ordinaires sont les représentants les plus omnivores de leur ordre, mais les pandas ont restreint l'universalité de leurs goûts : ils démentent l'appellation de leur ordre en tirant leur subsistance presque exclusivement du bambou. [...] Assis bien droit sur leur derrière, ils manipulent ses tiges avec leurs pattes avant, se débarrassant de feuilles pour ne consommer que les pousses. [...] Comment le descendant d'une lignée adaptée à la course peut utiliser ses mains de façon si habile ? Ils tiennent les tiges de bambou dans leurs pattes les dépouillent de leurs feuilles en faisant passer les tiges entre un pouce apparemment flexibles et les autres doigts. [...]

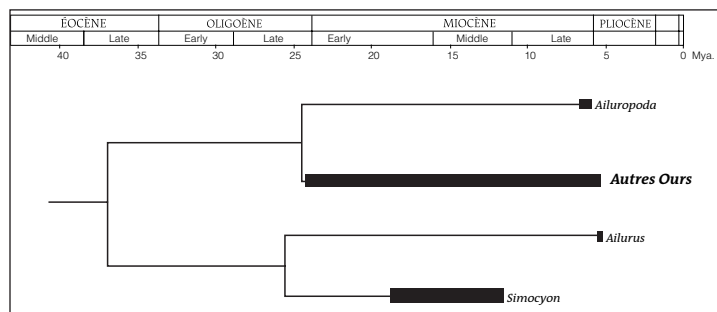
[...] Anatomiquement, le « pouce » du panda n'est pas un doigt. Il est construit à partir d'un os appelé le sésamoïde radial (du radius), normalement un des petits os formant le poignet. Chez le panda, le sésamoïde radial est très développé et si allongé que sa taille atteint presque celle des os des phalanges des vrais doigts. [...] L'allongement du sésamoïde radial a pu être provoqué par une

Document de référence : Les trois « pandas » connus

Nom	 <i>Simocyon batalleri</i>	 <i>Ailurus fulgensou</i> Panda roux	 <i>Ailuropoda melanoleuca</i> ou Panda géant
Régime alimentaire	Carnivore	Végétarien	Végétarien
Fossile ou actuel	Fossile	Actuel	Actuel

Les documents

Document 1 : Représentation actualisée des relations de parenté entre ours et panda



transformation génétique, peut-être une seule mutation affectant le rythme et la vitesse de la croissance. [...] Le vrai pouce du panda, trop spécialisé pour être utilisé à une autre fonction et devenir un doigt opposable, apte à la manipulation, est relégué à un autre rôle. Le panda est donc contraint de se servir des organes disponibles et de choisir cet os du poignet hypertrophié, solution quelque peu bâtarde mais très fonctionnelle.

Le faux pouce du panda géant est en réalité un os du carpe



(os plat de la paume) transformé en « pouce » opposable. (Noté **rs** pour os sésamoïde radial)
Source : Extrait de *Le Pouce du panda ou les grandes énigmes de l'évolution*, Stephen Jay Gould, 1980

Os de la main du panda géant

Document 3

« En étudiant sa denture, nous sommes arrivés à la conclusion que cet animal mangeait essentiellement de la viande, et non des végétaux comme le petit panda actuel, annonce Stéphane Peigné, jeune chercheur au Laboratoire de géobiologie, biochronologie et paléontologie humaine. C'est pourquoi nous pensons que *Simocyon* n'utilisait pas son sixième doigt pour saisir les pousses de bambou comme le fait aujourd'hui le petit panda, mais plus certainement pour aider à sa locomotion dans les arbres. » Et comme les données recueillies sur le site indiquent qu'il vivait dans un environnement peuplé de nombreux prédateurs, « cette étrange facétie de l'évolution de doter *Simocyon* d'un faux pouce apparaît, dans ce contexte, vitale pour ce carnivore plutôt charognard et peu vélocé : il pouvait donc leur échapper en grimpant aisément dans les arbres », poursuit le paléontologue
Source : extrait d'un communiqué de presse du CNRS (Centre national de la recherche scientifique) à propos de la découverte de *Simocyon batalleri* (mars 2005)

Ce qu'il ne faut pas faire

- Faire une analyse exhaustive de tous les documents sans lien avec la problématique.
- Se dispenser d'apporter des connaissances.
- Omettre d'indiquer clairement les relations entre les différents arguments.

Analyse du sujet

La réponse argumentée doit s'appuyer sur les informations pertinentes des documents, mises en relation entre elles et avec les connaissances. Elle comportera deux parties distinctes : une proposition de scénario ayant conduit à l'apparition et au maintien du sixième doigt chez les pandas (mécanismes évolutifs) ; puis comment l'interprétation de cette adaptation a été nuancée suite à la découverte d'un fossile.

Proposition de corrigé

Différents scénarios évolutifs peuvent être acceptés s'ils sont plausibles et sans contradiction avec les documents.

I. Mécanismes ayant conduit à l'apparition et au maintien du sixième doigt chez les pandas : proposition de scénario

Exploitation du document 1

Les pandas ont des liens de parenté avec les ours (plus particulièrement le grand panda) et l'espèce fossile *Simocyon* est un parent plus proche des pandas roux que du grand panda.

Exploitation du document 2

Les pandas actuels ont un sixième « doigt » adapté à leur régime alimentaire de type végétarien (bambou). Cette particularité anatomique a peut-être une origine génétique : une mutation dans un gène qui modifie la croissance de l'os sésamoïde radial.

Cette innovation génétique serait due au hasard, faisant apparaître le faux pouce probablement chez l'ancêtre commun à tous les pandas.

Certaines innovations peuvent donner un avantage aux individus dans un milieu donné. L'innovation a dans ce cas plus de chances d'être transmise à la descendance et de diffuser dans la population : c'est la sélection naturelle.

Il peut donc y avoir conservation de l'innovation si elle n'est pas une gêne et diffusion si elle confère un avantage sélectif, dans deux situations différentes : chez *Simocyon* carnivore pour fuir les prédateurs (document 3), chez les pandas pour se nourrir (document 2). Cette innovation n'a pas été conservée dans le groupe des ours.

II. Comment l'interprétation du sixième doigt des pandas a été nuancée suite à la découverte d'un fossile

Avant la découverte : le sixième doigt des pandas était interprété comme une adaptation à leur régime alimentaire.

Après la découverte de *Simocyon* : il est interprété comme une adaptation chez *Simocyon* pour fuir les prédateurs en grimpant aux arbres ; chez les pandas, pour saisir les branches de bambou. L'innovation, partagée par les pandas géants, les pandas roux et *Simocyon* serait apparue chez l'un de leurs ancêtres communs, mais n'aurait pas été conservée chez les ours. ■

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 1 :

– Expliquer les mécanismes qui déterminent l'évolution de la fréquence d'un allèle dans une population (dérive génétique, sélection naturelle).

Partie 2. 1 :

– Nuancer la définition de l'espèce à partir d'exemples d'hybrides interspécifiques.

Partie 2. 2 :

– Analyser, à partir de documents, des exemples de spéciation dans des contextes et selon des mécanismes variés.

ZOOM SUR...

LA PHALÈNE DU BOULEAU

Papillon nocturne qui existe sous une forme claire, camouflée des prédateurs sur les troncs clairs du bouleau, et une forme sombre. L'étude de l'évolution de la fréquence relative de ces deux formes au sein des populations de papillons à partir du XIX^e siècle en Angleterre constitue un exemple classique pour expliquer le principe de la sélection naturelle. La forme sombre, observée pour la première fois en 1848, est devenue majoritaire dans les régions industrialisées, où les troncs des arbres deviennent plus sombres. La survie différentielle des deux formes de papillons, qui échappent plus ou moins facilement à leurs prédateurs sur les troncs clairs ou sombres, détermine le nombre de leurs descendants et l'évolution de la fréquence des deux allèles impliqués.

SPÉCIATION ET SÉLECTION NATURELLE

Aux États-Unis, les vallées de Sacramento et San Joaquin sont trop sèches pour permettre à la salamandre de Californie d'y vivre. En colonisant le milieu, une partie de la population initiale a contourné les vallées sèches par la zone montagneuse de l'est, tandis que l'autre est passée par la zone côtière à l'ouest. Les salamandres des zones montagneuses sont tachetées, ce qui leur assure un bon camouflage vis-à-vis des prédateurs. Les salamandres des zones côtières sont rouges, comme les animaux venimeux vivant dans ce milieu. Les deux populations ont poursuivi leur migration vers le sud jusqu'à la convergence des deux vallées : les salamandres de l'est et de l'ouest n'y sont plus interfécondes, il s'agit de deux espèces différentes.



Maurice, laboratoire de biodiversité

Sur cette île de l'océan Indien, les écosystèmes terrestres sont si dégradés que les gestionnaires, publics ou privés, n'hésitent plus à tester des techniques de conservation extrêmes pour tenter de les sauver.

De son promontoire en bois, petite excroissance discrète au-dessus de la canopée, du lagon et, par-delà, des côtes verdoyantes de l'île Maurice, Nicolas Zuël, la trentaine et la coupe au bol, s'amuse d'une question posée : « Vous savez, ici, on n'a jamais eu trop de chances avec le contrôle biologique. » La sortie est spontanée. Et complètement décalée puisque son auteur, responsable faune au Mauritian Wildlife Foundation (MWF), travaille sur l'île aux Aigrettes, un site où justement des tortues géantes venues des Seychelles (1 700 kilomètres plus au nord) ont été introduites pour ranimer un écosystème zombie. Difficile néanmoins de contredire le jeune homme.

Car si Maurice est l'une des terres les plus tardivement colonisées par l'homme – en 1598 par les Hollandais –, elle est aussi l'une des plus abîmées écologiquement. Le matin même, Vincent Florens, écologue à l'université de Maurice, cheveu longs et couvre-chef d'aventurier, le rappelait d'un autre point de vue situé de l'autre côté du lagon, au sommet du mont Camisard : « A Maurice, 95 % des habitats terrestres ont été détruits par les plantations de cannes à sucre [70 % de la surface de l'île] et par la pression démographique », soit 648 habitants au kilomètre carré contre 113 en France.

Un délabrement qui, autant le dire tout de suite, ne saute pas aux yeux. « Les Mauriciens réagissent comme vous, explique Christine Griffiths, la jeune gestionnaire irlandaise d'une parcelle privée du mont Camisard, "la vallée de l'Est". Ils voient du vert, des oiseaux, de la variété et ne comprennent pas pourquoi on leur parle de dégradation de la biodiversité. Mais c'est parce qu'ils ne discernent pas ce qui est originaire de l'île de ce qui

ne l'est pas. » Pas étonnant vu que tout ce qui se remarque ici, tout ce qui prolifère, tout ce qui est banal est le fruit d'une introduction biologique, volontaire ou non.

Ainsi les martins tristes, ces oiseaux sombres fréquents comme les pigeons à Paris, sont le fruit du premier essai de lutte biologique de l'histoire moderne. Originaires d'Inde, ils ont été introduits en 1762 par les Français pour contrôler les populations de sauterelles qui ravageaient les plantations. « Un succès mais qui s'est toutefois soldé par la prolifération des martins, peut-être au détriment d'oiseaux endémiques, même si cela reste à démontrer. Attention ! Sous votre pied ! », s'interrompt Vincent Florens.

Sous mon pied, un escargot gros comme le poing et pourvu d'une épaisse coquille conique. C'est l'escargot géant d'Afrique (*Lissachatina fulica*). Introduite (sans succès) pour soigner les douleurs de poitrine de la femme d'un gouverneur au début du XIX^e siècle, l'espèce a proliféré, au détriment des mollusques locaux et des cultures. Un problème que les autorités mauriciennes ont tenté d'endiguer dans les années 1960 en introduisant deux autres espèces d'escargots carnivores, l'une africaine, l'autre américaine, censées manger les jeunes *Lissachatina*. « Mais cela n'a jamais fonctionné, continue Vincent Florens, ce qui n'a pas empêché le gouvernement mauricien de protéger ces deux espèces pendant plus de trente ans... » Jusqu'à ce que des scientifiques, comme le malacologiste australien Owen Griffiths, démontrent, en 1991, que les estomacs des escargots carnivores contenaient à peu près tout sauf de la *Lissachatina*. « En tentant de réguler une espèce invasive, on en avait ajouté deux autres. »

Une goutte dans l'océan des

espèces introduites à Maurice, notamment dans le règne végétal. « Il y a une raison historique à cela, poursuit le chercheur : le jardin de Pamplemousses. » Créé par les Français en 1770, ce jardin botanique a permis d'acclimater beaucoup d'épices et de plantes comestibles (75 %) ou produisant de belles fleurs. Ainsi, la liane de cerf (*Hiptage benghalensis*) ou encore le goyavier de Chine (*Psidium cattleianum*) ont-ils été choyés et plantés sciemment dans les jardins de Maurice avant de devenir des problèmes. « Elles étouffent les plantes indigènes et, pire, le goyavier attire en forêt les cochons », animaux eux-mêmes introduits au XVI^e siècle par les Hollandais, pour faciliter le ravitaillement des navigateurs.

« Du coup, même les 5 % d'habitats terrestres non détruits sont très dégradés, éclatés en confettis et envahis aux deux tiers par des espèces étrangères », poursuit l'écologue. D'après les estimations, seul 1,2 % du territoire, soit à peine 30 km², est encore dominé par des espèces indigènes. Résultat : 80 % des espèces endémiques sont en voie d'extinction. « Voilà pourquoi, ici, on tente un peu tout pour empêcher l'homogénéisation du milieu, reprend le chercheur. On n'a plus grand-chose à perdre. » Les premiers programmes innovants débutent dès les années 1930 avec la mise en place de microréserves, les Conservation Management Areas (CMA), des parcelles de forêts protégées d'un enclos et dés herbées dès que nécessaire. Gérés principalement par le Service de conservation des parcs nationaux (NPCS), ces CMA, une vingtaine aujourd'hui, couvrent près de 300 hectares et servent de refuges à plusieurs espèces endémiques. D'un geste délicat, Christine Griffiths ouvre une barrière et, par là même, la voie vers l'une des

zones les mieux conservées des terrains privés qu'elle a en gestion. « Ici, une nouvelle espèce a été découverte », s'enthousiasme Vincent Florens. Cette forêt d'altitude est aérée, très différente de l'impénétrable végétation mauricienne décrite par les premiers Hollandais. « Les plantes invasives poussent très rapidement, reprend Christine Griffiths. Elles aiment la lumière et profitent de la moindre trouée pour s'implanter. » Ce qui empêche les plantes natives, plus lentes, de pousser. « Et pour ne rien arranger, nos études ont montré que l'arrachage systématique des plantes invasives avait tendance à aggraver la situation à cause du piétinement, qui détruit les jeunes pousses d'espèces natives. »

Ce type de constat a amené la jeune femme et son patron, Owen Griffiths (de simples homonymes), à tester de nouvelles approches de conservation sur des terres acquises dans le milieu des années 2000. La vallée de l'Est donc mais aussi Ebony Forest, où des associations d'essences forestières à croissance rapide, capables de faire de l'ombre sans couvrir le sol, sont évaluées afin de réduire le coût de gestion. « Ah mon bébé ! », s'exclame Vincent Florens en enlaçant un tronc rachitique. Plutôt une tige en fait. Un Harungana, une plante invasive pour Christine Griffiths, indigène et précieuse aux yeux de l'écologue. Selon lui, il s'agit d'une plante pionnière, mentionnée par les premiers botanistes de l'île, qui prolifère dans les premiers stades du développement forestier mais qui disparaît au bout de vingt à trente ans. « C'est un classique de l'écologie forestière », insiste-t-il sans convaincre la jeune Irlandaise. « Cette plante est un cauchemar, elle prolifère dès qu'il y a une trouée. Nous l'enlevons systématiquement. » Les vérités en écologie sont ainsi : discutables.

Nous faisons ensuite marche arrière, dans l'espoir, complètement vain, d'échapper aux moustiques. Sur le chemin du retour, nous croisons des techniciens, une bouteille remplie de peinture à la main. « *Du désherbant, indique l'Irlandaise. Depuis quelques années, sur nos terres, nous n'arrachons plus les plantes invasives, nous les blessons et couvrons leur blessure avec un désherbant coloré, pour voir la zone d'application. Puis nous laissons les plantes pourrir sur pied.* » Elles continuent ainsi à faire de l'ombre, servent d'habitats aux insectes et se changent, après décomposition, en nutriments. Testée depuis quelques années, la pratique a fait ses preuves et diminue par trois les coûts de gestion. Pourtant, elle a du mal à s'implanter dans les parcs nationaux. « *Cela doit en arranger certains de payer plus qu'il ne faut* », insinue Vincent Florens qui, en 2013, a posé ouvertement la question, s'attirant les foudres des autorités. « *Les pratiques sont juste lentes à évoluer* », rétorque Christine Griffiths. Le début d'un autre débat, et donc d'un autre festin des moustiques.

« *À Maurice, plusieurs écoles de pensée de la conservation s'affrontent, expliquera plus tard Stéphane Buord, directeur scientifique du Conservatoire botanique national de Brest. Il y a la logique du gestionnaire, du forestier, du NPCS qui, dans son parc, plante les espèces qui lui semblent intéressantes, la logique de l'écologue qui réfléchit en termes de dynamiques lentes des milieux et, enfin, il y a la Mauritian Wildlife Foundation qui tente de reconstruire des habitats* », comme d'autres construisent des maisons avec un jeu de construction. L'histoire de cette organisation non gouvernementale (ONG) commence dans les années 1970 avec un coup de poker qui a fait entrer Maurice dans l'histoire mondiale de la conservation.

À l'époque, un oiseau de proie, le faucon crécerelle de Maurice, est en phase d'extinction à cause de l'insecticide DDT. Seuls quatre individus sont répertoriés, dont une femelle. La décision, alors, est prise de récupérer leurs œufs pour les faire éclore en incubateur, élever les oisillons et les faire se repro-

duire en captivité. Un succès : un demi-millier d'individus volettent aujourd'hui à Maurice. De quoi donner des ailes à certains qui fondent le MWF en 1986 et sauvent de l'extinction d'autres oiseaux, comme le pigeon des mares ou encore la perruche de Maurice. C'est par ce biais que le MWF s'est par la suite posé la question des habitats, appréhendés de façon singulière par l'ONG, notamment à l'île aux Aigrettes.

Ce plateau corallien de 25 hectares est posé sur le lagon, à quelques minutes en bateau de Mahébourg, au sud-est de Maurice, et sa gestion est déléguée au MWF depuis les années 1990. « *Ce site était intéressant à plus d'un titre, explique Nicolas Zuël en descendant de son promontoire. D'abord, il contenait quelques ébènes blanches, une espèce végétale très menacée à Maurice.* » En outre, il était proche de la côte et avait des berges en forme de surplomb, ce qui le rendait difficile d'accès pour les espèces invasives de Maurice. En théorie, un simple travail de nettoyage et d'éradication devait ainsi permettre de restaurer le milieu. En pratique, rien de tel : l'écosystème originel ne reprenait jamais le dessus. Les graines d'ébènes blanches tombaient au sol, parfois germaient, mais mouraient dans la foulée. « *L'écosystème paraissait vivant mais il n'était pas fonctionnel, continue le jeune Mauricien. Il lui manquait quelque chose.* » Mais quoi ?

La réponse a été trouvée au terme d'une série d'observations : d'abord, l'ébène blanche ainsi que d'autres espèces partageant le

même habitat sont hétérophiles, c'est-à-dire que les feuilles situées à proximité du sol sont différentes en forme et en couleur de celles situées en hauteur. Un trait évolutif qui apparaît souvent pour lutter contre les brouteurs. Ensuite, dans une grotte de l'île, les chercheurs mettent au jour les os datant de plusieurs milliers d'années d'une espèce de tortue endémique de Maurice. Des tortues géantes sur la carapace desquelles, ont raconté les Hollandais, huit à neuf personnes pouvaient s'asseoir pour prendre leur repas... non sans avoir pris auparavant soin de les déguster jusqu'à la dernière en 1844.

De ce double constat est née l'hypothèse que les tortues pourraient être nécessaires au fonctionnement de l'écosystème mort-vivant de l'île aux Aigrettes. Faute de pouvoir ressusciter les espèces disparues, le MWF songe à introduire une espèce analogue capable de remplir la même fonction. Un plan très discuté, mais que le MWF met à exécution en 2000. Quatre tortues géantes des Seychelles sont alors introduites. « *Un succès sans précédent, raconte Christine Griffiths, qui a effectué sa thèse sur le sujet. D'abord parce que les tortues se sont mises à brouter les plantes invasives et ensuite parce que, en mangeant les fruits mûrs tombés au sol, elles ont permis la dissémination des graines qui ont germé mieux et plus vite.* » « *La preuve, intervient Nicolas Zuël, en désignant une touffe bien serrée de tiges, presque des troncs : elles sont issues d'une crotte de tortues.* » Ces reptiles sont désormais au nombre de 21 sur l'île, tous introduits à l'âge adulte.

L'expérience est si probante que des réintroductions de tortues sont en cours dans d'autres îles mauriciennes. « *En théorie, elles pourraient être introduites sur l'île principale, poursuit Christine Griffiths. Mais c'est délicat à cause des vols observés dans les élevages.* » La présence des tortues ne règle pas tout puisque certaines plantes invasives ne sont pas broutées. Comme les queues-de-rat qui forment des parterres compacts qu'il faut arracher à la main. « *Et puis d'autres espèces invasives poussent en haut de la canopée, hors de portée des tortues, poursuit Nicolas Zuël. Leurs graines sont apportées par les oiseaux venus de Maurice.* » Qui côtoient ceux réintroduits par le MWF. « *Notre objectif est de reconstruire brique par brique l'écosystème de cette île. Nous avançons en découvrant les problèmes au fur et à mesure.* » Après les tortues et autres reptiles, les passereaux, le MWF travaille sur les oiseaux marins, dont le guano serait un bon fertilisant. « *Le problème, critique Vincent Florens, c'est que des libertés sont prises avec l'écologie. Certaines espèces, notamment des plantes indigènes d'intérêt surtout ornemental, n'ayant jamais poussé dans cet îlot, y sont plantées, ce qui transforme l'écosystème en jardin. Rien ne dit que ces introductions ne poseront pas à terme des difficultés.* » A ce jour, rien ne permet non plus d'affirmer que l'écosystème sous perfusion de l'île aux Aigrettes parviendra un jour à l'équilibre. ■

Viviane Thivent
(28 mai 2014)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article fait le point sur la dégradation des écosystèmes terrestres, et donc de la biodiversité, sur l'île Maurice. Il revient également sur les solutions mises en œuvre pour tenter d'y remédier. Les plantations de cannes à sucre et la forte densité de population ont eu raison de la quasi-totalité des écosystèmes terrestres.

Pourtant, cette dégradation de la biodiversité reste peu visible du fait de l'introduction volontaire ou involontaire d'un grand nombre d'espèces étrangères à l'île. Certaines de ces espèces supplantent même parfois les espèces endémiques, celles-ci n'occupant plus maintenant qu'une minuscule portion de l'île. Des programmes de conservation des espèces endémiques ont donc été mis en œuvre depuis 1930. Cependant, les avis

sont divergents, notamment sur la préservation ou non de certaines plantes invasives, sur le bien-fondé de l'introduction de certaines espèces étrangères... Les expériences menées sur l'île aux Aigrettes montrent des résultats intéressants, mais elles ne résolvent pas tous les problèmes. L'île Maurice semble donc servir de « laboratoire » de biodiversité, même si les résultats de cette « expérience » ne sont pas encore connus.

ZOOM SUR...

La place de l'homme dans le monde vivant

L'homme fait partie, avec les grands singes, du groupe des hominoïdes, qui appartient à l'ordre des primates. Comme tous les mammifères, il est un vertébré amniote et tétrapode, caractéristique partagée avec les amphibiens, les reptiles et les oiseaux. Enfin, il partage avec tous les autres animaux des caractéristiques encore plus anciennes, comme la nature de ses cellules, qui sont eucaryotes.

NOTIONS CLÉS

ARBRE PHYLOGÉNÉTIQUE

Traduit des liens de parenté entre des espèces. Pour chaque caractère on définit deux états, l'un étant dérivé de l'autre. Le passage de l'état ancestral à l'état dérivé d'un caractère est une innovation évolutive qui a nécessairement été transmise de génération en génération jusqu'aux organismes observés. Les nœuds de l'arbre indiquent le dernier ancêtre commun des espèces qui partagent des caractères dérivés exclusifs. L'arbre phylogénétique dit « qui partage quoi avec qui » et donc « qui est le plus proche parent de qui » et non pas « qui descend de qui » (G. Lecointre, « La construction de phylogénies », *APBG*, 1995 ; 1 : 109-36).

LES FOSSILES NE SONT PAS DES ANCÊTRES

Les fossiles correspondent à des espèces réelles ayant vécu durant une période géologique donnée et ne coïncident pas avec les nœuds des arbres phylogénétiques.

PARENTÉ

Chercher la parenté c'est « chercher le groupe frère, et non l'ancêtre. Il s'agit, pour une espèce donnée, du groupe avec lequel elle partage une innovation évolutive exclusive : elle ne la partage avec aucun autre groupe. L'ancêtre au sens propre restera toujours inconnaisable, mais on peut déduire certains des caractères qu'il devait posséder, les caractères dérivés qui définissent le groupe » (G. Lecointre, *op. cit.*).

Un regard sur l'évolution de l'homme

L'espèce humaine appartient à l'ordre des primates, qui regroupe environ 230 espèces d'une grande diversité et dont les comparaisons anatomiques et moléculaires permettent de préciser les liens de parenté. Le séquençage des génomes de l'homme et du chimpanzé a révélé une identité de plus de 99 %. Ainsi, les études génétiques et l'observation du développement de l'homme et de son plus proche parent permettent de comprendre comment se construisent leurs phénotypes différents à partir d'un patrimoine génétique très proche. L'histoire de la lignée humaine, dont l'homme actuel est l'unique représentant, montre une évolution buissonnante. Sa phylogénie reste discutée et révisable à tout moment, au gré des découvertes de fossiles.

La place de l'homme parmi les primates

Les primates partagent **des caractères communs**, dont un pouce opposable aux autres doigts de la main, des ongles plats et des orbites en façade (favorisant une vision binoculaire). Les grands singes dits « **hominoïdes** » se caractérisent par l'absence de queue et la pratique au moins partielle de la bipédie. Excepté l'homme, qui a colonisé toute la planète, les primates vivent dans les régions intertropicales du globe (Australie exclue).

L'étude des caractères anatomiques ne permet pas forcément de préciser **les liens de parenté** au sein du groupe des hominoïdes dont fait partie l'homme. Les comparaisons chromosomiques et moléculaires sur de nombreux gènes montrent que les plus proches parents de l'homme sont les chimpanzés. Elles ont permis d'établir **l'arbre phylogénétique** des primates et d'estimer les dates de divergence entre les lignées.

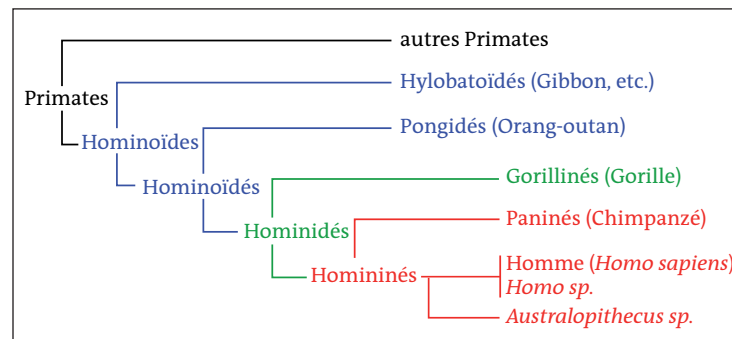
Les plus lointains **ancêtres communs** à l'ensemble des primates seraient apparus il y a 65 à 50 millions d'années (Ma) en Afrique. Les hominoïdes seraient apparus il y a 23 millions d'années, les hominidés (dont font partie les gorilles, les chimpanzés et les hommes), il y a 10 millions d'années. Les primates partageant l'ancêtre commun le plus récent avec l'homme actuel sont les chimpanzés (*Pan troglodytes*) et les bonobos (*Pan paniscus*).

Les premiers représentants de la lignée humaine, qui ont donc un ancêtre commun avec l'homme plus récent qu'avec les chimpanzés, seraient apparus il y a 5 à 10 millions d'années.

Les caractères distinctifs de l'homme

L'homme se distingue du chimpanzé par un ensemble de caractères dont certains sont liés à **la bipédie permanente** : un trou occipital avancé, des membres antérieurs réduits par rapport aux membres postérieurs, un bassin court et large et des fémurs convergents en

sont des exemples. Par rapport à celui du chimpanzé, le crâne de l'homme témoigne d'un volume cérébral plus important, et sa face est aplatie. D'autres différences s'observent dans la mâchoire et la dentition. Les témoignages d'activités culturelles (outils, gravures, peintures rupestres, etc.) sont très développés. Lorsqu'un fossile présente au moins l'un de ces caractères distinctifs, il est susceptible d'être placé au sein de **la lignée humaine**, sans

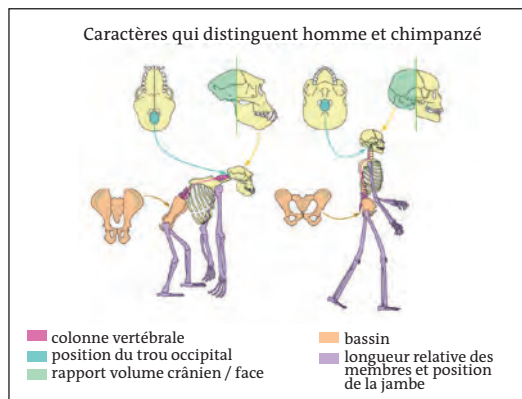


Arbre phylogénétique des primates

pour autant être considéré comme un ancêtre direct de l'homme actuel.

La construction du phénotype humain

L'analyse de 97 gènes fonctionnels de l'homme et du chimpanzé a montré une coïncidence de **99,4 %**. L'étude du développement pré et post-natal chez les deux espèces permet de comprendre comment de si petites différences génétiques peuvent aboutir à **des phénotypes distincts**. Dans les deux cas, le phénotype s'acquiert sous l'effet de l'interaction entre l'expression de l'information génétique et l'environnement.



Deux exemples d'outils découverts à proximité de fossiles de la lignée humaine (à gauche : galet aménagé ; à droite : biface).

Des mutations affectant l'expression des gènes homéotiques peuvent induire des ralentissements ou accélérations de certaines phases du développement, ayant pour conséquence des modifications anatomiques (taille, forme et position d'éléments du squelette). Ainsi, lors du développement embryonnaire chez l'homme, l'allongement des phases de mise en place du système nerveux conduit à un développement plus important du cerveau que chez le chimpanzé.

L'homme conserve à l'âge adulte des caractéristiques qui n'existent que chez les jeunes primates : on parle de **néoténie**. En particulier le trou occipital reste central et permet la bipédie chez l'homme, tandis qu'il recule au cours du développement post-natal du chimpanzé quadrupède. La relation aux autres individus, les interactions sociales (apprentissage, transmission des cultures, etc.) contribuent à façonner ce phénotype déterminé génétiquement.

Une évolution buissonnante

De nos jours, la lignée humaine est représentée par la seule espèce *Homo sapiens*, mais elle a été précédée

par de nombreuses espèces disparues, notamment des genres *Australopithecus* et *Homo*.

Orrorin tugenensis et *Ardipithecus kadabba* (– 6 Ma) en Afrique orientale et *Sahelanthropus tchadensis* « Toumaï » (– 7 Ma) en Afrique centrale sont les plus anciens hominins découverts.

Les australopithèques ont vécu de – 4,2 Ma à – 1 Ma ; on trouve de nombreux fossiles en Afrique de l'Est. Les traces de pas du site de Laetoli en Tanzanie attestent de leur bipédie, il y a 3,6 Ma.

Le genre *Homo* regroupe des espèces bipèdes avec une boîte crânienne plus volumineuse, une réduction de la face et des canines réduites. *Homo habilis* en est le premier représentant connu, les fossiles les plus anciens retrouvés en Afrique sont datés de – 2,3 Ma.

Homo erectus (– 1,8 à – 0,6 Ma) est le premier à domestiquer le feu et à produire et utiliser des outils plus sophistiqués : les bifaces. Certains groupes d'*Homo erectus* s'aventurent hors d'Afrique et partent à la conquête de l'Eurasie en plusieurs vagues, de – 1,7 Ma à – 120 000 ans. Leur arrivée en Europe serait datée de – 650 000 ans.

Homo sapiens serait apparu en Afrique il y a moins de 200 000 ans et aurait remplacé les populations d'*Homo erectus* au cours de ses migrations successives. Ces groupes produisaient des outils perfectionnés et variés, et enterraient leurs morts. De nombreux témoignages artistiques ont été découverts.

Homo neanderthalensis (– 80 000 à – 35 000 ans), retrouvé exclusivement en Europe, présente un crâne volumineux et un bourrelet sus-orbitaire épais. Il fabriquait des outils de pierre taillée et enterrait ses morts. Les raisons de son extinction ne sont pas totalement élucidées. Il a certainement été en compétition avec *Homo sapiens*, avec lequel des échanges génétiques ont pu avoir lieu.

La lignée humaine montre une évolution qui n'est pas linéaire mais **buissonnante** : plusieurs lignées ont évolué et cohabité, voire ont été interfécondes. L'histoire récente montre une réduction de la diversité : *Homo sapiens* est le seul représentant actuel de ce buisson touffu. Cette réduction de la diversité concerne plus généralement les hominoides, dont certains sont en voie d'extinction. À l'inverse, d'autres primates comme les cercopithécoïdes montrent une grande diversification à l'heure actuelle.

Une grande partie des connaissances qui permettent d'établir les arbres phylogénétiques des primates sont fondées sur des découvertes paléontologiques. Ces connaissances sont donc révisables. ■

DEUX ARTICLES DU MONDE À CONSULTER

Origines de l'homme – Une histoire à réinventer p. 27-28
(Christiane Galus, 30 août 2006)

Neandertal en nous p. 28-29
(Hervé Morin, 8 mai 2010)

MOTS CLÉS

HÉTÉROCHRONIE

Modification de la durée ou de la vitesse des phases du développement au cours de l'évolution.

HORLOGE MOLÉCULAIRE

Estimation de la date de divergence entre différentes lignées depuis leur dernier ancêtre commun par comparaisons moléculaires. Pour un gène donné, plus les séquences de deux espèces sont différentes, plus la divergence entre les lignées de ces deux espèces est ancienne.

NOTIONS CLÉS

ÉVOLUTION BUISSONNANTE

Les nombreux fossiles découverts ne doivent pas être considérés comme une succession d'espèces descendant les unes des autres. Ces fossiles peuvent être des représentants de lignées disparues. L'arbre phylogénétique des hominins ressemble à un buisson avec de multiples branches.

HOMO SAPIENS

Sur le plan de l'évolution, *Homo sapiens* est une espèce comme les autres. Il n'est pas l'aboutissement de l'évolution, et l'établissement de ses liens de parenté avec les fossiles de la lignée humaine doit être mené avec la même rigueur que pour n'importe quelle espèce. Cependant, plus les fossiles sont récents et nombreux, plus des liens de parenté précis peuvent être établis.

ZOOM SUR...

Lucy

Cette australopithèque découverte en Éthiopie en 1974 a 3 millions d'années. Son squelette a été reconstitué à 40 % grâce aux 52 fragments osseux découverts. Les australopithèques sont de petite taille, présentent une faible capacité crânienne, sont bipèdes, mais leur démarche devait être « chaloupée ».

ZOOM SUR...

LA CONTROVERSE IDA

En mai 2009, à New York, *Darwinius masillae*, un fossile de 47 millions d'années baptisé « Ida », était présenté comme un possible ancêtre commun à l'ensemble des singes anthropoïdes et qualifié de « chaînon manquant » par ses découvreurs. Les études qui ont suivi cette découverte médiatisée et controversée ont montré qu'Ida était en fait un représentant d'un groupe ancêtre des lémuriniens. Les comparaisons de la dentition, des mâchoires et de 360 caractères chez plus d'une centaine de primates a permis de réfuter l'hypothèse initiale. Les caractères ressemblants chez *Darwinius masillae* et les anthropoïdes seraient apparus indépendamment par convergence évolutive, sous la pression du milieu identique.

LE TROUBLE JETÉ PAR LA DÉCOUVERTE DE TOUMAÏ

La découverte d'un fossile peut poser davantage de problèmes qu'il n'en résout. Ce fut le cas de Toumaï, découvert au Tchad en 2001. Daté de 7 millions d'années, proche de la divergence entre la lignée humaine et celle des chimpanzés, *Sahelanthropus tchadensis* a semé le trouble en raison du lieu de sa découverte, et de sa morphologie. Bien plus âgé que les australopithèques, il présente des caractères « plus humains » : une face peu prognathe, des canines réduites et une probable bipédie, alors que sa capacité crânienne et sa taille devaient être comparables à celles d'un chimpanzé.

L'ÉVOLUTION N'A PAS DE BUT

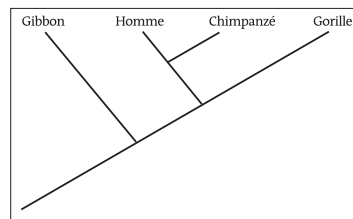
Pour Teilhard de Chardin (1881-1955), l'homínisation est « l'ensemble des processus évolutifs par lesquels les hommes ont acquis les caractères qui les distinguent des autres primates ». L'homínisation concerne notamment « l'acquisition d'une bipédie de plus en plus parfaite et d'un encéphale de plus en plus volumineux ». Attention toutefois aux formulations qui suggèrent une finalité à l'évolution, l'homme n'en est pas l'aboutissement.

Partie 2.1 : Liens de parenté au sein des primates

L'intitulé du sujet

À partir des seules informations recueillies par l'exploitation du document :

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



Arbre phylogénétique de quelques espèces de primates actuels à compléter

Le document

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

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

L'analyse du sujet

Pour traiter ce sujet, il faut avoir compris la construction d'un arbre phylogénétique à partir de l'étude des caractères dérivés présentés par différentes espèces.

Proposition de corrigé

Les innovations se placent sur les entre-nœuds

L'absence de queue est un caractère dérivé présent chez les quatre espèces, donc chez leur dernier ancêtre commun. L'innovation évolutive est à placer avant le nœud correspondant.

La fusion prénatale des os du poignet et la présence d'un sinus frontal sont deux caractères dérivés exclusivement communs à l'homme, au chimpanzé et au gorille. Ces innovations sont à placer avant le nœud représentant le dernier ancêtre commun de ces trois espèces.

La bipédie est un caractère dérivé uniquement présent chez l'homme : ce caractère n'existait pas chez le dernier ancêtre commun de l'homme et du chimpanzé, il est à placer après le nœud.

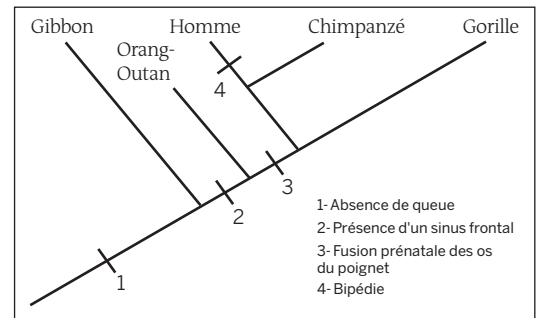
Ce qu'il ne faut pas faire

- Utiliser uniquement vos connaissances pour répondre aux questions sans faire de raisonnement logique à partir du document.

Caractéristiques du plus récent ancêtre commun à l'homme, au chimpanzé et au gorille

Cet ancêtre commun présentait les caractères dérivés communs aux trois espèces : absence de queue, présence d'un sinus frontal et fusion prénatale des os du poignet. Il ne présentait pas le caractère dérivé propre à l'homme : la bipédie.

Degré de parenté entre l'orang-outan et les autres espèces de l'arbre



Arbre phylogénétique de quelques espèces de primates actuels

L'orang-outan partage deux caractères dérivés avec l'homme, le chimpanzé et le gorille. Il ne présente pas de fusion prénatale des os du poignet. Sa branche s'intercale donc entre le dernier ancêtre commun de l'ensemble des espèces et le dernier ancêtre commun de l'ensemble homme-chimpanzé-gorille.

L'orang-outan possède avec l'homme, le chimpanzé et le gorille deux caractères dérivés et un ancêtre commun qu'il ne partage pas avec le gibbon (un seul caractère dérivé en commun). Il est donc plus proche de l'homme, du chimpanzé et du gorille que du gibbon. ■

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 2.1 : Positionner des espèces de primates fossiles dans un arbre phylogénétique à partir de l'étude de leurs caractères.

Partie 2.2 : Discuter de la remise en question d'un arbre phylogénétique de la lignée humaine suite à la découverte d'un fossile.

Partie 2.2 : Mettre en relation la comparaison de séquences de certains gènes et les différences morphologiques entre le chimpanzé et l'homme.

Origines de l'homme

Une histoire à réinventer

Ces dix dernières années, la paléanthropologie a considérablement progressé, grâce aux découvertes de nouveaux fossiles et à la génétique. Plus elle se dévoile, plus l'histoire de l'homme devient complexe.

La paléanthropologie, qui célèbre cette année cent cinquante ans d'existence, est en révolution. Ces dix dernières années ont vu une accumulation de découvertes qui bouleversent les théories, chamboulent les modèles d'émergence de l'homme moderne, bousculent les idées reçues sur la prétendue unicité de notre espèce. L'étude des nouveaux fossiles – en Afrique de l'Ouest, en Europe, en Asie – mais aussi les progrès de la génétique ne dressent pas le portrait d'une humanité quittant l'animalité pour progresser linéairement vers *Homo sapiens*, mais celui d'une grande diversité d'espèces humaines ayant coexisté.

Le chemin parcouru, depuis un siècle et demi, est considérable. C'est le Français Boucher de Perthes qui, au XIX^e siècle, fonde la préhistoire en présentant à l'Académie des sciences un mémoire sur les silex taillés découverts en 1844 dans les terrasses de la Somme, près d'Abbeville. Il estime que ces silex, trouvés à côté de restes de mammouths et de rhinocéros, sont de main d'homme. Son mémoire est refusé, mais il persévère et est suivi par d'autres scientifiques français et étrangers.

En août 1856, un coup de pioche dans une carrière de la vallée de Neander en Allemagne, près de Düsseldorf, fait apparaître d'étranges ossements humains. Cette découverte, suivie par d'autres, met en évidence, pour

la première fois, l'existence d'une autre humanité, celle d'*Homo neanderthalensis*. C'est, stricto sensu, la naissance de la paléanthropologie. Les caractéristiques particulières de l'homme de Neandertal déplairaient fortement aux paléontologues. Le Français Marcellin Boule en fera une brute – image qui colle encore à la peau de notre cousin. Quand, plus tard, on trouvera les restes anciens d'*Homo sapiens* – notre espèce –, bien plus présentables, beaucoup formuleront, d'une certaine manière, leur soulagement.

On remonte, aujourd'hui, plus loin. Les plus anciens représentants de l'espèce humaine ont été découverts en Afrique, tels *Homo habilis* (2 millions d'années) et *Homo ergaster* (1,9 million d'années). D'autres ont été mis au jour en Asie et en Géorgie (*Homo georgicus*, 1,8 million d'années). Actuellement, la plupart des paléanthropologues s'accordent à penser qu'*Homo ergaster*, grand et taillé pour la course, a été à l'origine de la première migration de l'humanité à partir de l'Afrique. Toutefois, certains spécialistes, comme Robin Dennell et Wil Roebroeks, soutiennent que les premiers grands explorateurs ont pu être les australopithèques, des pré-humains qui ont vécu en Afrique entre 4,2 et 2,5 millions d'années. Ces hominidés marchaient debout et possédaient des mâchoires puissantes munies de dents robustes.

La grande interrogation actuelle concerne l'ancêtre commun hominidé-chimpanzé. On en ignore tout, faute de fossiles, et on ne connaît pas la date de la séparation entre les deux espèces. Les paléanthropologues s'accordent pour la fixer vers 7 millions d'années. Cela permet d'intégrer dans la lignée humaine des êtres très anciens tels *Ardipit hecus kadabba* (5,2 à 5,8 millions d'années), découvert en Éthiopie par Yohannes Haile-Selassié ; *Orrorin tugenensis* (6 millions d'années), mis au jour au Kenya par Brigitte Senut et Thomas Pickford, et *Sahelanthropus tchadensis* (Toumaï, 7 millions d'années), révélé par les équipes de Michel Brunet et considéré, malgré des contestations, comme appartenant au rameau humain.

Mais à la mi-2006, une étude génétique, réalisée par Nick Patterson et David Reich du Massachusetts Institute of Technology (États-Unis) et publiée dans la revue *Nature*, jette un pavé dans la mare en reculant la date de la spéciation entre hominidé et chimpanzé entre 6,3 et 5,4 millions d'années. De plus, estiment les chercheurs, elle ne s'est pas faite en une fois : après s'être séparées, les deux espèces se seraient retrouvées et hybridées, avant de se séparer définitivement.

L'hypothèse formulée par les scientifiques américains – qu'ils qualifient eux-mêmes de provocatrice – à partir de l'étude de

20 millions de paires appartenant au génome de l'homme, du chimpanzé, du gorille, de l'orang-outan et du macaque pourrait remettre en cause l'appartenance des plus vieux pré-humains au groupe des hominidés. Ce que contestent bien évidemment les paléanthropologues, et notamment Michel Brunet (université de Poitiers, CNRS). Ce dernier estime qu'il s'agit de « jeux intellectuels », tandis que Jean-Jacques Jaeger, professeur de paléontologie à l'université de Poitiers, estime que l'hypothèse n'est pas démontrée et la qualifie de « géo-poésie ».

En revanche, il est clair, selon lui, qu'« on ne sait pas à quoi ressemblaient ces êtres ». « À chaque fois qu'on découvre un fossile nouveau très ancien, poursuit Jean-Jacques Jaeger, on met en évidence des mosaïques de caractères qu'on ne connaît pas. » Par exemple, Toumaï, *Orrorin* et *Ardipit hecus* forment un stade évolutif nouveau incluant la bipédie. Mais dans quel cadre celle-ci est-elle apparue ? « On prend aujourd'hui ce caractère comme une signature de l'homination. Mais c'est peut-être un attribut ancestral de quelques singes d'Afrique, que certains d'entre eux ont perdu », explique le scientifique.

Comme le souligne un autre chercheur, Marc Godinot, paléontologue et spécialiste de l'évolution des primates au Muséum national d'histoire naturelle, « une bipédie postu-

rale dans les arbres a pu précéder une bipédie de marche, afin que le bassin puisse s'adapter ». Car il fallait bien que les premiers hominidés aient la capacité de bien se déplacer debout avant de s'aventurer sur le sol de la savane. « On ne pourra pas avancer sur les plus anciens représentants de la lignée humaine tant qu'on n'aura pas des fossiles datés de 10 et 5 millions d'années, soit avant et après le dernier ancêtre commun, avance Pascal Picq, maître de conférences au Collège de France. C'est le seul moyen de connaître l'évolution de différents caractères. La séparation entre les espèces a sans doute été plus récente et plus complexe qu'on ne le pense. » Au passage, Pascal Picq égratigne les paléanthropologues, auxquels il reproche d'avoir « une vision gradualiste de l'évolution humaine. Même si on trouve des fossiles de 8 à 9 millions d'années, je suis sûr qu'on les mettra dans la lignée humaine et non dans celle des grands singes. »

Le plus ancien ancêtre commun hominidé-chimpanzé n'est pas le seul sujet de débat actuellement. On s'interroge toujours sur les causes de la disparition de l'homme de Neandertal, une espèce admirablement adaptée à son environnement glaciaire. Son déclin inexorable, il y a trente mille ans, a-t-il été provoqué par la concurrence avec *Homo sapiens*, par la maladie ou par tout autre chose ? Une troisième interrogation concerne le petit homme découvert, en 2003, sur l'île de Florès en Indonésie. Vieux de dix-huit mille ans et doté d'une stature de 1 m, il possédait une capacité cérébrale de 380 à 400 cm³, plus proche de celle du chimpanzé ou de l'australopithèque que de celle de Lucy (3,2 millions d'années). En raison de ses caractéristiques, ses découvreurs l'ont classé dans une nouvelle espèce humaine : *Homo floresiensis*. Et certains paléanthropologues pensent que ce petit être, issu d'un *Homo erectus* resté isolé

pendant longtemps dans l'île, a vu sa taille diminuer, comme cela est arrivé pour de nombreuses espèces animales. Mais cette explication est contestée par plusieurs études. La dernière en date, publiée le 21 août dans les *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS) et réalisée par

une équipe de chercheurs indonésiens, australiens et américains, estime que l'homme de Florès serait en réalité issu d'*Homo sapiens* pygmées, atteints de plusieurs anomalies, dont la microcéphalie. ■

Christiane Galus
(30 août 2006)

**POURQUOI
CET ARTICLE ?**

Cet article retrace l'histoire des découvertes en paléanthropologie, l'étude des fossiles de la lignée humaine depuis cent cinquante ans et la découverte de l'homme de Neandertal. **Il fait le point sur les controverses et permet ainsi de comprendre l'évolution des idées et le caractère révisable des théories en fonction des nouvelles découvertes.** D'un modèle d'évolution linéaire, les

recherches ont abouti à une vision très « buissonnante » de l'histoire de l'homme. De plus, la divergence entre les lignées des hommes et des chimpanzés se révèle de plus en plus récente mais aussi complexe : elle divise les spécialistes. Il faut être capable, à partir de documents, d'interpréter différentes découvertes en respectant les règles de l'établissement des liens de parenté, comme pour n'importe quelle espèce, bien qu'il s'agisse de l'homme.

Neandertal en nous

Génétique. L'ADN d'*Homo neanderthalensis* a parlé : il se serait apparié à *Homo sapiens* venu d'Afrique, avant de disparaître il y a 30 000 ans. Le génome des populations d'Eurasie porte la trace de ce métissage.

Il y a du Neandertal en nous. Du moins si nous sommes « non africains ». Dans ce cas, 1 % à 4 % de notre matériel génétique a pour origine *Homo neanderthalensis*. Nous nous croyions simples cousins, issus d'un ancêtre commun. Nous nous découvrons aussi métissés avec cet humain disparu. C'est la conclusion la plus spectaculaire tirée de l'étude de l'ADN prélevé sur trois os de néandertaliens vieux d'environ 40 000 ans, issus d'une grotte croate. Pour la première fois, le génome nucléaire d'un homme fossile

est séquencé, à hauteur de 60 %. Son analyse est publiée, au terme de quatre années d'efforts, dans la revue *Science*, vendredi 7 mai, sous la direction de Svante Pääbo, de l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste de Leipzig. C'est à lui que l'on doit la première analyse génétique d'un néandertalien, en 1997. Il s'agissait d'ADN mitochondrial (ADNmt), transmis par la mère, d'extraction bien plus aisée que l'ADN nucléaire. En 2004, M. Pääbo et ses collègues avaient conclu que cet ADNmt ne révélait aucun

croisement entre *Homo sapiens*, l'homme moderne et celui de Neandertal. Conclusion aujourd'hui invalidée par les mêmes chercheurs, qui ne cachent d'ailleurs pas leur surprise. « L'équipe était contre cette hypothèse, ce qui, d'une certaine manière, renforce nos résultats », rappelle David Reich (MIT et Harvard), cosignataire de l'étude. Et de rappeler les précautions méthodologiques prises pour se prémunir contre les contaminations par l'ADN des expérimentateurs, éliminer celui des microbes pré-

sents dans les échantillons, qui représentaient au départ plus de 95 % des éléments séquencés. Il a aussi fallu trouver les moyens de comparer l'ADN attribué à Neandertal à celui d'hommes actuels – un Français, un Han chinois, un Papou de Nouvelle-Guinée, un San d'Afrique de l'Ouest et un Yoruba d'Afrique de l'Ouest – et à celui d'un chimpanzé. Pourquoi ? « Parce que les variations génétiques non partagées avec Neandertal éclairent l'histoire évolutive de l'homme », répond Ed Green, premier

signataire de l'article de *Science*. Ces comparaisons ont donc mis en évidence la présence de 1 % à 4 % d'ADN d'origine néandertalienne dans le génome de nos contemporains d'Eurasie, alors qu'un tel héritage est absent chez les deux Africains. Impossible à ce stade de décrire le rôle fonctionnel de cet ADN transfuge. Mais sa mise en évidence met fin à une controverse scientifique vieille de plusieurs décennies sur d'éventuels croisements entre les deux espèces. Mais sans doute faut-il rappeler qui est Neandertal, et pourquoi il constitue un cousin sulfureux. En 1856 sont découverts près de Düsseldorf une calotte crânienne et des os longs bientôt attribués (1864) à une nouvelle espèce, baptisée *Homo neanderthalensis*. En 1859, la publication de *L'Origine des espèces* par Darwin banalise l'homme au sein du règne animal. Double choc pour les contemporains. Le mythe de la Genèse est ébranlé, la « création » compte soudain une nouvelle espèce humaine. Pire, on découvre, à La Chapelle-aux-Saints (Corrèze), en 1908, un squelette de Neandertal enterré par ses congénères : ces primitifs avaient-ils le souci de l'au-delà ?

Depuis lors, ces questions n'ont cessé de tarauder les paléanthropologues, et d'autres se sont posées au fil des découvertes : Neandertal est le seul hominidé apparu en Europe, il y a environ 400 000 ans, descendant d'*Homo* plus archaïques venus d'Afrique. A-t-il été rayé de la carte, il y a 30 000 ans, par *Homo sapiens*, lui-même sorti d'Afrique il y a 50 000 ans ? Quid de la nature des relations entre les deux espèces, qui ont pu avoir des contacts pendant quelques millénaires ?

Ces questionnements s'accompagnent de querelles sur le degré d'« intelligence » et

d'humanité qu'il convient d'accorder à ce perdant de l'évolution. Avec ses bourrelets sus-orbitaire et son chignon crânien, l'incroyable robustesse de son squelette et de sa musculature, mais son gros cerveau, n'était-il qu'un balourd simiesque ?

C'est aussi une créature politique : certains chercheurs en font un bon sauvage, victime des mœurs colonialistes incoercibles de l'homme moderne, d'autres soulignent les proximités entre les deux espèces, qui se seraient fondues l'une dans l'autre. « *C'est un sujet explosif, car la notion de différence biologique est délicate à manier dès lors qu'on s'approche de l'humain* », note le paléanthropologue Jean-Jacques Hublin, lui aussi de l'Institut Max-Planck de Leipzig, pour qui la recherche, féconde, de différences avec ces espèces disparues n'a rien de commun avec celle d'une hiérarchie entre d'hypothétiques « races » au sein de l'espèce humaine.

La génétique vient donc d'apporter son grain de sel dans ces polémiques souvent vives. Doit-on continuer à parler de deux espèces, si leur hybridation a donné lieu à une descendance aussi fertile ? « *Je laisse à d'autres le choix de se quereller à ce sujet* », répond Svante Pääbo, qui juge la discussion « *assez vaine* » et se contente de souligner qu'il y a bien eu croisements, même à une échelle modeste. Les populations en jeu ne dépassaient pas quelques milliers d'individus. Il a suffi de quelques dizaines d'accouplements pour que l'empreinte de Neandertal marque notre patrimoine génétique.

Certains chercheurs n'ont pas attendu les généticiens pour se forger une conviction. C'est le cas du paléanthropologue Erik Trinkaus (Washington University, Saint-Louis, Missouri), pour

qui « *il existe déjà en abondance des preuves paléontologiques montrant des flux de gènes entre néandertaliens et hommes modernes, résultant de l'absorption des populations des premiers par l'expansion des seconds, il y a environ 40 000 ans* ».

Sauf, répond Jean-Jacques Hublin, que la génétique suggère des mélanges plus anciens, puisque tous les Eurasiens, et pas seulement les Européens de l'Ouest, en portent la marque : « *Probablement ont-ils eu lieu du côté de l'actuelle Israël, où la frontière entre populations de néandertaliens et d'hommes modernes a été fluctuante entre 120 000 et 50 000 ans* », soit avant qu'*Homo sapiens* n'entame sa marche triomphale à travers le globe.

Ce qui a fait ce succès évolutif, Jean-Jacques Hublin espère le trouver non seulement du côté des os – sa spécialité – ou de l'archéologie, mais aussi de celui des gènes. L'article de *Science* ouvre en effet d'autres perspectives fascinantes : disposer du génome de Neandertal offre un aperçu de ce qui fait la spécificité d'*Homo sapiens*.

L'équipe internationale a ainsi mis en évidence quelques gènes uniques à notre espèce, qui ont la particularité de jouer un rôle dans le développement cognitif et le métabolisme énergétique. Lorsqu'ils sont endommagés, certains sont impliqués aujourd'hui dans la trisomie 21, l'autisme ou encore la schizophrénie. Un autre l'est dans la forme du crâne, de la clavicule et de la cage thoracique.

Erik Trinkaus est critique vis-à-vis de cette « *expédition de pêche* » aux gènes, « *qui ne nous disent rien sur la biologie ou le comportement* » de Neandertal. Bruno Maureille (CNRS-UMR Pacea, Bordeaux) juge au contraire « *très intéressante* » cette nouvelle étape de

la paléogénétique, qui va s'intéresser aux produits des gènes, les protéines. Il note cependant que les moyens techniques « *évoluent beaucoup plus vite que les capacités de la communauté scientifique à en intégrer les résultats* ».

La paléogénéticienne Eva-Maria Geigl (Institut Jacques-Monod) souligne, elle aussi, qu'il faudra du temps « *avant que tout le monde soit convaincu* ». D'autant que la génomique n'en est qu'à ses débuts : « *On va certainement s'apercevoir que la diversité génétique est beaucoup plus importante qu'on le pense* », dit-elle, tant entre les espèces humaines qu'à l'intérieur de celles-ci.

À Leipzig, on en est déjà à la prochaine étape pour caractériser les gènes qui font le propre de l'homme : le séquençage du génome d'*Homo sapiens* contemporains des derniers Neandertal est lancé. ■

Hervé Morin
(8 mai 2010)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Les études génétiques sur les hommes de Neandertal fossiles révèlent des mélanges avec *Homo sapiens*, qui étaient encore démentis par les recherches menées en 2004. L'article retrace l'évolution des idées sur ce « **cousin sulfureux** » et montre que les récentes découvertes remettent en question beaucoup de certitudes sur l'histoire de la lignée humaine en créant la surprise des spécialistes eux-mêmes. Malgré le scepticisme de certains scientifiques, les recherches actuelles portent sur les spécificités génétiques qui font le propre de l'homme.

MOTS CLÉS

DISSÉMINATION

Transport des graines ou des fruits contenant des graines permettant le développement d'une nouvelle plante à partir d'une graine. Les principaux agents disséminateurs sont le vent, l'eau et les animaux. La dissémination assure le maintien de l'aire de répartition de la plante mais également son extension.

PLANTE

Végétal terrestre dont les racines et les tiges feuillées sont reliées par des tissus conducteurs (le xylème et le phloème transportant respectivement la sève brute et la sève élaborée). Parmi les plantes, on distingue notamment les plantes à fleurs, ou Angiospermes, et les plantes sans fleurs, contenant en particulier les Pinales (pins, sapins).

POLLINISATION

Transport des grains de pollen des étamines jusqu'au pistil d'une fleur. Les principaux vecteurs de transport du pollen sont le vent, l'eau et les animaux.

STOMATE

Structure située au niveau de l'épiderme des feuilles, principalement sur la face inférieure de ces dernières, qui permet les échanges de gaz (CO_2 , O_2 et H_2O) entre les feuilles et l'atmosphère. Un stomate est constitué de deux cellules épidermiques spécialisées, les cellules stomatiques, encadrant un orifice, l'ostiole. L'ouverture de l'ostiole permet le passage des gaz entre l'atmosphère et la cavité située sous l'ostiole, la chambre sous-stomatique. Cette dernière est le lieu d'échanges gazeux entre l'air et les cellules chlorophylliennes environnantes, comme les cellules du parenchyme lacuneux. Les plantes ont la capacité de réguler l'ouverture de leurs stomates en fonction des conditions climatiques, ce qui leur permet de contrôler la perte d'eau au niveau des feuilles.

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

À la différence des animaux – qui sont généralement mobiles dans leur environnement, ce qui leur permet de chercher leur nourriture, de se protéger des agressions de l'environnement, d'échapper à leurs prédateurs et de se reproduire –, la plante est constituée de racines ancrées dans le sol portant des tiges feuillées qui se développent en milieu aérien. Comment l'organisation des plantes à fleurs est-elle adaptée à leur mode de vie fixé à l'interface entre le sol et l'atmosphère ?

Les échanges entre la plante et son milieu

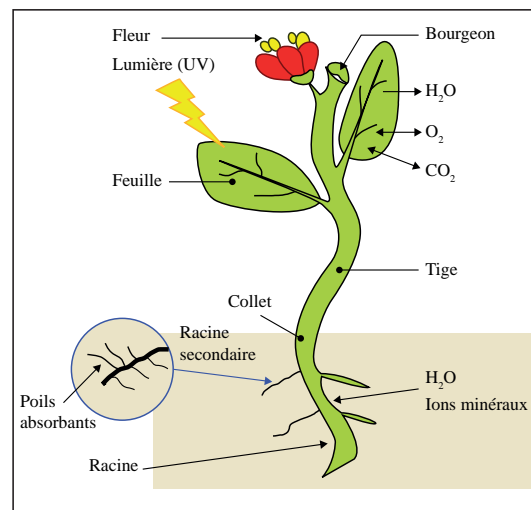
La plante réalise des échanges d'énergie et de matière avec son milieu de vie à travers **des surfaces d'échanges externes** très développées, en lien avec son mode de vie fixé. La partie souterraine de la plante est constituée de **l'appareil racinaire**, qui assure l'ancrage du végétal dans le sol et l'absorption de l'eau et des ions minéraux du sol pour permettre la photosynthèse. Les racines des plantes présentent des structures spécialisées dans l'absorption : **les poils absorbants**. Un poil absorbant est formé d'une cellule très allongée de l'épiderme racinaire. L'ensemble des poils absorbants de la plante constituent une surface d'échange importante entre la plante et le sol.

Les feuilles, portées par les tiges, sont majori-

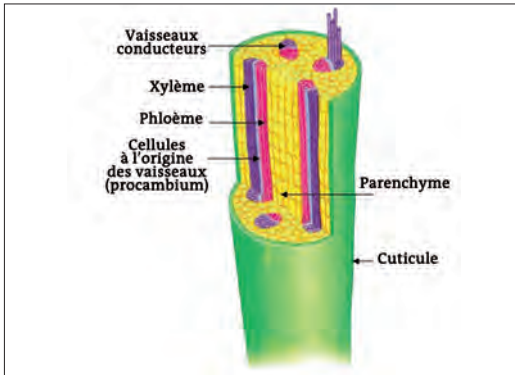
tairement formées de cellules chlorophylliennes, contenant des chloroplastes. Ces organites captent la lumière et synthétisent, à partir du dioxyde de carbone et de l'eau, des molécules organiques lors de **la photosynthèse**. Les **feuilles** constituent alors une vaste surface d'échange avec l'atmosphère. Les échanges de molécules gazeuses de CO_2 , d' O_2 et d' H_2O entre les feuilles et l'atmosphère s'effectuent au niveau **des stomates**, dont l'orifice – l'ostiole – peut être ouvert ou fermé. Les feuilles sont également responsables de la capture de l'énergie lumineuse. Ainsi l'organisation fonctionnelle des plantes présente d'importantes surfaces d'échanges en relation avec leur mode de vie fixé. De plus la croissance continue des plantes participe à augmenter les possibilités d'échanges entre la plante et son milieu.

La circulation de matière au sein de la plante

Dans la plante, des échanges de matières sont indispensables entre les parties souterraines (lieu de l'absorption des ions minéraux et de l'eau) et les parties aériennes (lieu d'exposition à la lumière, d'échanges des molécules gazeuses et de production de molécules organiques). Ces échanges de matières dans la plante ont lieu dans deux réseaux distincts de vaisseaux conducteurs. Le **xylème** transporte la **sève brute**, composée d'eau et d'ions minéraux, des racines vers le reste de la plante. Le **phloème** transporte la **sève élaborée**, riche en molécules organiques synthétisées par la plante, des organes chlorophylliens producteurs, dont les feuilles, vers les autres organes consommateurs de la plante (les racines mais aussi les organes comme les fruits, les tubercules, etc.).



L'organisation d'une plante à fleur et les échanges avec son milieu



Coupe longitudinale de tige montrant les vaisseaux conducteurs

Les mécanismes de défense des plantes

Les plantes présentent une grande variété de défense **contre les agressions du milieu**. Elles sont capables de résister aux **variations saisonnières**. Par exemple, les arbres des régions tempérées résistent au froid de l'hiver en perdant leurs feuilles et en protégeant leurs bourgeons sous des écailles protectrices. Les plantes annuelles passent la saison froide sous forme de graines qui assurent la reprise de la végétation aux beaux jours. Chez les plantes adaptées au climat méditerranéen, la présence de poils et de cuticule épaisse au niveau des feuilles limite les risques de déshydratation en été. Les plantes présentent également des mécanismes de défense **contre leurs prédateurs** : des piquants (comme les cactus), des feuilles épineuses (comme le chardon). Certaines plantes synthétisent des toxines les rendant impropres à la consommation. Ainsi, la consommation, par les antilopes, de feuilles d'acacias entraîne une augmentation de la production de tanins au niveau des feuilles, qui limite le broutage de ces herbivores. Enfin, certaines plantes sont même capables d'émettre des signaux attirant des insectes parasites de leurs prédateurs. C'est le cas de la vesce des champs, qui produit du nectar attirant des fourmis, lesquelles attaquent les acariens et les insectes herbivores qui sont ses prédateurs.

La reproduction des plantes à fleur

Les fleurs sont constituées de différentes pièces florales, situées sur des cercles concentriques, appelés verticilles. De l'extérieur vers l'intérieur de la fleur se trouvent les **sépales, les pétales, les étamines et le pistil**. La mise en place des verticilles est sous le contrôle de gènes du développement floral. Les étamines et le pistil constituent les organes reproducteurs de la plante. Le pistil, renfermant les ovules contenant les gamètes femelles, forme **l'organe reproducteur femelle**.

Les étamines, qui abritent les grains de pollen contenant les gamètes mâles, forment **l'organe reproducteur mâle**.

La plupart des fécondations chez les plantes sont croisées : elles ont lieu entre deux gamètes provenant de deux individus différents de la même espèce. Dans ce cas, le mode de vie fixé des plantes impose un transport du pollen appelé **pollinisation**. La pollinisation peut être effectuée par **le vent** (anémogamie), **l'eau** (hydrogamie) ou **des animaux** (zoogamie), majoritairement des insectes. Dans le cas d'une collaboration entre un animal pollinisateur et la fleur, des adaptations souvent très étroites entre ces derniers sont observées. Par sa couleur, sa forme, la sécrétion de nectar ou encore son parfum, la fleur attire spécifiquement l'animal capable de la polliniser. L'animal pollinisateur présente des adaptations morphologiques à l'accrochage du pollen. Ces adaptations sont le résultat d'une **coévolution** entre l'insecte pollinisateur et la plante à fleur.

Après la fécondation des ovules contenus dans le pistil par les gamètes mâles des grains de pollen, les ovules fécondés se transforment en **graines**, tandis que la fleur se transforme en **fruit**.

De par le mode de vie fixée de la plante, les graines sont responsables de la **dispersion de l'espèce** et de la **colonisation de nouveaux milieux**. Les graines ou les fruits contenant les graines sont disséminés par **le vent, l'eau** ou encore **les animaux** qui les transportent accrochés à leur corps ou en les consommant et en les rejetant dans le milieu par leurs excréments. Là aussi, il peut y avoir une collaboration étroite entre l'animal disséminateur et la plante, suite à une **coévolution**.

TROIS ARTICLES DU MONDE À CONSULTER

- **Le déclin massif des insectes menace l'agriculture** p. 34-35

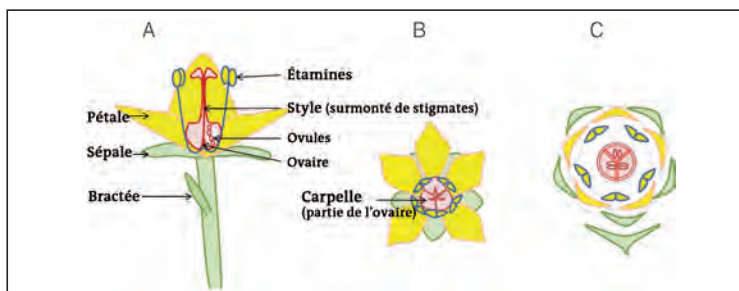
(Stéphane Foucart, 25 juin 2014)

- **Les pesticides font perdre le nord aux abeilles** p. 35

(Martine Valo, 31 mars 2012)

- **Des jachères transformées en garde-manger pour les abeilles** p. 36

(Jean-Pierre Tenoux, 28.12.10)



L'organisation de la fleur : A : coupe transversale d'une fleur ; B : vue de dessus ; C : diagramme floral

ZOOM SUR...

LE SEXE DES PLANTES

La majorité des plantes portent des fleurs hermaphrodites ou bisexuées, contenant à la fois un organe reproducteur mâle, les étamines, et un organe reproducteur femelle, le pistil. Mais chez certaines espèces dites « monoïques », comme le maïs, un individu porte des fleurs unisexuées, c'est-à-dire des fleurs mâles (avec des étamines mais sans pistil) et des fleurs femelles (avec un pistil mais sans étamines) sur un même pied. Enfin, chez les espèces dioïques, comme le saule, chaque individu ne porte qu'un type de fleurs unisexuées, soit mâles soit femelles.

AUTOFÉCONDATION ET FÉCONDATION CROISÉE

Chez certaines espèces comme le blé, il peut y avoir autofécondation. L'autofécondation, impossible chez les espèces dioïques, a lieu entre un grain de pollen et l'ovule, issus d'un même individu. Cette autofécondation peut entraîner une homozygotie (présence de deux allèles identiques pour un gène donné) importante chez les descendants et réduire ainsi les possibilités d'adaptation des individus aux variations des conditions de l'environnement. Chez de nombreuses espèces monoïques ou hermaphrodites, l'autofécondation est rendue impossible par des barrières morphologiques (chez les orchidées, une structure anatomique, le rostre, sépare le pistil des étamines), temporelle (les étamines et le pistil n'atteignent pas leur maturité en même temps, comme chez le maïs, où le pollen est émis alors que le pistil n'est pas encore réceptif) ou, le plus souvent, génétique (des mécanismes d'incompatibilité génétique rendant impossible l'autofécondation chez de nombreuses espèces). La fécondation croisée, qui a lieu entre deux fleurs situées sur deux plantes différentes d'une même espèce, est donc courante chez les plantes et présente l'avantage d'être à l'origine d'une diversité génétique.

ZOOM SUR...

LES SURFACES D'ÉCHANGES DES VÉGÉTAUX

Le mode de vie fixé de la plante et la pauvreté de son milieu de vie (eau et ions en faible quantité dans le sol, CO₂ peu abondant dans l'atmosphère) donnent lieu au développement de vastes surfaces d'échanges. La surface moyenne d'échange de nutriments, d'eau et d'ions minéraux d'un animal rapportée à la masse de l'animal est d'environ 3 m²/kg, alors qu'un végétal développe une surface d'échange d'eau et d'ions rapportée à la masse du végétal de plusieurs centaines de m²/kg.

LES ASSOCIATIONS SYMBIOTIQUES DES RACINES

Chez de nombreuses plantes, la surface d'absorption racinaire est fortement augmentée grâce à une symbiose avec des champignons : les mycorhizes. Ces champignons fournissent la plante en éléments de la solution du sol, comme les phosphates, tandis que la plante fournit les champignons en glucides. Chez certaines plantes comme les Fabacées, une symbiose existe avec des bactéries situées au niveau de nodosités racinaires. Ces bactéries du genre *Rhizobium* sont capables de fixer le diazote de l'air et de fournir des composés azotés à la plante, qui, en échange, la nourrit en molécules carbonées, comme des glucides.

LES GÈNES DE DÉVELOPPEMENT FLORAL

L'existence de plantes mutantes présentant des anomalies du développement floral montre que celui-ci est sous le contrôle de gènes de développement. Ainsi, chez *Arabidopsis thaliana*, plante très étudiée en laboratoire, une mutation dans le gène *Agamous* entraîne des fleurs dont le pistil et les étamines sont remplacés par des pétales. Une mutation dans le gène *Apetala* est à l'origine de fleurs sans pétales.

Partie 2.2 : La culture en Europe de yuccas originaires d'Amérique

L'intitulé complet du sujet

Les yuccas sont des plantes originaires du continent américain. Dans leurs pays d'origine, les pieds portent de nombreux fruits charnus, généralement comestibles. Un horticulteur installé en région parisienne a le projet de cultiver des yuccas destinés à la production de fruits qui seront commercialisés sous forme de préparations culinaires et cosmétiques. Dans un premier temps, il prévoit la mise en culture de nombreux individus, afin de sélectionner, par des croisements, les pieds produisant les fruits avec les qualités requises. Ensuite viendra la production en masse des fruits.

On vous demande de poser un regard critique sur le projet de l'horticulteur.

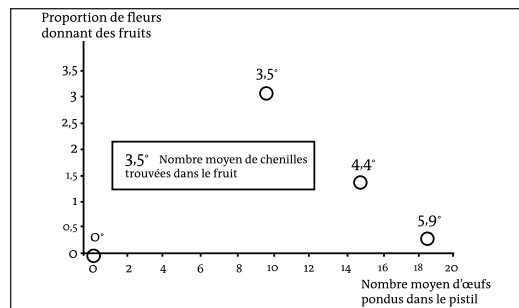
Montrez que le projet est techniquement réalisable à condition de respecter certaines contraintes (que vous préciserez) et de prendre en compte les conséquences éventuelles sur la biodiversité.

Votre réponse s'appuiera sur l'exploitation du dossier. Aucune étude exhaustive des documents n'est attendue.

Les documents

Document 1 : La reproduction sexuée chez les yuccas
 Dans leurs contrées d'origine, la fécondation des yuccas est réalisée par des espèces de papillons absentes en Europe. Certaines espèces de yuccas ont été importées avec succès en Europe dès le milieu du XIX^e siècle. Elles poussent sans difficulté dans les jardins ou en pots dans la plupart des régions. Parmi elles, le yucca glauque est sans doute le plus robuste car il supporte des gels sévères de l'ordre de -20° C, voire beaucoup moins. En Europe, les yuccas portent des fleurs mais ne donnent jamais de fruits. Ils se reproduisent uniquement par multiplication végétative.

Document 2 : Influence de l'insecte teigne du yucca (*Tegeticula yuccasella*) sur la production de fruits par les yuccas glauques en Alberta (États-Unis)



Source : rapport du COSEPAC, Canada, 2002

Document 3 : Yucca glauque (*Yucca glauca*) et teigne du yucca (*Tegeticula yuccasella*), deux espèces en voie de disparition ?



La teigne du yucca et le yucca glauque
Nom : teigne du yucca (*Tegeticula yuccasella*) et yucca glauque (*Yucca glauca*)

Description : La teigne du yucca est un petit papillon au corps brun et à la tête blanche, dont l'envergure des ailes varie de 18 à 28 mm.

Le yucca glauque est une grande plante vivace qui peut atteindre une hauteur de 100 cm et qui produit une grappe de fleurs blanches à son extrémité.

Habitat : Alberta

Situation actuelle : La teigne du yucca est en voie de disparition (exposée à une disparition imminente de la planète ou du pays). Le yucca glauque est une espèce menacée (elle pourrait être en voie de disparition si aucune mesure n'est prise pour enrayer les facteurs susceptibles de la faire disparaître de la planète ou du pays).

Mesures de rétablissement : Ces deux espèces sont interdépendantes, chacune ayant besoin de l'autre pour survivre. La teigne du yucca se nourrit exclusivement de graine de yucca glauque, qui ne sont produites que lorsque la plante est pollinisée par les teignes adultes.

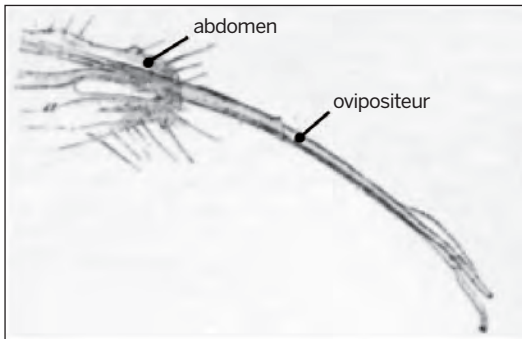
Source : site du ministère de l'Écologie canadien

Document 4 : Pollinisation du *Yucca aloifolia* par l'insecte *Pronuba yucasella*

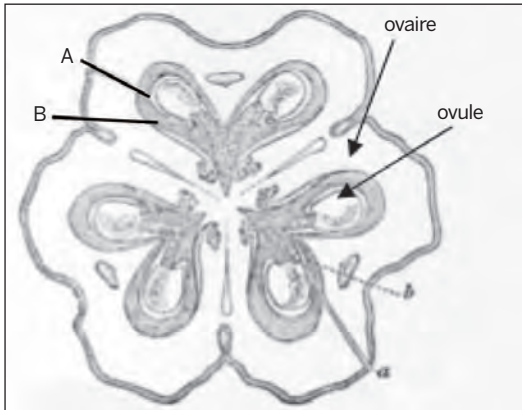
Dessins extraits de *The Popular Science Monthly*, Edouard L. Youmans, 1882



Femelle de *Pronuba yucasella* en train de pondre dans le pistil de la fleur de yucca



Pièces génitales de *Pronuba yuccasella*
Extrémité de l'abdomen prolongée par un ovipositeur, organe spécialisé permettant de pondre les œufs directement dans les ovaires, au contact de l'ovule



Coupe transversale dans le pistil de la fleur de yucca
A : emplacement de l'ovipositeur ; B : position des œufs

Proposition de corrigé

Une contrainte : l'interdépendance entre les yuccas et leur insecte pollinisateur

Les yuccas originaires du continent américain et cultivés en Europe ne portent pas de fruits, car les espèces d'insectes responsables de leur pollinisation sont absentes (document 1). En effet, le yucca glauque est inféodé à une pollinisation effectuée par un insecte particulier, la teigne du yucca. Cet insecte ne se nourrit que des fruits de cette plante, qui ne sont produits que lors de la pollinisation effectuée par les teignes du yucca adultes (document 3). En effet, en absence d'œufs de teigne présents dans le pistil des fleurs de yucca, c'est-à-dire en absence de teignes adultes ayant pondu, les yuccas glauques ne produisent aucun fruit. En revanche, en présence de teignes de yucca, une quantité optimale d'œufs pondus dans le pistil correspond à un nombre maximal de fruits formés (document 2). Une autre espèce de yucca, le *Yucca aloifolia*, dépend pour sa pollinisation d'une autre espèce d'insecte appelée *Pronuba yucasella*. Cet insecte présente un organe spécialisé à l'extrémité de l'abdomen, l'ovipositeur, lui permettant de pondre ses œufs directement dans les ovaires de la fleur du *Yucca aloifolia* (document 4). Ainsi la coévolution a abouti à des spécialisations anatomiques poussées

de l'insecte pollinisateur (forme de l'ovopositeur) et de la plante (forme de l'ovaire), d'où une forte interdépendance. Comment l'horticulteur peut-il réaliser la pollinisation des yuccas en Europe pour réaliser la fécondation et obtenir des fruits ? Il peut envisager d'introduire les insectes pollinisateurs dédiés aux espèces de yuccas choisies. Il devra veiller à équilibrer les populations de pollinisateurs et de yuccas pour optimiser son rendement en fruits. Mais l'horticulteur peut également envisager un mode très différent de pollinisation, lui évitant de faire appel aux insectes pollinisateurs inféodés aux yuccas : il peut recourir à la pollinisation manuelle, comme dans la culture de la vanille.

Une autre contrainte : les conditions climatiques

L'horticulteur doit choisir ses espèces de yuccas en tenant compte des conditions climatiques, pour réussir leur adaptation à leur nouvel environnement : par exemple, le yucca glauque est capable de supporter des gels sévères (document 1).

Des contraintes écologiques liées à l'introduction de nouvelles espèces

L'introduction de nouveaux insectes peut présenter des conséquences écologiques : les espèces ainsi introduites peuvent se révéler invasives et déséquilibrer les écosystèmes environnants. Pour protéger les écosystèmes existants, l'horticulteur peut envisager le confinement des espèces nouvelles. D'un autre côté, ces introductions pourraient contribuer à sauver des espèces en danger : la teigne du yucca glauque est en voie de disparition et le yucca glauque est menacé (document 3). Dans tous les cas, les solutions techniques retenues et commercialement viables doivent s'accompagner d'une étude rigoureuse de leurs impacts écologiques. ■

Ce qu'il ne faut pas faire

- Analyser de manière intégrale les documents dans l'ordre donné, sans dégager les contraintes techniques pour l'horticulteur et les conséquences écologiques.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 2.2 : Études de documents

- Les liens entre la morphologie et l'anatomie de la plante et son mode de vie fixée à l'interface entre le sol et l'atmosphère.
- La lutte contre les prédateurs et les variations des conditions du milieu.
- Les modalités de la pollinisation et de la dispersion des graines ou des fruits.

ZOOM SUR...

LA COÉVOLUTION

La coévolution se définit comme l'évolution coordonnée de deux espèces en relation étroite l'une avec l'autre.

Il existe une véritable collaboration entre les animaux pollinisateurs et la plante à laquelle ils sont souvent inféodés. Par exemple, certains papillons pollinisateurs présentent un organe de succion extrêmement long et effilé, qui s'adapte exactement à l'éperon nectarifère formé par le pétale de l'orchidée qu'ils pollinisent. Grâce à cet organe de succion, les papillons récoltent le nectar situé au fond de l'éperon nectarifère et se chargent en pollen, qu'ils vont emporter vers d'autres fleurs de la même espèce. Il s'agit par exemple de l'orchidée *Angraecum sesquipedale*, que l'on trouve à Madagascar et qui est pollinisée par le papillon *Xanthopan morgani praedicta*.

FRUIT OU LÉGUME ?

Les haricots verts sont des légumes, mais le concombre, la tomate, la courgette... sont des fruits !

Dans le langage courant est appelé « légume » tout aliment végétal accompagnant un plat au cours d'un repas. Mais en botanique le terme « légume » désigne uniquement la gousse formée par le fruit d'une famille de plantes à laquelle appartiennent le pois, les haricots, la lentille, etc., que l'on appelle parfois les « légumineuses ». Ainsi, en appliquant ces définitions botaniques, de nombreux « légumes » consommés comme le concombre, la tomate, la courgette sont en fait des fruits car ils proviennent du développement de l'ovaire de la fleur après fécondation. D'autres « légumes », comme les pois et les lentilles, sont en fait des graines. Et de nombreuses autres parties végétales sont également utilisées pour l'alimentation : des racines (la carotte), des tiges modifiées en organes de réserve (les pommes de terre), etc.

Le déclin massif des insectes menace l'agriculture

Une vaste étude scientifique dénonce le rôle des pesticides systémiques dans l'érosion globale de la biodiversité.

« **J**e pense que j'ai dû me réveiller vers le milieu des années 2000. Un jour, alors que je marchais près de chez moi, dans la garrigue, je me suis demandé où étaient passés les insectes, car il me semblait qu'il y en avait beaucoup moins qu'avant », raconte Maarten Bijleveld van Lexmond. « Et puis j'ai réalisé qu'il y en avait aussi de moins en moins collés sur le pare-brise et la calandre de ma voiture. Presque plus, en fait. » En juillet 2009, dans sa maison de Notre-Dame-de-Londres (Hérault), le biologiste néerlandais, 77 ans, réunit une douzaine d'entomologistes partageant la même inquiétude. Tous notent un déclin accéléré de toutes les espèces d'insectes depuis les années 1990. Selon eux, l'effondrement des abeilles domestiques n'est que la partie visible de ce phénomène aux conséquences considérables pour l'ensemble des écosystèmes. « Au terme d'une longue journée de discussions, nous avons décidé d'examiner tout ce qui avait été publié dans la littérature scientifique sur les insecticides systémiques dits "néonicotinoïdes", poursuit-il. Cette nouvelle génération de molécules, mise sur le marché dans les années 1990, nous semblait être un élément déterminant pour expliquer la situation. »

Encore fallait-il étayer ce soupçon. Au fil des mois, le petit groupe de chercheurs est devenu un consortium international – le Groupe de travail sur les pesticides systémiques (TFSP, pour *Task Force on Systemic Pesticides*) – d'une cinquantaine de scientifiques de 15 nationalités, pour la plupart universitaires ou chercheurs au sein d'organismes

publics, ayant tous rejoint le groupe d'experts *intuitu personae*. Le résultat de leurs cinq années de travail, à paraître dans la prochaine édition de la revue *Environmental Science and Pollution Research*, devait être rendu public mardi 24 juin. « Les preuves sont très claires, affirme Jean-Marc Bonmatin (Centre de biophysique moléculaire du CNRS), membre du TFSP. Nous assistons à une menace pour la productivité de notre environnement agricole et naturel. Loin de sécuriser la production alimentaire, l'utilisation des néonicotinoïdes met en péril les pollinisateurs qui la rendent possible. » Au total, les experts du TFSP ont passé en revue quelque 800 études publiées dans la littérature savante sur ces insecticides. Ils en ont tiré sept longues synthèses thématiques sur leurs modes d'action, leur devenir dans l'environnement, leurs impacts sur divers organismes, etc. Ces molécules (imidaclopride, thiaméthoxame, clothianidine, mais aussi fipronil) se partagent

aujourd'hui environ 40 % du marché mondial des insecticides agricoles et représentent un marché de plus de 2,6 milliards de dollars (1,9 milliard d'euros). Elles se distinguent d'abord des précédentes générations par leur toxicité, 5 000 à 10 000 fois celle du célèbre DDT, par exemple. Leur mode d'application est également différent. Ces produits sont en effet non seulement appliqués en pulvérisation, mais sont aussi utilisés en traitement des sols et en enrobage des semences, dans le cadre d'une utilisation systématique et préventive. Or, une part importante – jusqu'à plus de 90 % – des quantités ainsi utilisées n'est pas absorbée par les plantes au cours d'une seule saison végétative. Ces produits s'accumulent ainsi dans les sols où ils persistent de plusieurs mois à plusieurs années. De plus, ajoutent les chercheurs, ces molécules sont hautement solubles dans l'eau et peuvent migrer et contaminer des zones n'ayant jamais été traitées. Selon le TFSP, « il y a des preuves

fortes que les sols, les cours d'eau et les plantes, dans les environnements urbains ou agricoles, sont contaminés, à des concentrations variables, par des mélanges de néonicotinoïdes, de fipronil et de leurs produits de dégradation ». Entre autres exemples, les experts du TFSP notent que de l'imidaclopride a été détecté dans 91 % de 74 échantillons de sols français analysés en 2005 : seuls 15 % des sites avaient été traités...

Les concentrations relevées ne conduisent généralement pas à une toxicité aiguë. Mais l'exposition chronique à ces faibles doses fragilise les populations de nombreuses espèces : troubles de reproduction, facultés de survie réduites, etc. Cette « contamination à large échelle » de l'environnement est, selon le TFSP, un « élément déterminant » dans le déclin des abeilles et joue un rôle « irréfutable » dans celui des bourdons. Pour les papillons, les tendances dégagées sont de l'ordre d'une réduction de moitié des populations européennes en vingt

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article fait le point sur les résultats récents publiés par le groupe de travail sur les pesticides systémiques et leur impact sur les insectes. L'utilisation de ces pesticides dits « néonicotinoïdes » a des répercussions sur la productivité agricole et sur notre environnement naturel. En effet, ces pesticides sont toxiques et, du fait de leurs modes d'application multiples (pulvérisation, traitement des

sols, enrobage des semences), ils ne peuvent être absorbés en totalité par les plantes. Ils persistent donc dans les sols, dans l'eau et peuvent donc être retrouvés sur des sites n'ayant jamais été traités. En étant exposés de façon chronique à ces pesticides, les insectes, et notamment les pollinisateurs qui sont un maillon essentiel de la reproduction de nombreuses plantes à fleurs (dont les plantes cultivées), voient leur nombre diminuer – ce qui a un impact sur les cultures et sur l'environnement non négligeable.

Mais les effets de ces pesticides se font également sentir chez les oiseaux insectivores (même si à ce niveau ils ne sont pas les seuls responsables), sur les micro-organismes du sol et les lombrics : c'est l'ensemble de la chaîne alimentaire qui est touchée, et on assiste à une érosion globale de la biodiversité... La question est maintenant de savoir pourquoi, mis à part en Europe, ces effets des pesticides n'ont pas été signalés plus tôt, d'autant plus qu'ils auront à terme un impact négatif sur l'économie.

ans. Pour M. Bijleveld, le déclin en cours de l'ensemble de l'entomofaune relève d'un « *effondrement brutal* ».

Son ampleur se mesure notamment sur les niveaux supérieurs de la chaîne alimentaire. « *Le déclin des insectes, c'est aussi le déclin des oiseaux, dont plus de la moitié sont insectivores* », note François Ramade (université Paris-Sud), l'une des grandes figures de l'écotoxicologie française, cofondateur du TFSP. De fait, le programme de suivi européen ad hoc montre par exemple

une perte de 52 % des oiseaux des champs au cours des trois dernières décennies – cependant, les auteurs se gardent d'attribuer l'ensemble de cette perte aux seuls insecticides systémiques, d'autres facteurs entrant en ligne de compte.

Une variété d'autres espèces importantes pour les écosystèmes est également affectée par ces substances. En particulier, les micro-organismes du sol et les lombrics, animaux essentiels au maintien de la fertilité des sols. L'ensemble des informations

rassemblées par le TFSP ayant été publié, reste à comprendre comment des effets d'une telle magnitude ont pu demeurer si longtemps sous le radar des autorités sanitaires – à l'exception de l'Europe, qui a commencé, en 2013, à prendre des mesures. « *Aujourd'hui, le savoir est fragmenté, juge Maarten Bijleveld. Il n'y a plus de généralistes.* »

Le diagnostic de François Ramade est plus sévère. « *La recherche en agronomie est sous la tutelle des pouvoirs publics, qui sont généralement soucieux de ne pas gêner*

l'activité économique et donc l'emploi, estime-t-il. De plus, les agences de sécurité sanitaire ne se sont guère préoccupées de ce problème car ces substances ne posent pas de graves problèmes pour l'homme. Il n'en reste pas moins qu'elles finiront par avoir un impact économique négatif important. » ■

Stéphane Foucart
(25 juin 2014)

Les pesticides font perdre le nord aux abeilles

Plus la recherche scientifique avance, moins il devient possible de contester la nocivité des pesticides sur l'environnement. Pour son rôle d'éclaircisseur en territoire de plus en plus miné, l'abeille a déjà fait l'objet de nombreux travaux. Deux études publiées dans la revue *Science* du 29 mars ont opté pour des conditions réalistes plutôt que pour des expériences de laboratoire. Elles soulignent l'impact de la famille d'insecticides la plus répandue dans le monde : les néonicotinoides, qui agissent sur le système nerveux central des insectes.

L'équipe française – codirigée par Mickaël Henry de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) et Axel Decourtye, écologue pour le réseau des instituts des filières agricoles et végétales (ACTA) – a placé avec de la colle à dent une minuscule puce de radio-identification (RFID) sur le thorax de 653 abeilles mellifères. Les chercheurs ont voulu vérifier si, comme certains apiculteurs en avaient formulé l'hypothèse, les produits contenant du thiamé-

thoxam peuvent leur faire perdre le sens de l'orientation.

Le Cruiser notamment, fabriqué par le groupe suisse Syngenta et destiné au maïs et au colza, les rend-elles incapables de rejoindre leur ruche ? Après avoir observé les allers-retours de leurs protégées, l'équipe a constaté que 10 % à 31 % de celles qui étaient intoxiquées, même à faible dose, ne retrouvaient pas leur chemin. Ce qui éclaire en partie le syndrome d'effondrement des colonies. Car, loin de leur ruche, elles meurent trois fois plus que le taux normal. Ces résultats sont contestés par Syngenta. Mais le ministère de l'Agriculture a annoncé, jeudi soir, qu'il envisageait d'interdire le Cruiser, expliquant attendre un avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses) sur l'étude de *Science* d'ici à fin mai, « avant la nouvelle campagne de semences en juillet ».

La deuxième recherche menée en Écosse s'intéresse au bourdon sauvage, en déclin lui aussi. Bien que le *Bombus terrestris* tienne un rôle essentiel dans la pollinisation des fraises, myrtilles et

tomates, lui et ses congénères sauvages sont bien moins connus. Penelope Whitehorn et Dave Goulson, biologistes de l'université de Stirling, ont confronté des colonies en développement à de faibles doses de l'imidaclopride, présent, entre autres, dans le Gaucho. Au bout de six semaines, les

nids contaminés avaient pris 8 % à 12 % moins de poids que les colonies témoins, les bourdons s'étant moins nourris. Surtout, les nids avaient produit 85 % moins de reines. ■

Martine Valo
(31 mars 2012)

POURQUOI CET ARTICLE ?

À partir de 2006, les études scientifiques ont établi avec certitude une diminution importante des populations et de la biodiversité des insectes pollinisateurs. Après ce constat, il est devenu urgent de comprendre l'origine de cette surmortalité afin, si cela est possible, d'y remédier. Depuis de nombreuses années, les apiculteurs ont incriminé l'action des pesticides, très couramment utilisés en agriculture. **L'article rapporte les conclusions de deux études scientifiques qui démontrent la responsabilité de deux insecticides, le Cruiser et le Gaucho, dans le déclin des**

populations d'insectes pollinisateurs. L'hypothèse qui prévaut actuellement pour expliquer le déclin des insectes pollinisateurs est l'hypothèse multifactorielle : les insectes pollinisateurs seraient affaiblis par un environnement qui leur serait défavorable (nombreux produits phytosanitaires, attaques par des parasites, etc). Aujourd'hui en France, le Gaucho et le Cruiser sont interdits à cause leur toxicité pour les insectes pollinisateurs. Les apiculteurs sont dans l'espoir d'une amélioration de la santé de leurs ruches, qui, si elle a lieu, nécessitera sans aucun doute du temps.

Des jachères transformées en garde-manger pour les abeilles

En Franche-Comté, 700 hectares ont été semés de plantes très nutritives pour aider les butineuses à passer l'hiver.

Combien d'abeilles en hibernation survivront-elles au froid ? En Franche-Comté, « beaucoup plus qu'ailleurs », espère Raymond Borneck. À 86 ans, l'ancien président de la Fédération mondiale d'apiculture (Apimondia), retiré dans son Jura d'origine, se bat toujours pour ses « protégées ». En lien avec les agriculteurs et les chasseurs, l'homme y plaide la cause des jachères apicoles ou « cultures interstitielles » expérimentées localement par le réseau Biodiversité pour les abeilles. Sur le plan financier, l'initiative, d'un coût de 180 000 euros sur trois ans, est soutenue par le conseil régional, dont son fils Marc préside le groupe des élus Europe Écologie-Les Verts. « Sans lien de cause à effet », se hâte de préciser celui-ci.

L'idée de ce projet, labellisé par le ministère de l'Écologie au titre de l'année 2010 de la biodiversité, est simple : fournir aux colonies de butineuses domestiques, durant l'arrière-saison, l'alimentation la plus équilibrée et la plus riche possible pour leur permettre ensuite de passer l'hiver. En Franche-Comté, région pilote, plus de 700 hectares ont été convertis en zones d'intercultures et semés d'espèces connues pour leur valeur nutritive.

« Les abeilles d'hiver ne sont pas biologiquement semblables à celles qui travaillent l'été, souligne M. Borneck. Elles ne vivent

en moyenne qu'un mois et demi, contre cinq ou six mois pour ces dernières. Leur mettre à disposition, par exemple, certaines variétés de tournesol donnant un pollen très supérieur à d'autres permet de leur faire gagner jusqu'à un mois de longévité. » Sarrasin, avoine, vesce, phalécie, sainfoin, lierres, trèfle blanc, de Perse et incarnat, mélilot, lotier corniculé rendent plus résistantes les ruches installées dans un rayon d'environ trois kilomètres autour des parcelles. « L'important est de leur offrir une floraison plus étalée dans le temps, donc un garde-manger avec des ressources en nectar et pollen suffisantes pour accroître leurs défenses immunitaires et la production de miel », résume Pierre Testu, animateur du réseau Biodiversité pour les abeilles.

Les agriculteurs qui prêtent leurs sols pendant six mois y trouvent leur avantage.

« Entre deux récoltes d'orge ou de maïs, le terrain ne reste pas nu, ces plantes empêchent l'apparition de mauvaises herbes, limitent l'érosion et apportent de la matière organique », témoigne Inès Jacquet, exploitante à Rigney (Doubs). Les espèces et les mélanges utilisés pour ces « rotations » automnales sont autorisés par la politique agricole commune (PAC) sans dérogation sur les surfaces en jachère, car les espèces sont non invasives et certifiées.

Le 18 novembre, le conseil régional de Franche-Comté a réitéré son appui à l'opération, inscrit dans une convention pluriannuelle relative au « développement des couverts ». Signé avec la Fédération des chasseurs, qui conduit et coordonne les actions en faveur de la faune sauvage et de ses habitats sur le territoire, ce pro-

gramme vise à « promouvoir la démarche dans les milieux agricoles et apicoles, accumuler des connaissances agronomiques sur cette pratique nouvelle, en démontrer la faisabilité réglementaire et mesurer l'intérêt pour les colonies d'abeilles ».

Sur la microparcelle de 0,5 hectare qui jouxte le musée de l'Abeille à Mesnay (Jura), Raymond Borneck, qui a créé l'Institut technique d'apiculture de l'INRA, poursuit ses propres expérimentations. En 2011, il ne mélangera plus les graines. Les espèces seront semées sur des bandes séparées, par types, « pour faire des comptages sur l'intensité des butinages ». L'évolution agronomique des différentes plantes pourra ainsi être mieux analysée. ■

Jean-Pierre Tenoux
(28 décembre 2010)

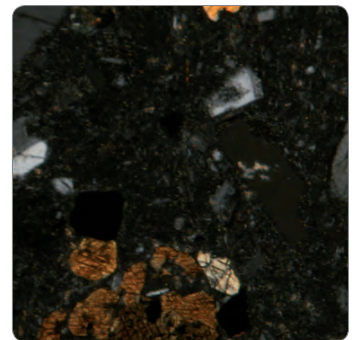
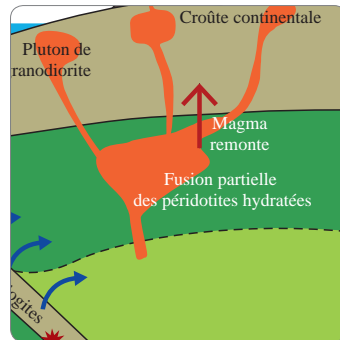
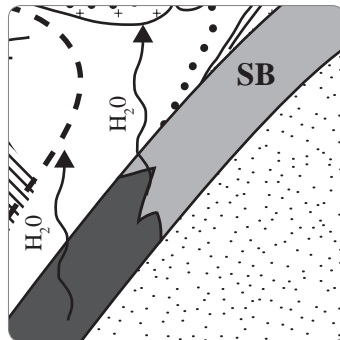
POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article montre comment plusieurs types d'intervenants se mobilisent en France pour venir en aide aux populations d'abeilles. En effet, durant l'hiver, des abeilles particulières, à plus longue durée de vie que celles d'été, habitent la ruche. Elles se nourrissent des réserves accu-

mulées dans la ruche avant que le froid ne devienne trop important. Quand la température devient trop faible (autour de 10 °C), les abeilles ne quittent plus la ruche. À l'intérieur, les abeilles luttent contre le froid en se serrant les unes contre les autres et en battant des ailes. L'article montre que des apiculteurs, sensibles à la mortalité des abeilles, se sont mobilisés avec l'aide des agricul-

teurs pour organiser la culture de plantes dont le butinage en automne permet aux abeilles de préparer efficacement le passage de la mauvaise saison. Ces cultures sont réalisées sur des terres qui sont alors en jachère, c'est-à-dire non cultivées. Ce projet est un bel exemple de coopération entre plusieurs intervenants économiques, scientifiques et institutionnels.

LE DOMAINE CONTINENTAL ET SA DYNAMIQUE



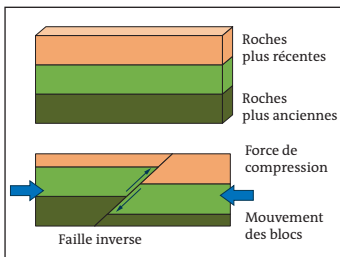
PERSONNAGE CLÉ

ANDRIJA MOHOROVIČIĆ (1857-1936)

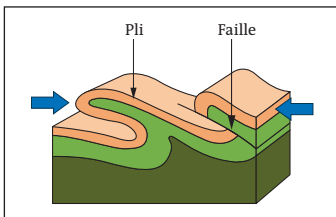
Au début du XX^e siècle, ce météorologue et sismologue croate commença à s'intéresser à la propagation des ondes sismiques. Suite au tremblement de terre de Pokuplje, à proximité de Zagreb, le 8 octobre 1909, il interpréta les sismogrammes et mit en évidence la discontinuité entre la croûte et le manteau qui porte son nom (Moho).

ZOOM SUR...

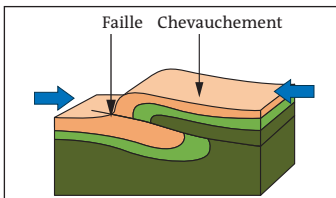
Les plis et les failles



Les plis se forment par flexion plastique des roches.



Les mouvements relatifs des roches le long des failles inverses témoignent du raccourcissement.



Un chevauchement conduit des ensembles de terrains anciens à en recouvrir de plus récents. Un charriage est un chevauchement de grande ampleur pouvant dépasser la centaine de kilomètres.

La caractérisation du domaine continental : lithosphère continentale, reliefs et épaisseur crustale

Environ 30 % de la superficie totale du globe terrestre sont occupés par les terres émergées. L'altitude moyenne des continents est de 870 m au-dessus du niveau de la mer, culminant à 8 847 m (mont Everest). Les caractéristiques de la croûte continentale permettent d'expliquer son épaisseur, son comportement et ses reliefs.

La composition de la croûte continentale

La croûte continentale est majoritairement formée de **roches magmatiques** (dont le granite et des roches voisines du granite), mais aussi de **roches sédimentaires** et de **roches métamorphiques**. Observé à l'œil nu et au microscope polarisant, un échantillon de granite montre trois types de minéraux : du **quartz**, des **feldspaths** (alcalins comme l'orthose ou plagioclases) et des **micas**.

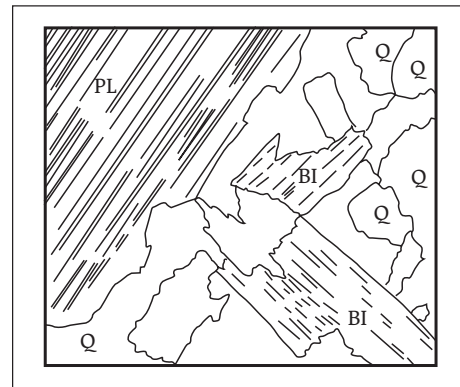
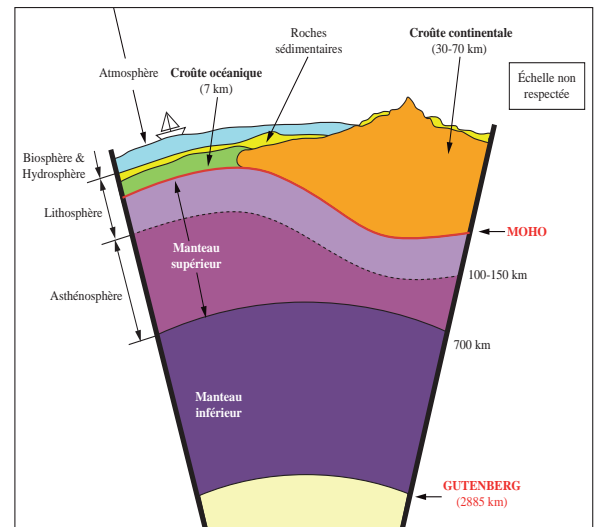


Schéma interprétatif d'une lame mince de granite observée au microscope. Q : Quartz, BI : Biotite (mica noir), PL : Feldspaths plagioclases.

L'épaisseur de la croûte continentale

Le forage le plus profond réalisé dans la **lithosphère** (en péninsule de Kola) est d'environ 12 km et n'a pas pu traverser la croûte. Des études sismiques indirectes permettent d'estimer la profondeur de la **discontinuité de Mohorovičić (Moho)**, qui correspond à la limite entre la croûte et le manteau. Elle est estimée à 30 km en moyenne, mais n'est pas identique en tout point du globe. Au niveau des **chaînes de montagnes**, on observe un

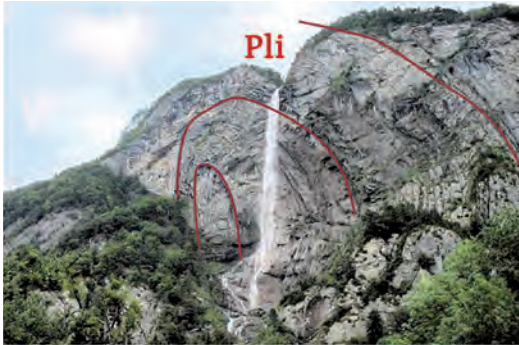
épaississement crustal lié à un raccourcissement dont les preuves sont visibles sur le terrain (voir ci-contre). Les **roches compressées**, transportées à haute altitude ou au contraire enfouies sous de grandes profondeurs, subissent des modifications liées aux variations de pression et de température (**métamorphisme**). Les transformations minéralogiques sont accompagnées de changements de texture, les minéraux s'alignant progressivement en feuillets (schistes, gneiss). Ces variations de pression et de température peuvent entraîner une fusion partielle et produire du magma.



Densité et isostasie

L'épaississement crustal observé au niveau des chaînes de montagnes pourrait suggérer un excès de masse. Mais en réalité elles exercent une attraction moindre que celle à laquelle on pourrait s'attendre. Ceci peut s'expliquer par la présence d'une **racine crustale**, compensant les reliefs en profondeur, en accord avec les mesures de profondeur du Moho.

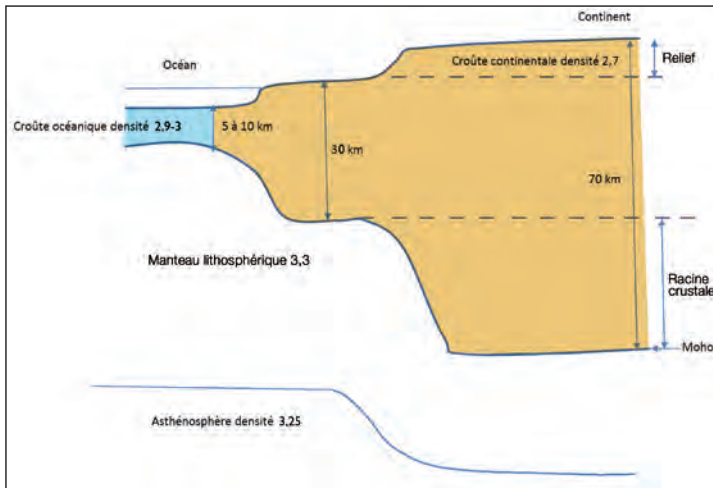
© rue des écoles & Le Monde, 2015. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



Cascade de l'Arpenaz

En effet, la **densité** moyenne de la croûte continentale est de 2,7, tandis que celle du manteau lithosphérique est de 3,3.

Il existe en profondeur une surface de compensation sur laquelle les pressions exercées par les roches sont égales : il y a **équilibre isostatique**. Selon le **modèle d'Airy**, en fonction du relief en surface et de la densité des matériaux, des « colonnes » de roches sont donc plus ou moins



épaisses en profondeur. Au niveau des domaines continentaux, la racine crustale constituée de matériaux peu denses s'étend sur une épaisseur proportionnelle à l'altitude du massif, à la profondeur de compensation.

Cet état d'équilibre réalisé à une profondeur variable de la Terre est l'**isostasie**. Au cours du temps, l'érosion élimine progressivement une partie du massif, ce qui provoque une remontée isostatique de la racine crustale. Des roches initialement en profondeur peuvent alors parvenir en **surface**.

L'âge des roches

Alors que la **croûte océanique** n'excède pas 200 Ma, la **croûte continentale** peut en certains endroits du globe dépasser 4 Ga. Une **roche sédimentaire** est plus récente que celle qu'elle recouvre (sauf accident tectonique) et peut être

datée en fonction des fossiles qu'elle contient. Pour les **roches magmatiques**, il est nécessaire de recourir à la datation absolue. Cette méthode de datation est basée sur la décroissance radioactive de certains isotopes radioactifs comme le ^{87}Rb . Leur désintégration en fonction du temps constitue un chronomètre naturel. Le rubidium (Rb) et le strontium (Sr) sont présents en très faible quantité (traces) dans les roches magmatiques. Ils présentent différents **isotopes**. Le spectromètre de masse permet de faire la différence entre ces isotopes car ils n'ont pas la même **masse atomique**. Le ^{87}Rb se désintègre en ^{87}Sr , avec une période de $48,8 \cdot 10^9$ ans ($\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$) ; le ^{86}Sr est un isotope stable. Lors de la formation d'une roche magmatique, les feldspaths (orthose, plagioclase) et micas incorporent des quantités variables de Rb et Sr. Il n'est pas possible de connaître la quantité initiale d'isotopes radioactifs au moment de la formation de la roche : on utilise les rapports $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Après refroidissement du magma, la roche formée ne va plus échanger avec le milieu

environnant, on parle de **fermeture du système**. Les isotopes évoluent spontanément selon les lois physiques de désintégration radioactive : la quantité d'éléments pères diminue, la quantité d'éléments fils augmente. En mesurant les quantités actuelles des éléments pères et fils dans un échantillon pour au moins deux minéraux différents, on peut tracer une droite (**isochrone**) et déterminer le temps écoulé depuis la fermeture du système, c'est-à-dire depuis la cristallisation des minéraux lors de la mise en place de la roche par refroidissement du magma. ■

TROIS ARTICLES DU MONDE À CONSULTER

• **Voyage vers le manteau de la Terre, dans la croûte océanique du Pacifique** p. 41-42
(Pierre Le Hir, 16 avril 2011)

• **Le voyage sous la Terre du satellite Goce** p. 42
(Christiane Galus, 17 mars 2010)

• **La structure interne des Pyrénées dévoilée** p. 43
(Pierre Rimbart, 7 septembre 1995)

ZOOM SUR...

Le programme ECORS

Le programme Étude continentale et océanique par réflexion et réfraction sismiques (ECORS), débuté en France en 1983, consiste à explorer la croûte terrestre, ses variations d'épaisseur et sa structure interne afin de déterminer ses propriétés et son évolution. La recherche d'hydrocarbures, l'exploration géothermique et l'évaluation du risque sismique sont des applications pratiques qui en découlent grâce à la connaissance précise des zones sédimentaires et des zones fracturées.

NOTIONS CLÉS

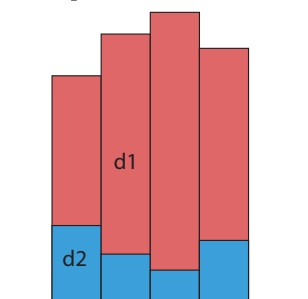
LA STRUCTURE INTERNE DU GLOBE

La Terre est constituée d'enveloppes de compositions chimiques différentes : la croûte, le manteau (constitué de péridotites) et le noyau (contenant principalement du fer et du nickel). La discontinuité de Mohorovičić marque la limite entre la croûte et le manteau. La croûte et la partie rigide du manteau supérieur constituent la lithosphère, découpée en plaques, reposant sur l'asthénosphère, plus ductile.

L'ISOSTASIE D'APRÈS LE MODÈLE D'AIRY

d_1 = densité de la croûte continentale = 2,7 ; d_2 = densité du manteau = 3,3.

Selon le modèle d'Airy, en fonction du relief en surface et de la densité des matériaux, les « colonnes » de roches sont plus ou moins épaisses en profondeur. Les pressions qu'elles exercent sont égales au niveau de la surface de compensation, où il y a équilibre isostatique.



ZOOM SUR...

LA DATATION ABSOLUE

La datation isotopique a révolutionné la mesure du temps en géologie. En complément de la datation relative, qui permet d'ordonner chronologiquement des événements géologiques les uns par rapport aux autres, la datation absolue permet de leur attribuer un âge, en millions d'années par exemple.

Cependant l'échantillon à dater doit satisfaire à certains critères :
 – il doit s'agir d'une roche magmatique dont on datera la cristallisation par refroidissement d'un magma. En effet, une roche sédimentaire est notamment constituée de fragments de reliefs érodés, dont la datation ne donnerait pas l'âge de la formation de la roche sédimentaire elle-même mais de la roche magmatique dont elle est issue par érosion et sédimentation ;
 – le système doit être fermé depuis la formation de la roche. Aucun élément ne doit avoir quitté l'échantillon ou y être entré.

Pour dater un échantillon, il faut choisir l'isotope radioactif le plus adapté selon sa demi-vie et l'âge à déterminer. Au-delà de dix fois la demi-vie de l'isotope, toute mesure est impossible. On mesure les quantités d'isotopes radioactifs présents dans l'échantillon en utilisant un spectromètre de masse. On procède ensuite aux calculs.

LA DÉTERMINATION DE L'ÂGE D'UNE ROCHE PAR LA MÉTHODE $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$



Soit F la quantité de l'isotope fils présente actuellement dans l'échantillon, F_0 celle présente initialement, P la quantité de l'isotope père, λ la constante caractéristique du couple isotopique :

$$F = (\lambda t) P + F_0$$

 La quantité de ^{86}Sr étant stable, on peut utiliser les rapports $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Ainsi $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (\lambda t) ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} + ^{87}\text{Sr}_0/^{86}\text{Sr}$, soit l'équation d'une droite de coefficient directeur (λt) . Le coefficient directeur de la droite permet de calculer t , le temps écoulé depuis la formation de la roche.

Partie 1 : La caractérisation du domaine continental

L'intitulé complet du sujet

Sélectionnez la proposition exacte pour chaque question de 1 à 6.

1. La croûte continentale est principalement formée :

- a) de gabbros et de granites.
- b) de roches sédimentaires et de granites.
- c) de péridotites.
- d) de roches voisines du gabbro.

2. Les différences d'altitude entre continents et océans sont dues au fait que :

- a) la croûte continentale est moins dense et plus épaisse que la croûte océanique.
- b) la croûte continentale est plus dense et plus épaisse que la croûte océanique.
- c) la croûte continentale est moins dense et plus fine que la croûte océanique.
- d) la croûte continentale est plus dense et plus fine que la croûte océanique.

3. Un granitoïde est une roche :

- a) magmatique à structure grenue.
- b) magmatique à structure vitreuse.
- c) sédimentaire à structure vitreuse.
- d) sédimentaire à structure grenue.

4. La croûte continentale :

- a) est en moyenne plus jeune que la croûte océanique.
- b) est plus dense dans les zones de collision.
- c) s'épaissit progressivement dans les zones de collision anciennes.
- d) s'altère sous l'effet des agents de l'érosion.

5. La méthode de datation rubidium-strontium est fondée sur la décroissance radioactive du ^{87}Rb , qui se désintègre spontanément en ^{87}Sr , un isotope stable. On mesure dans la roche à dater les quantités de ^{87}Rb , ^{87}Sr et ^{86}Sr , un isotope stable dont la quantité est supposée constante au cours du temps.

- a) On connaît les quantités initiales des éléments pères et fils.

b) Le ^{86}Sr est un élément fils du ^{87}Sr .

c) Il est indispensable d'effectuer des mesures sur plusieurs minéraux de la roche à dater.

d) Cette méthode de datation est adaptée aux roches sédimentaires.

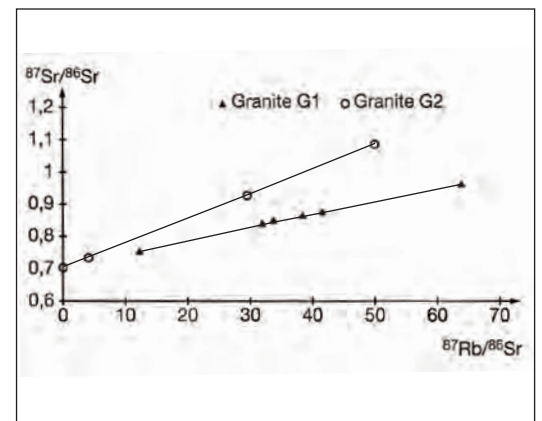
6. Des mesures isotopiques effectuées sur des minéraux des granites G1 et G2 ont permis de construire le graphique ci-dessous. Les droites ont pour équation : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (\lambda t) ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} + ^{87}\text{Sr}_0/^{86}\text{Sr}$.

a) Le granite G1 est plus âgé que le granite G2.

b) Le granite G2 est plus âgé que le granite G1.

c) Les granites G1 et G2 sont de même âge.

d) Le coefficient directeur de la droite isochrone ne varie pas de la même façon que t , le temps écoulé depuis la fermeture du système.



Ce qu'il ne faut pas faire

- Se dispenser d'une relecture attentive en fin d'épreuve car il s'agit d'un QCM : les réponses peuvent beaucoup se ressembler et une faute d'inattention est possible.

Le corrigé

1. b), 2. a), 3. a), 4. d), 5. c), 6. b) ■

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 2.1

– Exploiter des documents pour mettre en relation un modèle et des mesures afin d'expliquer la notion d'isostasie.

Partie 2.1

– Identifier dans des documents les preuves d'un raccourcissement et d'un épaissement crustal au niveau d'une chaîne de montagnes.

Voyage vers le manteau de la Terre, dans la croûte océanique du Pacifique

Au large du Costa Rica, une mission internationale va forer l'écorce terrestre sur 2 km pour prélever des roches profondes, témoins de l'histoire géologique de notre planète.

« **A** mesure que nous descendions, la succession des couches composant le terrain primitif apparaissait avec plus de netteté. [...] Jamais minéralogistes ne s'étaient rencontrés dans des conditions aussi merveilleuses pour étudier la nature sur place. » Dans son *Voyage au centre de la Terre*, publié en 1864, Jules Verne imagine la jubilation du professeur Lindendrock et de son neveu Axel devant « ces richesses enfouies dans les entrailles du globe ».

Un siècle et demi plus tard, l'enthousiasme de Benoît Ildefonse (Laboratoire de géosciences, CNRS-université de Montpellier-II) n'est pas moins vif à l'idée de creuser jusqu'aux couches inférieures de l'écorce terrestre, à 2 km de profondeur, et d'en remonter à la surface, pour la première fois, des roches encore jamais extraites de leur gangue. En attendant de pouvoir un jour traverser cette pellicule superficielle pour accéder, sous la croûte terrestre – épaisse de 30 km en moyenne sur les continents et de 6 km sous les océans –, au manteau qui entoure le noyau de notre planète et qui représente les deux tiers de sa masse.

Le chercheur est l'un des deux codirecteurs, avec le Britannique Damon Teagle (Centre national d'océanographie de l'université de Southampton), de la mission scientifique internationale qui, du 13 avril au 30 juin, va réaliser un forage

océanique dans le Pacifique est, au large du Costa Rica, avec le bateau américain *Joides Resolution*. Un bâtiment de 143 m de long, équipé d'un derrick de 61 m de hauteur qui permet de déployer plus de 9 km de tubes de forage dans les abysses, pour atteindre l'écorce terrestre. À bord, un laboratoire peut effectuer l'analyse physique, chimique et magnétique des carottes minérales extraites du sous-sol. Cette campagne doit pousser plus avant les forages déjà effectués dans le même puits, en 2002 et 2005, jusqu'à une profondeur de 1 500 m. C'est-à-dire sans dépasser la croûte océanique supérieure. L'objectif est cette fois de descendre jusqu'à 2 000 m, au niveau de la croûte océanique inférieure. Là où les basaltes de surface, nés du refroidissement rapide du magma issu de la fusion des roches du manteau, cèdent la place aux gabbros, des roches formées par une cristallisation plus lente du magma.

Le site prospecté se trouve sur la plaque Cocos, près d'une dorsale océanique (zone de divergence entre deux plaques tectoniques où se produisent des remontées de magma) où la formation de la croûte, voilà quinze millions d'années, a été particulièrement rapide. La croûte supérieure y est plus mince qu'ailleurs, ce qui rend les gabbros plus accessibles. « *L'examen d'échantillons de ces roches permettra de mieux*

connaître la structure de la croûte, la façon dont elle se forme à partir du magma du manteau et leur mode de refroidissement », explique Benoît Ildefonse.

Ce n'est qu'un début. L'expédition coïncide avec le 50^e anniversaire du plus ambitieux programme de forage scientifique de tous les temps : le projet Mohole, du nom du géologue croate Andrija Mohorovičić qui, dès 1909, avait découvert l'existence, à la limite entre l'écorce et la partie supérieure du manteau terrestre, d'une discontinuité se manifestant par une accélération de la vitesse de propagation des ondes sismiques.

Au printemps 1961, au large de l'île mexicaine de Guadalupe, les Américains percèrent plusieurs trous jusqu'à près de 200 m. Mais, faute de techniques de forage adaptées, le projet fut abandonné cinq ans plus tard, après avoir englouti plus de 50 millions de dollars (34,6 millions d'euros environ). Par dérision, l'entreprise fut rebaptisée « Nohole », pas de trou. Depuis, plusieurs milliers de

forages scientifiques ont été conduits, dans le cadre de collaborations internationales dont l'actuelle est l'*Integrated Ocean Drilling Program* (IODP). Mais aucun n'a atteint la discontinuité de Mohorovičić, plus simplement appelée le Moho. Le plus profond n'a pas dépassé 2 111 m. L'exploitation pétrolière offshore va bien au-delà – au large de Cayenne, en Guyane, la compagnie britannique Tullow vient d'entreprendre un forage d'exploration jusqu'à 4 300 m sous le plancher océanique –, mais dans des couches sédimentaires recelant des gisements d'hydrocarbures, et sans carottage de roches, qui exige un équipement plus sophistiqué.

La mission en cours servira de repérage pour une nouvelle tentative de creusement jusqu'au Moho, 4 000 m plus bas. Elle pourrait être décidée, espère Benoît Ildefonse, dans la décennie à venir. Il y faudra des moyens de forage et de carottage encore plus performants. Et un financement international de plusieurs centaines de millions d'euros. C'est à ces

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article montre que, malgré les techniques de prospection indirecte, les tentatives de forage dans la croûte terrestre à des profondeurs de plus en plus importantes sont

toujours d'actualité. Aucun forage n'a jamais atteint la discontinuité de Mohorovičić (le Moho), mais cet objectif est plus envisageable en milieu océanique, où la croûte de 6 km est bien moins épaisse que la croûte continentale (30 km).

conditions que seront mieux comprises « la dynamique interne de notre planète, la tectonique des plaques à l'origine des séismes tels que celui du 11 mars au Japon, ou encore le rôle de la croûte et du manteau

terrestres dans le cycle du carbone », plaide le chercheur. « Forer jusqu'au manteau est le plus grand défi de l'histoire des sciences de la Terre, dit-il. Paradoxalement, nous en savons

davantage sur d'autres planètes, grâce aux missions spatiales, que sur la nôtre. » ■

Pierre Le Hir
(16 avril 2011)

Le voyage sous la Terre du satellite Goce

En mesurant des variations de gravité, l'engin a fourni une carte mondiale d'une frontière géologique, le Moho.

Lorsque Isaac Newton conçut la loi de la gravitation universelle, il n'imaginait pas que, trois siècles plus tard, des scientifiques utiliseraient les données du champ de gravité terrestre obtenues par des satellites pour étudier les profondeurs inaccessibles de notre globe. Des chercheurs de l'École polytechnique de Milan (Italie), dirigés par Daniele Sampietro, viennent en effet de réaliser la première carte mondiale du Moho, cette zone frontière située entre la croûte terrestre et le manteau supérieur. Ils ont obtenu ce résultat en interprétant les données recueillies par le satellite Goce de l'Agence spatiale européenne (ESA), en orbite à 265 km de la Terre. Cet engin, lancé en mars 2009, a fourni des données gravimétriques d'une finesse inégalée – à l'échelle de 80 km – de l'ensemble du globe. Cette image du Moho a été réalisée dans le cadre d'un projet (Gemma) financé par l'ESA.

Le Moho est le nom de la discontinuité découverte par le sismologue croate Andrija Mohorovičić, alors qu'il étudiait la propagation des ondes sismiques générées par le séisme du 8 octobre 1909 en Croatie. Il

avait découvert à cette occasion que les ondes accélèrent après le Moho. Ce dernier est situé en moyenne à une profondeur de 25 km à 60 km sous les continents et de 5 km à 8 km sous les océans. Au-delà, on trouve le manteau, puis le noyau liquide et la graine (le noyau solide), située à plus de 5 000 km de profondeur.

« Cartographie globale »

Toutes ces données ont été fournies grâce aux ondes sismiques. Car personne – contrairement aux héros de Jules Verne – n'a pu aller sonder le centre de la Terre. Les Américains, les Allemands et les Russes ont bien tenté de forer le Moho, sans résultat, bien que les Russes aient atteint la profondeur de 12 km en 1989 dans la presqu'île de Kola.

Jusqu'à présent, on possédait bien des données éparses sur les différentes profondeurs du Moho, obtenues par les ondes sismiques ou des données gravimétriques locales, dont les variations reflètent la différence de densité entre les roches de la croûte et celles du manteau. Mais « l'hétérogénéité de ces informations dans le temps et dans l'espace se traduit par de grandes

erreurs dans le résultat final », estime Daniele Sampietro.

Aujourd'hui, grâce à Goce, « les chercheurs italiens ont réalisé une cartographie globale de l'épaisseur de la croûte terrestre », explique Michel Diament, spécialiste de gravimétrie à l'Institut de physique du globe de Paris. Or la croûte terrestre et le manteau supérieur sont d'un grand intérêt pour les scientifiques. C'est l'endroit où se situe la plus grande partie des processus géophysiques importants liés à la tectonique des plaques, tels les séismes, les volcans et la naissance des montagnes.

Mais comment des données gravimétriques peuvent-elles fournir des renseignements sur la structure interne de la Terre ?

« Si la Terre était un oignon, avec des couches homogènes et sphériques, la pesanteur serait partout la même à la surface du globe, précise Michel Diament. Or la Terre est hétérogène. Il y a des endroits plus ou moins denses, si bien que la pesanteur est variable et reflète la répartition hétérogène de la matière à différentes profondeurs. »

Cette répartition hétérogène des masses à l'intérieur de la Terre contrôle également le

géοide, la forme qu'aurait la Terre si elle était recouverte entièrement d'océans. Et les scientifiques ont découvert des choses surprenantes. En étudiant la trajectoire des satellites, qui subit l'influence du champ de gravité terrestre, ils ont mis en évidence une Terre cabossée, invisible à l'œil nu, avec des bosses sur la Papouasie-Nouvelle-Guinée et le Pacifique ouest, et un grand creux associé à l'océan Indien. Les six accéléromètres de Goce ont confirmé ces données avec une précision inégale. ■

Christiane Galus
(17 mars 2010)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article récent montre l'évolution des techniques de détermination de la profondeur du Moho, la limite entre la croûte terrestre et le manteau. C'est un satellite mesurant les variations de la gravité, liées à l'hétérogénéité de densité des matériaux, qui a permis d'en réaliser une carte mondiale.

La structure interne des Pyrénées dévoilée

Des chercheurs dressent une carte tridimensionnelle de la chaîne.

Il y a 65 millions d'années, l'Espagne faisait une entrée « fracassante » au sein de l'Europe. De la collision entre les plaques tectoniques Eurasie, au nord, et Ibérie, au sud, naissait alors la chaîne des Pyrénées. Les mécanismes géologiques ayant conduit à cette formation sont encore controversés. Annie Souriau, du Laboratoire de dynamique terrestre et planétaire, de Toulouse, et Michel Granet, de l'Observatoire de physique du globe, de Strasbourg, ont mené une étude sur la structure profonde des Pyrénées.

Les chercheurs ont utilisé pour cela une technique, très prometteuse, d'analyse du temps de propagation des ondes sismiques qui diffère des systèmes (camions vibreurs) habituellement utilisés par les pétroliers. Résultat : une véritable radiographie d'est en ouest des Pyrénées, interprétable en trois dimensions, détaillant avec précision la situation des couches géologiques jusqu'à une profondeur de 200 kilomètres.

Cette étude valide un modèle de formation de la chaîne montagneuse, lié à l'histoire tectonique mouvementée de l'Espagne. Située, il y a 200 millions d'années, à l'ouest de la France, alors que la Galice est en face du Finistère, la plaque Ibérie entame une lente rota-

tion vers le sud. Tournant autour d'un axe situé à l'ouest des Pyrénées, elle ouvre, sur son passage, le golfe de Gascogne. Repoussée par la plaque africaine, elle entre en contact avec l'Europe. Lors de cet affrontement tectonique, la plaque Ibérie s'encastre dans son vis-à-vis européen. La partie supérieure de la croûte s'élève alors et forme les Pyrénées.

L'étude des chercheurs a montré que la partie inférieure de la croûte ibérique a amorcé un plongeon sous son homologue européenne. Elle s'est ensuite enfoncée sous l'écorce terrestre, dans une zone connue sous le nom de manteau, jusqu'à une profondeur de 100 kilomètres. Ces travaux ont également mis en évidence la remontée et la percée à travers la croûte de deux gros blocs d'origine profonde. Invisibles en surface, ils coïncident avec des anomalies gravimétriques connues par ailleurs. La morsure de ces deux « dents » rocheuses à travers la couche sédimentaire pourrait expliquer une partie importante de l'activité sismique de cette région.

Un large réseau de stations

Pour parvenir à ces résultats, les chercheurs ont mesuré et analysé les temps de propagation des ondes sismiques

provenant de séismes locaux ou lointains. Chaque couche traversée par le train d'ondes est caractérisée par une vitesse de propagation spécifique. Si le sous-sol est homogène, le temps de propagation des ondes ne dépend que de la distance de leur foyer. En revanche, toute discontinuité de la structure interne provoque une avance ou un retard du front d'ondes. Ainsi, la traversée d'une structure à vitesse de propagation élevée sera mise en évidence par une légère avance du signal. La comparaison des temps d'arrivée permet de localiser la position de chaque anomalie.

Mais, pour obtenir une carte tridimensionnelle à grande échelle d'une chaîne de collision, il faut disposer d'un large réseau de stations capables de recevoir et d'enregistrer les ondes sismiques. La précision de l'étude en dépend. Le massif pyrénéen est équipé d'un grand nombre de sismographes, installés notamment à la suite du tremblement de terre qui secoua le village d'Arrette, le 13 août 1967, au sud-ouest de Pau (Pyrénées-Atlantiques). Ce séisme, d'une magnitude de 5,7 sur l'échelle de Richter, détruisit le petit village pyrénéen et causa la mort d'une personne.

Annie Souriau et Michel Granet ont ainsi bénéficié des

données issues d'une quarantaine de stations fixes françaises et espagnoles, dont certaines mises en place dans des buts très divers : enregistrements sismiques, contrôle des avalanches en Espagne ou surveillance du gisement de gaz de Lacq en France. Mais, regrette Annie Souriau, le fonctionnement du réseau pyrénéen, géré par l'Observatoire Midi-Pyrénées, est aujourd'hui menacé d'interruption. Les stations nécessitent un entretien régulier et minutieux. Or, les ingénieurs en charge de cette tâche, bientôt à la retraite, ne seront pas remplacés cette année. ■

Pierre Rimbart
(7 septembre 1995)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article déjà ancien décrit le principe et les intérêts de la prospection sismique pour la compréhension de la structure profonde des chaînes de montagnes. Complémentaires de l'étude des affleurements et des roches, ces techniques permettent de reconstituer l'histoire d'un relief, selon des scénarios qui ont évolué depuis 1995 au gré des nouvelles découvertes.

MOTS CLÉS

DENSITÉ

Rapport de la masse d'un certain volume d'un corps à celle du même volume d'eau (ou d'air pour les gaz).

MARGE ACTIVE

Limite océan/continent qui correspond à une frontière de plaque convergente.

Les marges actives sont le siège de la subduction et se caractérisent par une importante activité sismique et volcanique.

MARGE PASSIVE

Zone de transition entre une croûte continentale et une croûte océanique au sein d'une même plaque lithosphérique. L'histoire de la naissance des océans est enregistrée au niveau de leurs marges passives (failles normales et sédimentation caractéristiques du *rifting*).

PLAQUE LITHOSPHÉRIQUE

Portion de lithosphère d'une centaine de kilomètres d'épaisseur, aux frontières de laquelle des reliefs (dorsales, chaîne de montagnes, fosse océanique) et une activité sismique et/ou volcanique sont observés en relation avec les mouvements relatifs des autres plaques.

NOTION CLÉ

La tectonique des plaques

Il s'agit d'une théorie élaborée à la fin des années 1960.

Trois types de mouvements relatifs des plaques sont observés à leurs limites :

- des mouvements de convergence au niveau des chaînes de montagnes et des zones de subduction ;
- des mouvements de divergence au niveau des dorsales océaniques où il y a création de lithosphère océanique ;
- des zones de coulissage où il n'y a ni création ni destruction de surface lithosphérique.

Contexte de la formation des chaînes de montagnes et disparition des reliefs

Une partie des terres émergées est formée de chaînes de montagnes, anciennes ou toujours en cours de surrection. L'exemple des Alpes permet d'étudier la formation d'une chaîne de collision dans un contexte de convergence lithosphérique. Les traces d'un ancien domaine océanique y témoignent de sa fermeture par subduction. Au cours du temps, les chaînes de montagnes, comme tous les reliefs formés à la surface de la Terre, tendent à disparaître : la lithosphère continentale est recyclée en permanence.

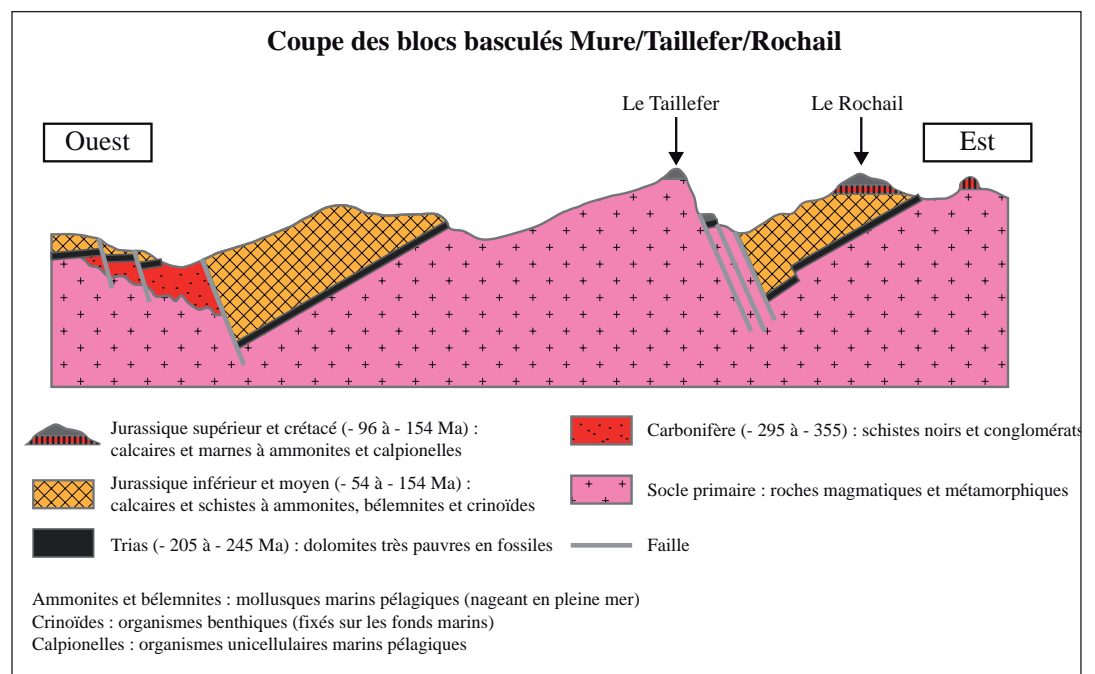
Les traces d'un ancien océan

Le mont Chenaillet, situé dans les Alpes, est composé de roches basaltiques en forme de coussins, qui rappellent les pillow-lavas des dorsales océaniques. Sous ce basalte se trouvent successivement des gabbros et des péridotites : il s'agit d'une **série ophiolitique**, vestige d'une lithosphère océanique de 155 Ma, charriée sur le continent.

Dans la zone dauphinoise, près du Bourg-d'Oisans, des blocs basculés séparés par des failles normales sont recouverts de formations sédimentaires, rappelant les **dépôts des marges passives**. Ce sont les vestiges de la naissance d'un océan.

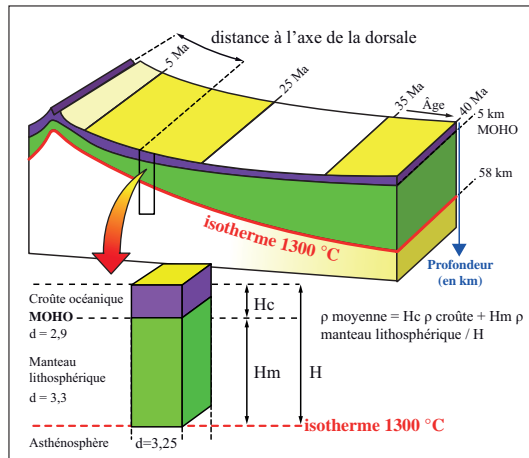
L'une des causes de la subduction

La **lithosphère océanique** est formée de **croûte océanique** (densité 2,9) et de **manteau lithosphérique** (densité 3,3). La **densité globale** de la lithosphère océanique dépend des épaisseurs relatives de croûte et de manteau. La limite avec le manteau asthénosphérique est une limite physique qui définit le comportement plus ou moins ductile des péridotites : l'**isotherme 1 300 °C**. En s'éloignant de la dorsale, la lithosphère océanique se refroidit, l'isotherme 1 300 °C s'enfonce, et le manteau lithosphérique s'épaissit : la densité de la lithosphère océanique augmente au cours du temps. Entre 30 et 50 Ma, la lithosphère océanique devient



Vestiges de marges passives dans les Alpes

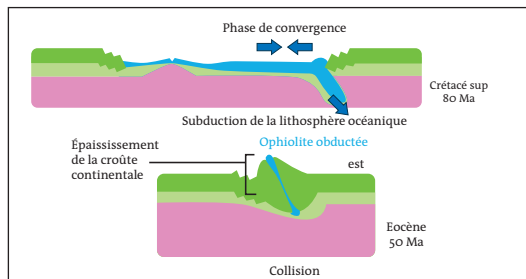
plus dense que l'asthénosphère (densité 3,25) et peut plonger par **subduction**, si les conditions y sont favorables. Ceci explique qu'il n'existe pas de lithosphère océanique plus ancienne que 200 Ma.



Détail de la structure d'une lithosphère océanique / Évolution de la lithosphère océanique au cours du temps

La collision

Lorsque l'océan séparant deux continents s'est refermé et que la **croûte océanique est entièrement subduite**, les deux masses continentales s'affrontent. Entre elles subsiste la « suture » de matériaux océaniques. L'essentiel de la lithosphère continentale continue de subduire, mais la partie supérieure de la croûte s'épaissit par empilement de nappes dans la zone de contact entre les deux plaques.



La naissance d'une chaîne de montagnes

Des transformations minéralogiques

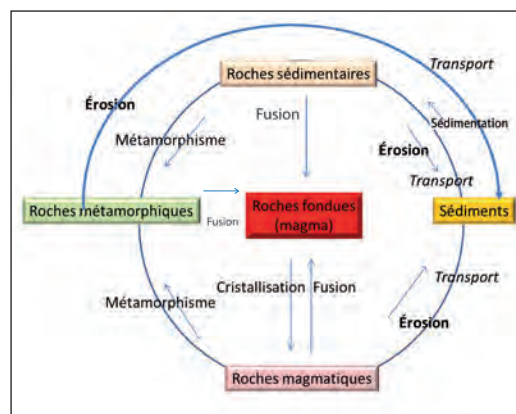
Au cours de la subduction et de l'épaississement, les roches sont soumises à des variations importantes de pression et de température, à l'origine de la transformation des minéraux : c'est le **métamorphisme**. Les minéraux trouvés dans les roches alpines montrent que celles-ci ont été soumises à des pressions et des températures élevées avant de revenir en surface. Dans le domaine interne des Alpes, le métamorphisme a une intensité croissante de l'ouest vers l'est (la pression et la température auxquelles ont été soumises les roches sont de plus en plus élevées) : ceci indique le **sens de la subduction**. Les basaltes et les gabbros sont métamorphisés en métagabbros à faciès à schistes vert à chlorite et actinote, puis à faciès à schistes bleus à glaucophane, puis à faciès à éclogite à grenat, témoignant du métamorphisme haute pression / basse température, caractéris-

tique de la subduction ayant précédé la collision. Ces roches métamorphiques ont une densité plus élevée que les roches d'origine. Ceci a renforcé l'enfoncement de la lithosphère océanique dans l'asthénosphère au cours de la subduction

La disparition des reliefs

Plusieurs **orogènes** se sont succédé au cours de l'histoire de la Terre : **calédonienne** (480-420 Ma), **hercynienne** (320-260 Ma) et **alpine**. Les reliefs de la Grande-Bretagne, de la Scandinavie et du Groenland sont des vestiges de la première ; les Ardennes, les Vosges, le Massif central et le Massif armoricain, de la deuxième. Ces reliefs ont depuis été érodés. Tout relief est donc un **système instable** qui tend à disparaître aussitôt qu'il se forme.

Des **événements tectoniques** peuvent fragiliser des édifices rocheux. D'autres facteurs, liés au **climat** et à l'**altitude**, participent à l'érosion (eau, vent). Les végétaux y contribuent également par la sécrétion de substances acides ou en s'insinuant dans les fissures déjà formées. L'**eau** est un facteur chimique, mais aussi physique, d'érosion : les vagues, les torrents, les glaciers modifient les paysages. Chargé de particules de sable, le **vent** rabote et polit les amas rocheux. Les blocs et les particules glissent le long de la pente formée par le relief, puis peuvent être transportés par l'eau ou le vent très loin du lieu d'altération, en fonction de leur taille. Les sédiments se déposent lorsqu'ils rencontrent un obstacle ou un bassin. Ils peuvent alors former une **roche sédimentaire**. La croûte continentale est recyclée en permanence ■



Le cycle des roches

DEUX ARTICLES DU MONDE À CONSULTER

- **Des séismes provoqués par le ballet des continents** p. 48 (Christiane Galus, 31 mai 2006)
- **Le séisme au Japon – Pour les sismologues, ce tremblement de terre n'est pas encore le « big one »** p. 49 (Hervé Morin, 12 mars 2011)

MOT CLÉ

MÉTAMORPHISME

Transformations minéralogiques et structurales d'une roche à l'état solide, sous l'effet de variations de température et de pression, sans modification importante de sa composition chimique.

ZOOM SUR...

DES TÉMOINS DE L'HISTOIRE ALPINE

- Des roches prélevées en Vanoise ont été soumises à une pression de 11 kbars, correspondant à une profondeur de 33 km et à une température de 390 °C.
- Des roches prélevées au mont Viso (zone de fort métamorphisme) témoignent d'une pression de 21 kbars (63 km de profondeur) et d'une température de 550 °C.
- La coésite trouvée dans le massif italien Dora-Maira correspond à du quartz soumis à des pressions supérieures à 30 kbars (90 km de profondeur). On peut dater les événements métamorphiques et les placer dans un diagramme afin de tracer un trajet pression-température-temps et de reconstituer une partie de l'histoire de la chaîne de montagnes.

L'ÉROSION DU GRANITE

Un massif granitique va s'altérer, devenant du granite pourri et une arène granitique, un sable dans lequel des grains de feldspaths, des paillettes de mica et des grains de quartz sont identifiables. Si le massif est exposé au soleil, le mica noir emmagasine la chaleur et se dilate. Pendant la nuit, la roche refroidit et se contracte de façon différente dans les parties superficielles et profondes. Des fissures se forment, dans lesquelles l'eau de pluie va pouvoir s'insinuer. Une succession de gel/dégel fragilise la roche et élargit les fissures.



ZOOM SUR...

L'HISTOIRE DES ALPES

Elle commence par la mise en place d'un fossé d'effondrement continental, prélude du futur océan alpin. Une mer de faible profondeur s'engouffre. Au jurassique, l'océanisation proprement dite est en marche : l'océan alpin sépare l'Europe de l'Afrique. De la lithosphère océanique est créée vers -140 Ma au niveau d'une dorsale ; l'océan est en expansion. Les marges de l'océan sont passives, des sédiments post-rift témoignant de l'arrêt du rifting se déposent. La datation paléontologique de roches contenant des fossiles marins indique que l'ouverture océanique (accrétion) s'est déroulée du jurassique (-170 Ma) au crétacé supérieur (-70 Ma), avec une vitesse d'expansion de l'ordre de 1 cm par an. Au crétacé inférieur, l'océan alpin a atteint sa taille maximale (1 000 km de largeur estimée). Au crétacé supérieur, la fermeture de l'océan s'enclenche par subduction. Après disparition de l'océan, la marge continentale européenne est entraînée à son tour dans la subduction, puis la collision proprement dite débute, aux alentours de -35 Ma. Un vestige de croûte océanique a échappé à la subduction, ce sont les ophiolites : les nappes ophiolitiques (Chenaillet) viennent reposer sur le domaine briançonnais de la marge européenne.

DES TÉMOINS OCÉANIQUES

Certaines régions des Alpes présentent des affleurements de roches sédimentaires riches en fossiles marins, témoins de l'ancien domaine océanique :
 - les calcaires à rudistes (mollusques bivalves) ou à orbitolines (animaux unicellulaires) des massifs du Vercors et de la Chartreuse témoignent de récifs coralliens dans une mer peu profonde et chaude ;
 - les radiolarites du Chenaillet sont formées par l'accumulation de squelettes en silice de radiolaires, des animaux planctoniques unicellulaires ; elles témoignent d'un océan de grande profondeur.

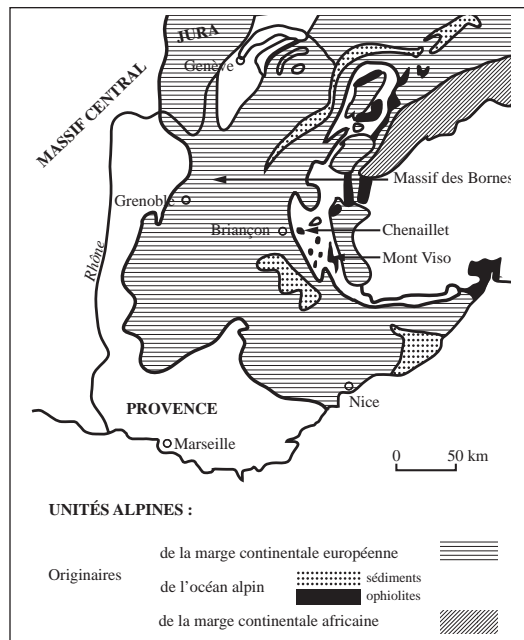
Partie 2.2 : La formation des Alpes

L'intitulé complet du sujet

On cherche à montrer comment des données de terrain peuvent permettre de comprendre des événements géologiques anciens.

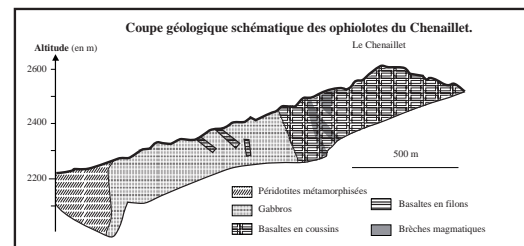
Vous avez effectué une excursion géologique dans les Alpes et rapporté des échantillons et des photographies. En vous appuyant sur ces données de terrain et d'autres informations présentes dans le dossier, rédigez un compte-rendu de votre excursion, illustré par un ou plusieurs schémas, pour montrer que les indices recueillis permettent de comprendre certaines étapes de l'histoire de la formation de cette chaîne de montagnes. Votre réponse s'appuiera sur l'exploitation du dossier. Aucune étude exhaustive des documents n'est attendue.

Document de référence : Carte simplifiée des Alpes



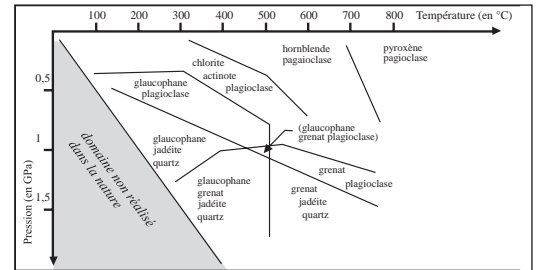
Les documents

Document 1 : Coupe géologique schématisée des ophiolites du Chenaillet



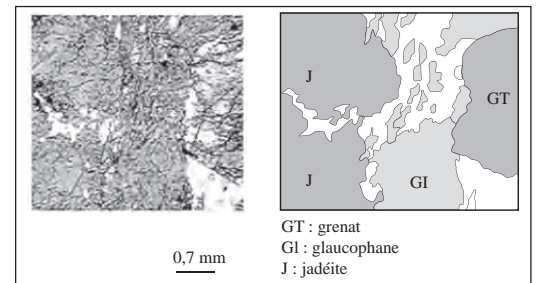
Les basaltes supérieurs sont âgés de 100 millions d'années. Les plus vieux sédiments océaniques (non figurés sur la coupe) qui surmontent les basaltes ont 65 millions d'années. Source : Comprendre et enseigner la planète terre. Caron et al. Ophrys

Document 2 : Domaines de stabilité de quelques associations de minéraux de la croûte océanique

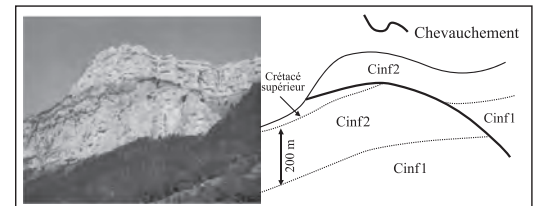


Remarque : les transformations minérales étant très lentes, des minéraux formés dans un domaine de température et pression donné peuvent être encore présents même si la roche n'est plus dans ce domaine (minéraux reliques). Source : Centre Briançonnais de Géologie Alpine

Document 3 : Observation microscopique d'un métagabbro du mont Viso (Alpes italiennes) et son schéma interprétatif



Document 4 : ORochers de Leschaux dans les Alpes (massifs des Bornes, Haute Savoie, Nord de Grenoble) et croquis d'interprétation. (Crédit photographique : Christian Nicollet/ UBP Clermont-Ferrand)



Cinf1 et Cinf2 : couches datées du crétacé inférieur. Cinf1 est une couche plus ancienne que Cinf2. Elle est constituée d'épaisse masses de calcaires blancs à Rudistes et Orbitolinidés (mollusques et foraminifères marins fossiles).

Ce qu'il ne faut pas faire

- Faire une étude exhaustive des documents sans faire de liens entre les indices recueillis.
- Omettre de respecter la forme imposée par le sujet : un compte-rendu d'excursion.
- Se dispenser de faire appel à ses connaissances.
 - Négliger les schémas.

L'analyse du sujet

Il s'agit de retracer, dans l'ordre chronologique, certaines étapes de l'histoire de la formation des Alpes à partir de documents de terrain. Après avoir exploité les indices de l'existence d'un océan alpin par le passé, la subduction est mise en évidence par l'étude des minéraux du métamorphisme. Enfin, le raccourcissement et l'épaississement crustal permettent de décrire la collision continentale ayant succédé à la fermeture océanique.

Proposition de corrigé

I. Le massif du Chenaillet : des lambeaux d'un océan disparu (Exploitation du document 1)

Dans le massif du Chenaillet, nous avons observé des péridotites métamorphisées (à 2 200 mètres), puis des gabbros et, à partir de 2 400 m, des basaltes en coussins. Il s'agit de roches de la lithosphère océanique, qui se trouvent normalement au fond des océans. Les ophiolites témoignent de la présence à l'emplacement actuel des Alpes d'un océan aujourd'hui disparu. On peut estimer que la mise en place de cette partie de lithosphère océanique date d'environ - 100 Ma.

II. Les métagabbros du mont Viso : témoins d'une subduction passée (Exploitation des documents 2 et 3)

En Italie, dans le massif du mont Viso, nous avons trouvé des échantillons de métagabbros, des gabbros d'une ancienne croûte océanique qui ont subi du métamorphisme. Ils contiennent des minéraux du métamorphisme : grenat, glaucophane et jadéite. L'étude du diagramme de stabilité montre que cette association correspond à une température d'environ 500 °C et une pression de 1 GPa. Il s'agit donc d'un métamorphisme haute pression - basse température -, caractéristique d'une zone de subduction.

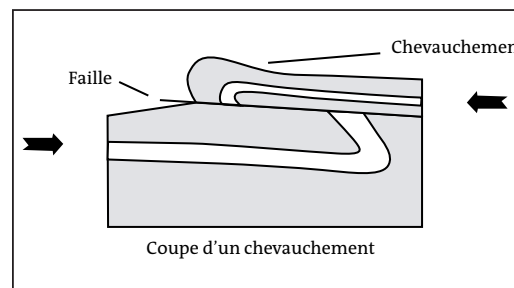
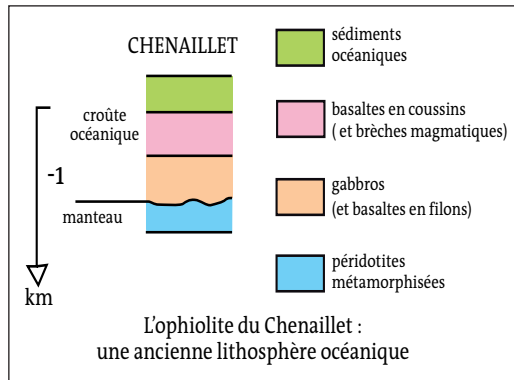


Schéma du chevauchement indiquant les contraintes compressives

Ainsi les métagabbros du mont Viso témoignent d'une subduction passée de la lithosphère océanique de l'océan alpin.

III. Le chevauchement des rochers de Leschaux : indice d'une compression (Exploitation du document 4)

Enfin, nous sommes allés dans le massif des Bornes, où nous avons observé un contact anormal montrant un chevauchement du crétacé inférieur 2 sur l'unité formée du crétacé supérieur et du crétacé inférieur 2.

Cette déformation importante des roches résulte d'une tectonique en compression qui s'inscrit dans le cadre de la collision continentale, à l'origine de la surrection des Alpes.

De plus, nous avons observé dans les calcaires du crétacé inférieur 1 la présence de fossiles marins de rudistes (mollusques) et orbitolinidés (foraminifères), prouvant qu'ils se sont mis en place dans un domaine océanique. ■

ZOOM SUR...

LE DIAGRAMME DE STABILITÉ DES MINÉRAUX DU MÉTAMORPHISME

Il s'agit d'un graphique qui permet de visualiser dans quelles conditions de pression (donc de profondeur) et de température les minéraux peuvent exister.

Les domaines de stabilité des différents assemblages de minéraux sont déterminés expérimentalement en laboratoire, en les soumettant à des pressions et des températures croissantes dans des presses appelées « cellules à enclumes de diamant ». Ces outils permettent de couvrir pratiquement tout le domaine de pressions et de températures que l'on rencontre à l'intérieur de la Terre.

Le diagramme peut être découpé en faciès métamorphiques (schistes verts, schistes bleus, éclogites, etc.) qui n'indiquent pas la nature de la roche, mais les conditions de pression et de température qui font apparaître des associations minérales caractéristiques.

Ainsi, les minéraux du métamorphisme observés dans une roche permettent de reconstituer les conditions auxquelles cette roche a été soumise au cours de l'histoire de la chaîne de montagnes.

LE PRINCIPE DES « PRESSES À MINÉRAUX »

Les cellules à enclumes de diamant permettent de soumettre les minéraux à des pressions allant jusqu'à 500 gigapascals (GPa).

Une pression correspond à une force par unité de surface. Le principe de cette technique repose ainsi sur l'application d'une force très importante sur la surface la plus réduite possible. Le diamant est utilisé à cette fin depuis les années 1950 pour ses propriétés de résistance exceptionnelles. En effet, les diamants se forment eux-mêmes à grande profondeur, c'est-à-dire à des pressions très élevées.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 2 :

- Établir un schéma-bilan du cycle des matériaux de la croûte continentale, avec ou sans documents.

Partie 2.1 :

- Exploiter des documents et raisonner pour mettre en évidence le lien entre l'âge d'une lithosphère océanique, sa densité et la subduction.

Partie 2.2 :

- Exploiter des données cartographiques, des images ou des données satellitaires pour apprécier l'érosion d'un massif actuel.

Des séismes provoqués par le ballet des continents

Alaska, Kamtchatka, Chili, Asie du Sud-Est et Pacifique sont situés sur des zones de subduction à l'origine des plus violentes secousses.

Les séismes destructeurs qui ont frappé Sumatra en 2004 et 2005, et aujourd'hui Java, résultent des mouvements lents et puissants de la croûte terrestre. Celle-ci est formée d'une douzaine de plaques qui s'écartent les unes des autres au fond des océans, sous l'effet des courants de convection du manteau terrestre, un peu comme ceux qui animent l'eau qui bout dans une casserole. Ce mécanisme permet la création d'une croûte neuve qui repousse les plaques existantes et fait plonger celles qui sont océaniques, donc plus lourdes, sous d'autres, plus légères, en général continentales. Ce processus dit « *de subduction* » se produit au niveau des grandes fosses océaniques, et c'est lui qui est à l'œuvre en Indonésie, où la plaque indo-australienne océanique plonge sous la plaque eurasiatique continentale au rythme de 5 à 6 cm par an. Cela peut paraître faible, mais c'est une vitesse considérable eu égard aux forces titanesques mises en jeu dans ce mouvement de plongée. Outre la production de séismes violents, la subduction donne aussi lieu à un volcanisme important. Car lorsqu'une plaque plonge sous une autre, il se

produit, vers 100 km de profondeur, un changement dans la structure des minéraux qui s'accompagne de chaleur et fait fondre partiellement la zone de subduction. Ce matériel chaud et moins dense a tendance à remonter. Et par un mécanisme très complexe, il peut donner lieu à des éruptions. Bien d'autres régions du globe sont confrontées à ce phénomène de subduction à l'origine d'une très forte activité sismique. « *Celle-ci n'est pas systématiquement meurtrière car nombre de ces zones de subduction sont dans des régions quasi désertiques ou peu peuplées* », rappelle Paul Tapponnier, spécialiste de tectonique à l'Institut de physique du globe de Paris. C'est le cas de l'Alaska, qui connaît régulièrement de très gros séismes, comme celui de magnitude 9,2 qui l'a secoué en 1964. C'est celui du Kamtchatka, qui en a enregistré un de magnitude 9 en 1952. Le Chili n'est pas à l'abri en raison de la plongée de la plaque Nazca sous l'Amérique du Sud. Situation qui a donné lieu en 1960 au plus gros séisme de l'histoire récente avec une magnitude record de 9,5. Et d'autres de cette importance sont attendus par les sismologues, dans une zone,

espèrent-ils, quasi désertique de la côte.

Les îles Tonga-Kermadec et les îles Mariannes dans le Pacifique sont également sous la menace de telles secousses. Mais ces régions sont faiblement peuplées, au contraire du Japon, des Philippines, de Taïwan, de l'Indonésie, des Antilles ou de la Méditerranée orientale. S'y ajoutent, pour certains de ces pays, des normes de construction parasismique peu contraignantes, voire inexistantes.

Les séismes de subduction les plus importants (interplaques) sont provoqués par le frottement entre deux plaques tectoniques. Mais cela ne suffit pas. Il faut aussi que « *la zone de contact soit très longue, large et d'une pente très faible*, explique Louis Dorbath, sismologue à l'Institut de physique du globe de Strasbourg. *C'est ce qui s'est passé au Chili et à Sumatra, par exemple, mais pas aux*

îles Tonga et Mariannes, où la pente est très forte et l'interface, faible. »

La plus grande partie de l'énergie sismique du globe est dissipée dans les zones de subduction. Mais tous les grands séismes terrestres ne sont pas dus à ce mécanisme. Il existe aussi des régions de collision continentale frontale qui donnent lieu à des secousses telluriques, comme celle qui a produit l'Himalaya lorsque l'ancien océan Thétys a été entièrement fermé par l'avancée de la plaque indienne « *subductant* » sous la plaque eurasiatique. La marge continentale de l'Inde est alors arrivée au contact de l'Asie, et la formidable collision des continents a commencé. C'était il y a cinquante millions d'années. ■

Christiane Galus
(31 mai 2006)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article résume les origines de l'activité sismique et du magmatisme caractéristiques des zones de subduction. Attention toutefois aux raccourcis évoca-

teurs concernant la convection dans le manteau terrestre, ils sont à manipuler avec précaution. De même, les programmes officiels insistent davantage sur l'augmentation de la densité de la lithosphère océanique comme origine de la subduction.

Pour les sismologues, ce tremblement de terre n'est pas encore le « *big one* »

Le séisme de Honshu n'est pas le « *big one* » que les spécialistes redoutaient dans la région de Tokyo. Mais avec une magnitude de moment de 8,9, selon le service géologique américain (USGS), c'est lui aussi un « *big one* ». « *Il s'agit de la secousse la plus puissante qu'ait connue le Japon depuis que des réseaux de sismomètres sont en place* », indique Jérôme Vergne, de l'Institut de physique du globe (IPG) de Strasbourg. Il fait partie des dix plus gros séismes enregistrés dans le monde depuis un siècle, indique le chercheur. « *Ce séisme, qui n'est pas une surprise dans la région, a été plus puissant que ce à quoi on s'attendait* », confirme son collègue Pascal Bernard, de l'IPG de Paris.

Le tremblement de terre est survenu près de la côte est de l'île principale de l'archipel, à 130 km au large de la ville de Sendai, par 25 km de pro-

fondeur. Il résulte des mouvements relatifs entre la plaque nord-américaine, qui englobe une portion de l'Eurasie, et la plaque pacifique, celle-ci glissant vers l'ouest à une vitesse de 83 millimètres par an à la latitude du séisme. « *Le mécanisme au foyer séisme, que nous commençons à analyser, est dit "en faille inverse" : la plaque Pacifique plonge à cet endroit sous l'Eurasie* », indique Jérôme Vergne.

Cette rupture a engendré une série de vagues parce qu'elle est intervenue près de la surface et a entraîné un mouvement de masse d'eau important. Là encore, des analyses sont en cours pour déterminer l'ampleur du déplacement vertical, probablement de quelques mètres, qui pourra être précisée à l'aide d'images radar du relief de l'île de Honshu.

Le séisme a été précédé par une série de gros tremblements de terre : le 9 mars, une secousse

d'une magnitude de 7,2 avait eu lieu à 40 km environ, suivie de trois autres événements d'une magnitude supérieure à 6 le même jour.

La zone de subduction de la fosse du Japon a été le théâtre de neuf événements d'une magnitude supérieure à 7 depuis 1973, rappelle l'USGS. Le plus gros était un séisme de magnitude 7,8 survenu en décembre 1994 à 230 km au nord du séisme de Honshu. Il avait fait trois morts et 700 blessés. Les sismologues vont se concentrer sur l'évaluation de l'étendue de la fracture. « *Il est important de déterminer la longueur de cette faille, car cela*

nous donnera des indications sur l'ampleur possible des répliques », indique Pascal Bernard, qui n'exclut pas des secousses d'une magnitude de 7,5 à 8, accompagnées de risques de tsunami importants. Le chercheur s'inquiète aussi de l'impact du séisme de Honshu sur la zone tectonique plus proche de Tokyo, où le « *big one* » était redouté. « *La menace est d'autant plus grande que la zone a été perturbée. C'est cela que nous allons désormais étudier.* » ■

Hervé Morin
(12 mars 2011)

POURQUOI CET ARTICLE ?

L'actualité récente au Japon met en exergue l'importante sismicité liée aux zones de subduction. Dans ce cas, il s'agit de la plaque Pacifique qui plonge

sous l'Eurasie avec une vitesse de plus de 8 cm/an. **L'article montre ainsi la nécessité d'une connaissance approfondie des structures géologiques et de la dynamique des plaques pour la protection des populations vivant dans les zones actives du globe.**

MOTS CLÉS

ACCRÉTION CONTINENTALE

Formation de nouvelle croûte continentale au niveau des zones de subduction. Les roches se forment par cristallisation du magma, issu de la fusion partielle des péridotites hydratées du manteau de la plaque chevauchante.

SUBDUCTION

Plongement d'une lithosphère océanique dans l'asthénosphère située sous une autre plaque, elle-même constituée de lithosphère océanique ou continentale. Une zone de subduction constitue une limite de plaque caractérisée par la présence d'une fosse océanique et une activité sismique et volcanique.

ZOOM SUR...

L'activité sismique des zones de subduction

Au niveau des zones de subduction, des séismes à foyers profonds sont enregistrés (jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de profondeur). Les foyers des séismes sont alignés le long du plan de Wadati-Benioff, qui matérialise la plaque plongeante.

NOTIONS CLÉS

ROCHES MAGMATIQUES

- Les roches plutoniques comme la granodiorite et le granite proviennent du refroidissement lent du magma en profondeur (pendant plusieurs dizaines de milliers d'années). Les minéraux ont le temps de cristalliser : la structure est dite « grenue » (grains visibles à l'œil nu).
- Les roches volcaniques, comme l'andésite, proviennent du refroidissement rapide du magma à la surface. La structure est dite « microlitique » (ou vitreuse) : des cristaux sont noyés dans un verre, qui correspond au magma dont les atomes n'ont pas eu le temps de s'ordonner en cristaux.

PHÉNOCRISTAUX

Désignent dans une roche volcanique les cristaux de grande taille, visibles à l'œil nu.

Le magmatisme en zone de subduction : une production de nouveaux matériaux continentaux

Les océans peuvent être bordés par des marges actives, correspondant à des zones au niveau desquelles la lithosphère océanique plonge dans l'asthénosphère. Les zones de subduction sont le siège d'une importante activité magmatique qui aboutit à la production de croûte continentale par des mécanismes liés aux transformations minéralogiques de la plaque plongeante.

Un volcanisme explosif

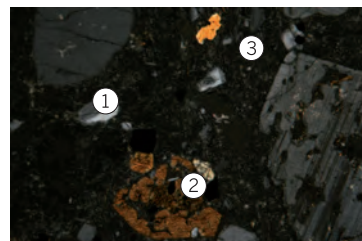
Les zones de subduction présentent une importante activité volcanique et sismique : ce sont des marges dites « actives ». Les volcans se situent sur la plaque lithosphérique chevauchante et sont alignés parallèlement à la fosse océanique. **L'activité volcanique des zones de subduction est caractéristique : les laves émises sont visqueuses**, car riches en silice et de température assez faible. Elles s'écoulent difficilement et bouchent la cheminée du volcan. **Les gaz, issus du dégazage du magma lors de sa remontée, s'accumulent dans ces laves, exercent une pression de plus en plus importante qui finit par être à l'origine d'explosions violentes** donnant des coulées pyroclastiques et des nuées ardentes.

Des zones d'accrétion continentale

Les roches issues du magmatisme des zones de subduction peuvent présenter des compositions chimiques proches, mais sont de deux types :

- des **andésites**, roches associées au volcanisme explosif, qui contiennent des phénocristaux, dont de nombreux feldspaths plagioclases ;
- des **granodiorites**, roches plutoniques formées de quartz, feldspaths plagioclases, micas et amphiboles, faisant partie des granitoïdes.

Une grande partie des magmas cristallisent en profondeur sous la forme de granitoïdes, que l'érosion finit par mettre à jour. Ces roches forment donc de la nouvelle croûte continentale : on parle d'**accrétion continentale**.



Une lame mince d'andésite observée au microscope en lumière polarisée-analysée
1. feldspath plagioclase
2. amphibole
3. pâte microlitique

L'origine des magmas

L'étude de la composition chimique des granitoïdes montre qu'ils sont issus du **refroidissement d'un magma d'origine mantellique**. Cela suggère une fusion partielle des péridotites à l'aplomb des zones d'activité volcanique, c'est-à-dire dans le manteau de la plaque chevauchante.

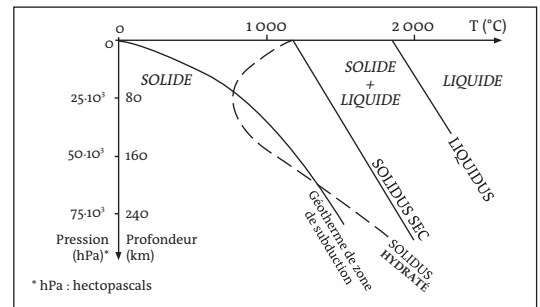


Diagramme pression/température, d'après *Comprendre et enseigner la planète Terre*, Caron-Ophrys

Or les conditions de pression et de température qui règnent au niveau des zones de subduction ne permettent pas d'envisager une fusion partielle des péridotites (le solidus ne recoupe pas le géotherme), à moins que celles-ci ne soient hydratées.

L'origine de l'eau et l'origine du magmatisme en zone de subduction

Depuis sa formation au niveau de la dorsale, la lithosphère océanique qui entre en subduction s'est hydratée : elle est riche en **minéraux hydroxylés (OH⁻)**. Entraînées en profondeur, les roches subissent un métamorphisme de haute pression mais à basse température, la subduction étant plus rapide que le réchauffement de la lithosphère. Les minéraux caractéristiques de la subduction (glaucofane, jadéite, grenat) sont moins riches en eau : les réactions caractéristiques du métamor-

phisme de haute pression / basse température entraînent une libération d'eau. Elle percole dans le manteau de la plaque chevauchante et abaisse la température de fusion des péridotites. Entre 80 et 180 km de profondeur, le « solidus hydraté » croise le

géotherme de subduction : il y a **fusion partielle** et **production de magma**. Le magma ainsi produit alimente les volcans des zones de subduction, ce qui donne des andésites et forme également des plutons de granitoïdes en profondeur. ■

ZOOM SUR...

L'ÉVOLUTION DE LA LITHOSPHERE OCÉANIQUE

Au cours de l'expansion océanique, la déformation est cassante, la croûte océanique se fracture. Les fracturations permettent à l'eau de mer très froide de pénétrer.

Elle ressort à haute température (350 °C) au niveau de cheminées hydrothermales (fumeurs noirs). On parle de « circulation hydrothermale ».

Le flux thermique de la lithosphère diminue avec l'âge : en s'éloignant de l'axe de la dorsale, la lithosphère océanique refroidit.

La diminution de la température et la circulation d'eau sont à l'origine de changements minéralogiques au sein des roches de la lithosphère océanique. Les nouveaux minéraux sont « hydratés » : ils possèdent dans leur formule chimique des radicaux hydroxyles OH⁻. Ils sont stables à basse température.

À la place des feldspaths plagioclases et pyroxènes du basalte et du gabbro, on trouve des amphiboles, de la chlorite et de l'actinote (faciès schiste verts). Les péridotites sont serpentiniées : on constate l'apparition de la serpentine, au détriment de l'olivine et des pyroxènes.

Il s'agit d'un métamorphisme à basse pression / basse température (BP-BT).

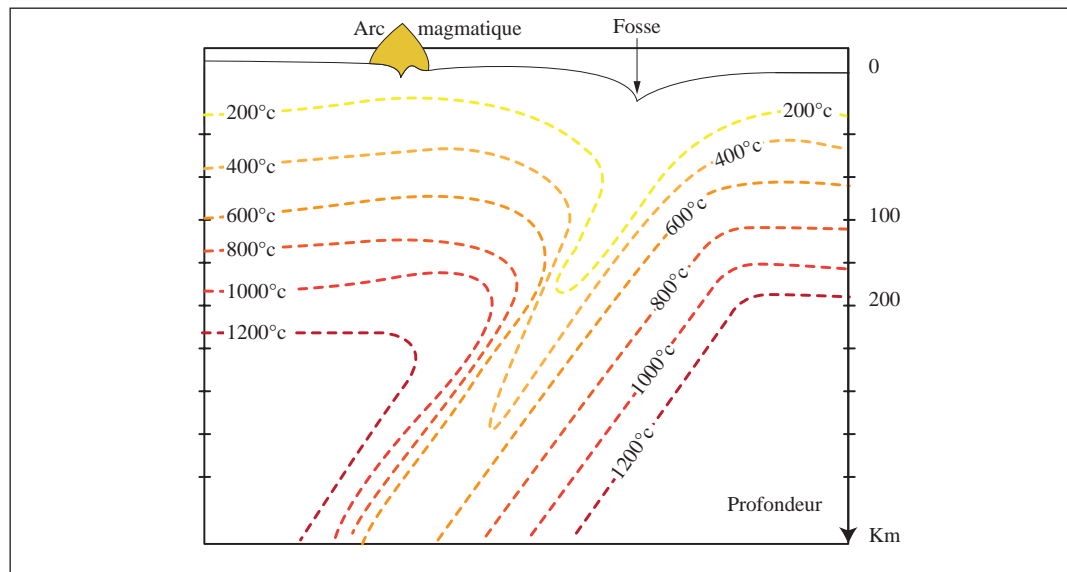
C'est donc une lithosphère océanique froide, dense et hydratée qui entre en subduction.

LES RÉACTIONS DU MÉTAMORPHISME HP-BT AU COURS DE LA SUBDUCTION

(1) plagioclase + chlorite* + actinote* → glaucophane + eau (faciès schiste bleu)

(2) plagioclase + glaucophane → grenat + jadéite + eau (faciès éclogite)

* Chlorite et actinote sont des minéraux hydratés.



Modèle en coupe de tracé des isothermes (lignes d'égale température) dans une zone de subduction

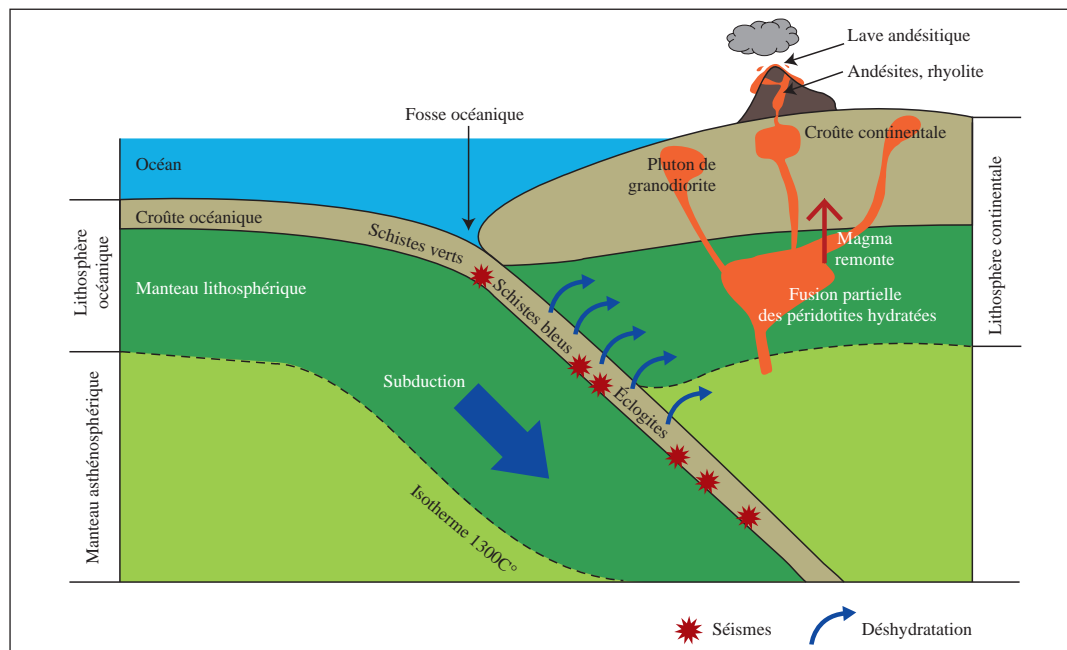


Schéma bilan de l'origine du magmatisme en zone de subduction

UN ARTICLE DU MONDE À CONSULTER

• Un strato-volcan « gris » situé aux franges de la plaque caraïbe p.54 (Hervé Morin, 20 août 1997)

ZOOM SUR...

La découverte des zones de subduction

Plusieurs années avant l'élaboration du modèle de la tectonique des plaques par le Français Xavier Le Pichon et ses collaborateurs (1968), le sismologue américain Hugo Benioff a redécouvert et généralisé les travaux du japonais Wadati. Ce dernier avait lié séismes et volcans japonais à la « dérive des continents » dès 1935, alors que les idées de Wegener étaient encore refusées. Benioff a constaté que dans ces régions à la sismicité et au volcanisme parfois spectaculaires les tremblements de terre étaient localisés sur un plan plongeant, qui sera alors baptisé « plan de Wadati-Benioff ». Certains séismes se localisent à des profondeurs si importantes qu'il ne devrait pas y avoir de déformation cassante en raison des températures élevées qui rendent les matériaux ductiles. Les études menées dans les années 1950 ont montré que ces régions coïncidaient aussi avec des fosses sous-marines très profondes. Dans les années 1960, des chercheurs américains ont montré que le plan de Wadati-Benioff correspondait à une plaque plongeante de lithosphère océanique froide et suffisamment rigide pour se casser, provoquant les séismes.

PERSONNAGES CLÉS

Les « diables des volcans »

Maurice et Katia Krafft sont des volcanologues français, nés en 1946 et 1942, ayant œuvré dans le monde entier pour la prévention des risques volcaniques auprès des populations. Ils ont sans doute contribué à sauver des centaines de milliers de vies humaines, comme celles des 300 000 personnes ayant accepté d'évacuer la zone du Pinatubo aux Philippines après avoir vu un de leurs films. Ironie du sort, le volcan entra en éruption quelques jours après la mort du couple, emporté par une nuée ardente sur le mont Unzen au Japon le 3 juin 1991.

Partie 2.2 : Modélisation de la formation des croûtes continentales primitive et actuelle

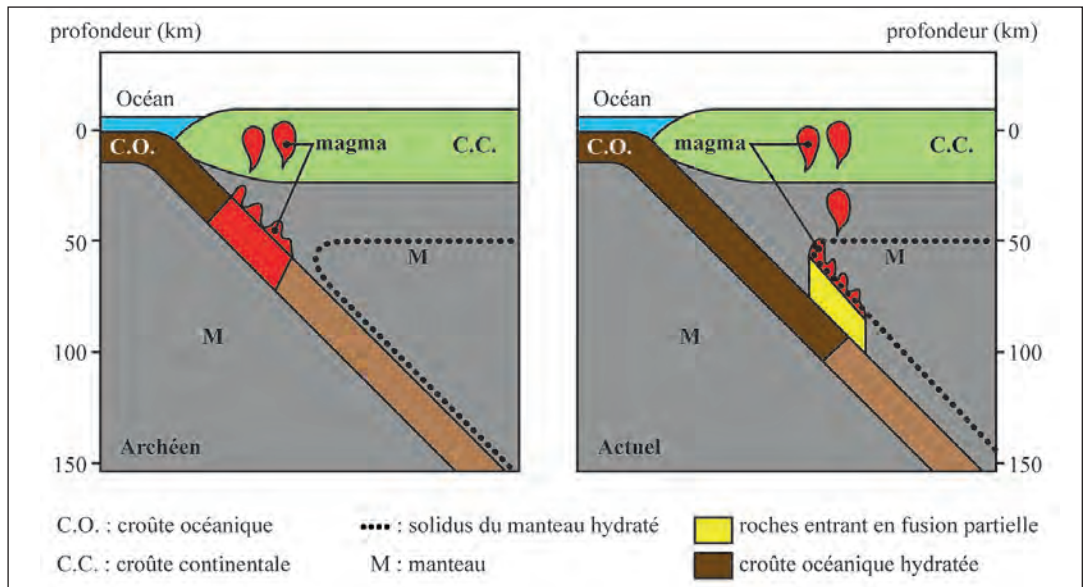
L'intitulé complet du sujet

À l'Archéen, période comprise entre - 4 et - 2,5 milliards d'années, la Terre, beaucoup plus chaude, était le siège d'une activité magmatique intense, qui a donné naissance à la majeure partie de la croûte continentale actuelle. Notre planète s'est ensuite progressivement refroidie, ce qui a entraîné des changements dans la source et dans les mécanismes de production de la croûte continentale.

Comparez les deux modèles de formation de la croûte continentale primitive et actuelle, au niveau d'une zone de subduction, puis discutez de la validité de chacun d'entre eux.

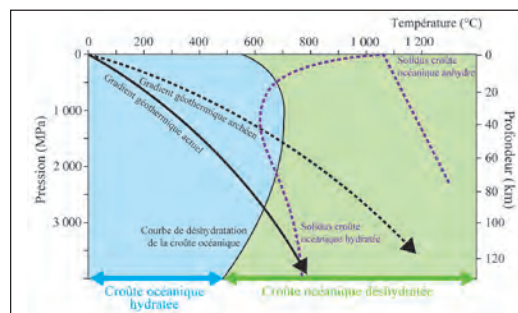
Les documents

Document 1 : Modèles de genèse de la croûte continentale archéenne et actuelle



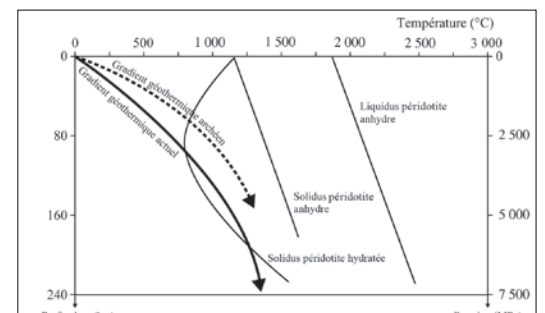
Source : d'après Hervé Martin et Jean-François Moyen, *Geology*, 2002

Document 2 : Conditions de fusion de la croûte océanique anhydre et hydratée et gradients géothermiques dans une zone de subduction actuelle et archéenne



Source : d'après Hervé Martin et Jean-François Moyen, *Geology*, 2002

Document 3 : Conditions de fusion d'une péridotite anhydre et hydratée et gradients géothermiques dans une zone de subduction actuelle



Source : d'après Hervé Martin et Jean-François Moyen, *Geology*, 2002

L'analyse du sujet

Le sujet présente deux modèles de formation de la croûte continentale au niveau des zones de subduction : l'un à l'Archéen (- 4 à - 2,5 Ga) pour la formation de la croûte continentale primitive, l'autre actuel à l'origine de la croûte continentale nouvellement formée. La question est clairement structurée en deux parties. Il s'agit d'abord de comparer les deux modèles de formation de la croûte continentale, puis de discuter de la validité de ces modèles à partir de l'étude des conditions de fusion des roches de la croûte océanique et des péridotites mantelliques au niveau des zones de subduction archéennes et actuelles.

La principale difficulté de ce sujet réside dans la lecture correcte des diagrammes pression-température pour déterminer les conditions de formation du magma à l'origine de la croûte continentale au niveau des zones de subduction.

Proposition de corrigé

La majeure partie de la croûte continentale se forme au niveau des zones de subduction, caractérisées par le plongement d'une lithosphère océanique dans l'asthénosphère. À l'Archéen (- 4 à - 2,5 Ga), la production de la croûte continentale, dite primitive, fut intense. Quels sont les modèles expliquant la formation des croûtes continentales primitive et actuelle ? Quelle est la validité de chacun de ces deux modèles ?

Pour répondre à ces problématiques, nous comparerons d'abord le modèle de formation de la croûte continentale à l'Archéen et celui de formation de la croûte continentale actuelle. Puis, nous déterminerons dans quelle mesure les conditions de fusion des roches de la croûte océanique et des péridotites mantelliques dans les zones de subduction passée et présente permettent de valider les modèles de formation de la croûte continentale.

D'après le modèle de formation de la croûte continentale à l'Archéen, les roches de la croûte océanique hydratée de la lithosphère plongeante entrent en fusion partielle à des profondeurs comprises entre 40 km et 70 km, permettant ainsi l'activité magmatique des zones de subduction (document 1). Selon le modèle actuel de formation de la croûte continentale, les péridotites hydratées du manteau situées sous

la croûte continentale de la plaque chevauchante entrent en fusion partielle lorsqu'elles sont localisées entre 60 km et 100 km, entraînant la formation de la croûte continentale (document 1).

À l'Archéen, l'intersection du gradient géothermique des zones de subduction avec le solidus de la croûte océanique hydratée montre l'existence d'une zone de fusion partielle entre 45 à 55 km de profondeur. À ces profondeurs, les roches de la croûte océanique sont encore hydratées, rendant possible leur fusion partielle. Au-delà de 55 km de profondeur, la déshydratation de ces roches empêche leur fusion partielle (document 2). À l'Archéen, le gradient géothermique croise le solidus de la péridotite hydratée vers 800 °C à 60 km (document 3). On sait que l'eau responsable de l'hydratation des péridotites peut provenir de la déshydratation de la croûte océanique sous-jacente. Or, avant d'atteindre 800 °C vers 60 km, les roches de la croûte océanique étaient déjà déshydratées à l'Archéen, ne pouvant plus céder d'eau aux péridotites sus-jacentes (document 2). Ainsi, la fusion partielle de ces péridotites demeurées anhydres n'était pas possible à l'Archéen.

Dans les zones de subduction actuelles, le gradient géothermique croise le solidus des péridotites hydratées vers 90 km de profondeur à une température de 800 °C, permettant la fusion partielle de ces péridotites dans ces conditions (document 3). De plus, le gradient géothermique actuel ne croise pas le solidus de la croûte océanique hydratée dans la zone où ces roches sont hydratées (document 2). La croûte océanique actuelle ne rentre donc pas en fusion partielle car sa température est trop faible. La croûte océanique reste donc hydratée jusqu'à au moins 90 km, profondeur à laquelle elle se déshydrate. L'eau de faible densité par rapport aux roches environnantes migre vers les péridotites du manteau sus-jacent, provoquant la fusion partielle de ces péridotites, qui forment un magma à l'origine des roches magmatiques de la croûte continentale.

Ainsi, les modèles de formation des croûtes continentales primitive et actuelle au niveau des zones de subduction sont validés. La croûte continentale primitive a pour origine la fusion partielle de la croûte océanique hydratée plongeante tandis que la croûte continentale actuelle est formée à partir de la fusion partielle des péridotites hydratées du manteau. Dans les deux modèles, l'hydratation de la croûte océanique plongeante permet la fusion partielle des roches, à l'origine de l'accrétion continentale. La dissipation de l'énergie géothermique au cours des temps géologiques est à l'origine des différences constatées entre les modèles de formation des croûtes continentales primitive et actuelle. ■

Ce qu'il ne faut pas faire

- Rédiger la réponse sans tenir compte des deux parties indiquées dans l'énoncé.
- Ne pas mettre en relation les documents 2 et 3 pour discuter de la validité des deux modèles proposés.

ZOOM SUR...

LES ÉRUPTIONS EXPLOSIVES

L'accumulation d'une forte pression dans la chambre magmatique d'un volcan dont les magmas sont visqueux peut déclencher une éruption explosive. Les nuées ardentes qui peuvent en résulter sont très destructrices, et le panache de cendres peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude.

QUELQUES ÉRUPTIONS MARQUANTES :

- le Vésuve en l'an 79 ;
- le Krakatoa en Indonésie en 1883 ;
- la montagne Pelée à la Martinique en 1902 ;
- le mont Saint Helens aux États-Unis en 1980 ;
- le Nevado del Ruiz en Colombie en 1985 ;
- le Pinatubo en 1991 aux Philippines ;
- le Merapi en 2010 en Indonésie.

UNE VILLE RAYÉE DE LA CARTE

Le 8 mai 1902 à la Martinique, la ville de Saint-Pierre disparaît en quelques minutes au cours de l'éruption explosive de la montagne Pelée. 28 000 victimes et seulement 2 survivants : un lourd bilan lié à la minimisation du danger par les autorités, malgré les signaux d'alerte. Fumerolles, explosions, tremblements de terre, panaches de vapeur et de cendres... sont autant de manifestations témoignant de l'imminence d'une éruption. Le 7 mai, le volcan est calme et une commission scientifique a déclaré qu'il n'y avait pas de risque.

Le terme « nuée ardente » a été introduit suite à l'éruption de la montagne Pelée.

Depuis, la surveillance des volcans, en particulier ceux des Antilles françaises, s'est développée autour d'observatoires volcanologiques. Mais dans différentes régions du globe, les recommandations de mesures préventives des scientifiques se sont souvent heurtées aux décisions politiques et aux intérêts économiques, avec des conséquences parfois dramatiques.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 1, synthèse sans documents :

– Montrer comment la transformation des roches, qui survient lors de la plongée de la lithosphère océanique, est à l'origine du magmatisme caractéristique des zones de subduction. Schémas attendus.

Partie 2.2 :

– Exploiter des documents pour montrer qu'une région correspond bien à une zone de subduction.

Un strato-volcan « gris » situé aux franges de la plaque caraïbe

Le volcanologue Maurice Krafft, qui avec sa femme Katia a péri dans l'explosion du mont Unzen au Japon le 3 juin 1991, les appelait « *volcan gris* ». Parce qu'ils émettent des roches et nuées, mais peu de lave liquide. Le volcan de Soufrière Hills de Montserrat fait partie de ces volcans explosifs, plus dangereux que leurs cousins effusifs « rouges » qui, à Hawaï par exemple, s'épanchent paisiblement en gerbes colorées. Une autre typologie rattache Soufrière Hills aux strato-volcans stromboliens, famille qui compte les redoutables monts Saint Helens, Pinatubo ou encore mont Unzen. Le volcan de Montserrat est cousin de nombre de « soufrières » (Guadeloupe, Sainte-Lucie, Saint-Vincent), sans que cette homonymie signifie pour autant qu'ils sont reliés souterrainement.

Ces strato-volcans sont constitués de couches successives de coulées de lave et de couches pyroclastiques formées de projections de blocs, de lapilli et de cendres. Ce type de volcans, aussi dit « *composites* », se trouve généralement le long des arcs de subduction : Soufrière Hills est issu, tout comme le chapelet des huit autres volcans des Antilles, de l'affrontement des plaques Pacifique et Atlantique, qui se rapprochent de quelques centi-

mètres par an et plongent sous la petite plaque Caraïbe, prise en tenaille. Aux franges de celle-ci, des poches magmatiques se constituent en profondeur. Ces roches visqueuses cherchent à s'évacuer en surface, contribuant au fil des éruptions qui se sont succédé ces derniers millions d'années à la formation des îles.

Les strato-volcans sont particulièrement redoutés. D'abord, parce qu'ils sont les plus nombreux (60 % du total) et que la terre fertile attire généralement à leur pied une vaste population. Ensuite, parce que l'empilement qui les caractérise est souvent fragilisé par les infiltrations d'eau, les tremblements de terre incessants et la poussée magmatique, qui favorisent les glissements de terrain, les coulées de boue et les avalanches. Ainsi, le flanc nord du mont Saint Helens s'est effondré durant les premières phases de l'éruption de 1980. En 1792, le même phénomène avait entraîné la formation d'un raz-de-marée meurtrier (15 000 victimes) au pied du mont Unzen. Des coulées de boue ont fait 23 000 morts au pied du Nevado del Ruiz, en Colombie, le 13 novembre 1985. En 1991, ces « lahars » qui ont dévalé les pentes du Pinatubo aux Philippines ont fait 200 victimes.

Montserrat risque-t-elle de tels cataclysmes ? La probabilité d'une destruction totale de l'île, similaire à celle causée en Indonésie par l'explosion du Krakatoa en 1883 (36 000 morts), paraît infime. Si un tel phénomène devait se produire, il serait, selon les spécialistes, annoncé par des signes avant-coureurs très clairs. Par ailleurs, le relief de l'île met sa partie nord à l'abri des coulées pyroclastiques, qui seront guidées dans des vallées dont la population a été évacuée. En revanche, les cendres et les « *bombes* » issues des explosions peuvent retomber sur l'ensemble de Montserrat.

Pour l'heure, le dernier communiqué de l'Observatoire du volcan de Montserrat (MVO) indiquait, lundi 18 août, que l'activité de Soufrière Hills reste d'un « *niveau élevé* » et est

caractérisée par des nuées, des secousses telluriques et des chutes de pierres continues. De fortes émissions de vapeur ont été observées sur le flanc nord du dôme, et de nouvelles explosions pourraient survenir « *avec ou sans signes avant-coureurs* », se traduisant par la chute de pierres et de cendres sur toute l'île, tandis que des coulées pyroclastiques sont attendues sur toutes les faces du volcan. Aussi l'Observatoire recommande-t-il à la population de se tenir prête à s'abriter à tout moment sous des abris ou des toitures solides, de disposer d'un casque et de porter des masques pour se protéger de la poussière. ■

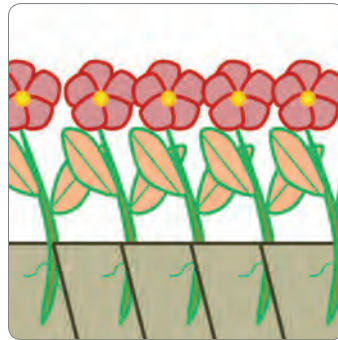
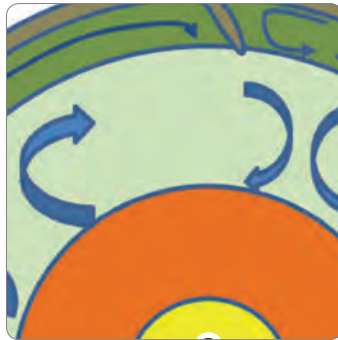
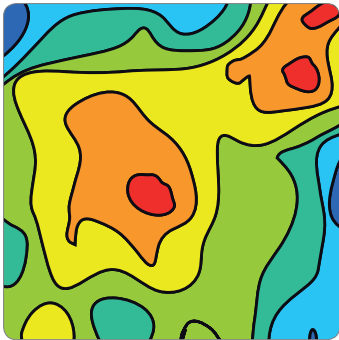
Hervé Morin
(20 août 1997)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article sur le volcan Soufrière Hills de Montserrat décrit les caractéristiques des volcans des zones de subduction et de leurs éruptions. Il permet de réaliser que l'édifice volcanique s'est constitué au

cours du temps par l'empilement successif de coulées de lave et de projections de blocs et de cendres, liées à l'activité magmatique. L'article précise les risques associés à ces « volcans gris », risques d'autant plus importants que leurs pentes fertiles attirent des populations humaines nombreuses.

ENJEUX PLANÉTAIRES CONTEMPORAINS



CHIFFRES CLÉS

En 2010, la France a consommé 266 Mtep (1 Mtep = 1 million de tonnes d'équivalent pétrole, soit l'énergie dégagée par un million de tonnes de pétrole). En quarante ans, la consommation énergétique de la France a presque doublé mais se stabilise depuis quelques années. Ses besoins énergétiques sont couverts par le pétrole (30,9 %), le charbon (4,1 %), le gaz naturel (15,0 %), l'électricité d'origine nucléaire (41,8 %) et l'ensemble des énergies renouvelables (8,2 %, énergies hydraulique, éolienne, photovoltaïque, géothermique, issue de la valorisation des déchets, etc.).

MOTS CLÉS

CONDUCTION

Transfert d'énergie thermique de proche en proche sans déplacement de matière sous l'effet d'une agitation des atomes.

CONVECTION

Transfert d'énergie thermique avec déplacement de matière sous l'effet de différences de densité et de température et qui constitue un mécanisme de transfert d'énergie efficace.

FLUX GÉOTHERMIQUE

Quantité d'énergie thermique dissipée par unité de surface terrestre et par unité de temps (unité : $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Le flux géothermique moyen est de l'ordre de $87 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$. En général, il est plus faible sur les continents ($\sim 65 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$) que sur les océans ($\sim 100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$).

GRADIENT THERMIQUE

Augmentation de la température avec la profondeur à l'intérieur du globe. Le gradient géothermique moyen est de l'ordre de $30^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$.

MACHINE THERMIQUE

La Terre produit de l'énergie sous forme de chaleur et la transfère par convection en la transformant en mouvement avant de l'évacuer par conduction.

Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

La grande majorité de l'énergie actuellement utilisée (agriculture, industrie, transport, etc.) provient soit de la combustion d'énergies fossiles, comme le pétrole ou le charbon, soit du nucléaire. Or, les énergies fossiles ne sont pas renouvelables et pourraient manquer dans l'avenir. De plus, leur combustion, en faisant augmenter le niveau de CO_2 dans l'atmosphère, est à l'origine d'un effet de serre entraînant une augmentation de la température terrestre. Avec l'énergie nucléaire se posent le problème de sa sûreté et celui de la gestion des déchets à long terme. Le développement durable s'intéresse à d'autres filières énergétiques, plus respectueuses de l'environnement et quasiment inépuisables pour l'homme, comme la géothermie. Où et comment est exploitée l'énergie géothermique et quelle est son origine ?

Flux et gradient géothermiques

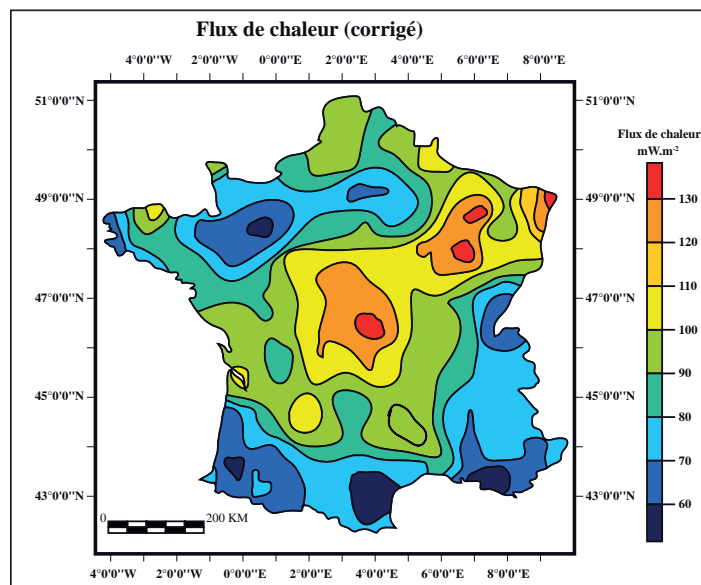
À la surface de la Terre, de nombreuses manifestations témoignent de l'existence de matériaux chauds en profondeur : éruptions volcaniques, sources chaudes hydrothermales, augmentation de la température dans les mines, etc. Des sources d'eau chaude, comme à Chaudes-Aigues dans le Massif central, sont utilisées depuis l'Antiquité, alors que les premières mesures de flux géothermique ont été réalisées, en France, dans les années 1960.

Le flux géothermique correspond au produit du gradient géothermique vertical par la conductivité thermique des roches. Le flux géothermique et le gradient géothermique sont mesurés sur chaque site d'étude, tandis que la conductivité thermique des roches est déterminée en laboratoire.

Les valeurs des gradients et des flux géothermiques varient selon le contexte géodynamique. En domaine océanique, les flux géothermiques sont élevés au niveau des dorsales océaniques, des points chauds (île de La Réunion, par exemple) et des arcs volcaniques ou cordillères liés à la subduction (Japon, Andes, Antilles, etc.). En domaine continental, les flux géothermiques sont forts au niveau des zones avec magmatisme (vallée du rift africain). De plus, des bassins sédimentaires ayant une croûte amincie présentent un flux géothermique élevé, tels les bassins d'effondrement de l'Alsace ou de la Limagne en France. Quelle est l'origine de cette énergie thermique observable en surface ?

L'origine de l'énergie géothermique et les transferts thermiques dans la Terre

L'énergie géothermique interne provient essentiellement de la désintégration des éléments radioactifs (uranium : ^{238}U et ^{235}U ;



Le flux géothermique en France (obtenu à partir de 479 mesures et complété par des mesures en mer et dans les pays limitrophes, d'après Lucazeau et Vasseur, 1989)

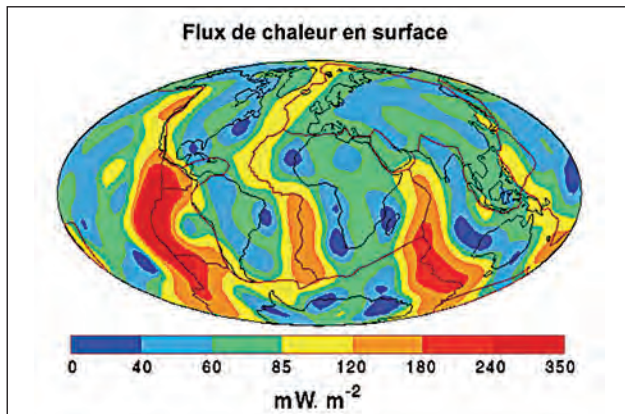
ZOOM SUR...

LE GRADIENT GÉOTHERMIQUE EN FRANCE

Le gradient géothermique peut être comparé en différents points du territoire français : à 1,5 km de profondeur, la température est de 70 °C dans le Bassin parisien, alors qu'elle est de 100 °C en Alsace. Dans les Antilles, au niveau de l'île de la Guadeloupe, la température est de 250 °C à 1 km de profondeur. Cette valeur élevée s'explique par la subduction affectant cette région.

LES EXPLOITATIONS GÉOTHERMIQUES EN FRANCE

La seule centrale géothermique de France métropolitaine, mise en service depuis 2008, est installée à Soultz-sous-Forêts, en Alsace, au niveau du fossé rhénan. En effet, le fossé rhénan présente le plus fort gradient géothermique de la métropole et est donc propice à l'installation d'une centrale géothermique. Cette centrale géothermique utilise la technique de la géothermie des roches fracturées : de l'eau froide est injectée à plus de 5 000 m de profondeur dans des roches fracturées. Cette eau se réchauffe au contact des roches. L'eau chaude est alors extraite à une température de 200 °C et est utilisée pour alimenter des turbines produisant de l'électricité. La Guadeloupe, située dans une zone de subduction, présente un fort flux géothermique. À la centrale géothermique de Bouillante, de la vapeur d'eau à 250 °C jaillit directement du forage et est utilisée pour alimenter des turbines et produire de l'électricité. L'exploitation géothermique basse énergie, servant notamment à chauffer des bâtiments, est localisée dans les bassins sédimentaires (Île-de-France, Aquitaine). Actuellement la géothermie représente environ 0,44 % de la couverture énergétique française, mais sa part dans l'approvisionnement énergétique français devrait augmenter dans les années à venir, comme les autres énergies renouvelables que sont l'éolien terrestre et en mer, et le photovoltaïque.



Le flux géothermique mondial

thorium : ^{232}Th ; potassium : ^{40}K) présents dans les roches des différentes enveloppes du globe.

L'énergie thermique produite dans la Terre est transférée dans le globe selon deux modalités : la **conduction** et la **convection**. L'efficacité du transfert thermique de la conduction dépend de la conductivité thermique des matériaux.

Ainsi au sein de la lithosphère et à l'interface noyau/manteau, l'énergie thermique est transférée par conduction. Par exemple, dans la croûte terrestre, le gradient géothermique moyen est de 30 °C.km^{-1} . La convection se met en place lorsqu'un matériau chaud et peu dense est situé sous un matériau plus froid et plus dense. Le matériau chaud et peu dense s'élève, tandis que le matériau froid et plus dense descend et se réchauffe à son tour. Ces mouvements de matière constituent des **cellules de convection** qui existent dans le manteau et le noyau. Le manteau est ainsi animé de mouvements lents de convection, qui entraînent le déplacement des plaques lithosphériques situées au-dessus. Le fort flux géothermique dans les dorsales s'ex-

plique par la remontée de matériel chaud et la production de lithosphère océanique nouvelle. Dans les **zones de subduction**, la faible valeur du flux géothermique moyen s'explique par le plongement de la lithosphère océanique âgée, froide et dense. Localement, dans les zones de subduction, le magmatisme lié à la remontée de matériel chaud est à l'origine d'un flux thermique élevé au niveau des arcs volcaniques ou des cordillères. Ainsi, la Terre est une **machine thermique**, dont la dissipation de l'énergie interne constitue le **moteur de la dynamique des plaques lithosphériques**.

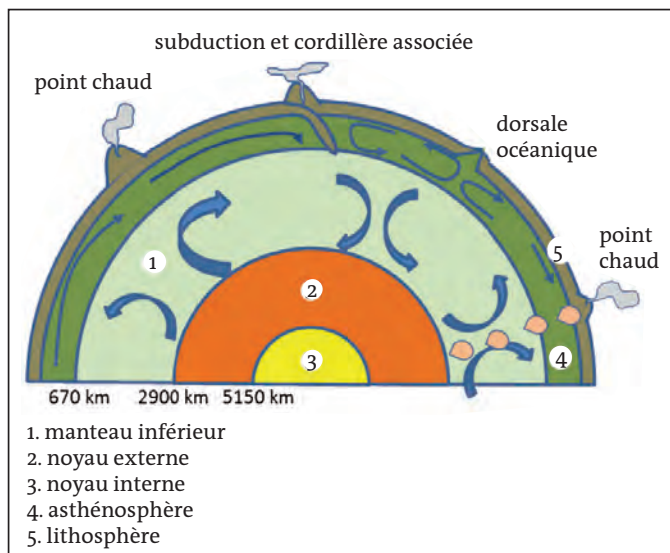
La géothermie : une source d'énergie au service du développement durable

L'énergie géothermique utilisée actuellement par l'homme couvre environ 1 % des besoins énergétiques mondiaux pour la **production d'électricité** et la **production de chaleur**. Le principe de la production de chaleur par géothermie consiste en la récupération de l'énergie thermique d'eaux profondes, naturellement présentes ou apportées par des conduites en profondeur. À travers le monde, environ 350 centrales géothermiques produisent de l'électricité. Ces centrales géothermiques sont en majorité implantées dans des zones de subduction (Japon, Nouvelle-Zélande, Antilles, etc.). D'autres centrales sont situées au niveau de dorsales océaniques (Islande, Açores), de fossés d'effondrement (Alsace, Kenya) ou de points chauds (Islande, Hawaï), mais également dans des régions stables du globe, comme les bassins sédimentaires (États-Unis, Chine, etc.).

Le prélèvement de l'énergie géothermique par l'homme ne représente qu'une **infime partie de l'énergie thermique dissipée** à la surface de la Terre. La géothermie constitue une source d'énergie inépuisable à l'échelle humaine, propre, écologique et économique. La géothermie est une source d'énergie au service du **développement durable**. La diversité des implantations géothermiques actuelles dans le monde montre l'importance de cette source d'énergie, que l'homme pourrait utiliser davantage qu'il ne le fait actuellement. ■

UN ARTICLE DU MONDE À CONSULTER

- **La France mise sur l'eau chaude pour s'éclairer** p. 59 (Pierre Le Hir, 17 mars 2013)



La convection dans le manteau (modèle à deux étages de cellules de convection)

ZOOM SUR...

LA TOMOGRAPHIE SISMIQUE

Il s'agit d'une technique permettant de cartographier l'intérieur de la Terre en étudiant la vitesse des ondes sismiques. La tomographie vise à corréliser les anomalies de vitesse des ondes sismiques avec des variations de composition chimique, d'état physique ou de température des différents milieux composant les enveloppes de la Terre. Une anomalie dite « négative » correspond, dans une région donnée, à une diminution de la vitesse des ondes sismiques. À l'inverse, une anomalie « positive » correspond à une augmentation de la vitesse de ces ondes. Dans une zone du globe terrestre où la minéralogie des roches est identique, une anomalie négative indique une zone moins dense, donc plus chaude. Une anomalie positive est interprétée comme l'existence d'une zone plus dense, donc plus froide. Ainsi la tomographie sismique permet d'accéder à la connaissance des caractéristiques des enveloppes internes de la Terre.

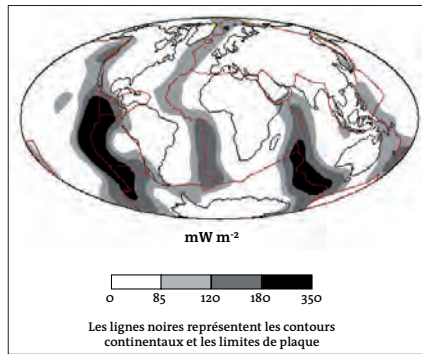
LA GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE

La géothermie domestique dite « très basse énergie » utilise des sources d'énergie thermique dont la température est de moins de 30 °C. Des pompes à chaleur permettent de puiser l'énergie thermique contenue dans les couches superficielles du sous-sol. Il est ainsi possible de chauffer et de produire de l'eau chaude pour des maisons individuelles ou des immeubles de petite taille. Cette géothermie domestique à très basse énergie n'utilise pas l'énergie géothermique d'origine interne mais la chaleur solaire emmagasinée par le sol et le sous-sol. La géothermie très basse énergie devrait se développer dans les années à venir avec l'amélioration des rendements des pompes à chaleur mises sur le marché.

Partie 1 : L'énergie géothermique

L'intitulé complet du sujet

Cochez la proposition exacte pour chaque question de 1 à 6.



Carte mondiale des flux thermiques exprimés en milliwatts par mètre carré (mW.m⁻²)

1. Les zones noires et en grisé visibles sur la carte représentent :

- a) un flux thermique élevé.
- b) un flux thermique faible.
- c) des différences de température océanique.
- d) des courants océaniques chauds.

2. Les zones de flux fort visibles sur la carte :

- a) sont liées à une plus forte énergie solaire arrivant à la surface de la Terre.
- b) sont liées à un volcanisme de point chaud.
- c) sont en relation avec des dorsales.
- d) sont liées à la présence des océans à la surface du globe.

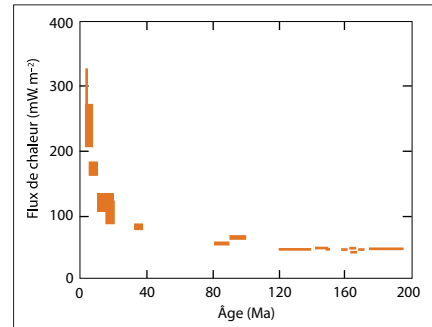
3. Les zones de flux fort sont associées :

- a) aux zones de subduction.
- b) à la création d'asthénosphère.
- c) à la création de lithosphère océanique.
- d) à la création de lithosphère continentale.

4. L'énergie géothermique exploitable par l'homme :

- a) est constante d'une région à l'autre.
- b) est maximale au niveau de la lithosphère continentale.
- c) est optimale en Islande au niveau d'un rift.
- d) contribue fortement à la couverture énergétique de l'humanité.

Le document ci-dessous représente le flux thermique au niveau du plancher océanique en fonction de son âge en millions d'années. Chaque boîte représente la variabilité des données dans la tranche d'âge considérée.



5. Le graphique montre que :

- a) le flux thermique du plancher océanique augmente lors de son vieillissement.
- b) le plancher océanique s'enfonce au fur et à mesure de son vieillissement.
- c) le plancher océanique se refroidit en vieillissant.
- d) le flux thermique est constant au niveau du plancher océanique.

6. On peut associer les zones du plancher océanique à flux thermique faible avec :

- a) une lithosphère sous-jacente plus fine et plus dense.
- b) une lithosphère sous-jacente plus épaisse et plus légère.
- c) une lithosphère sous-jacente plus fine et plus légère.
- d) une lithosphère sous-jacente plus épaisse et plus dense.

Le corrigé

1. a), 2. c), 3. c), 4. c), 5. c), 6. d) ■

Ce qu'il ne faut pas faire

- Cocher deux réponses ou ne cocher aucune réponse.
- Négliger les documents quand leur utilisation est nécessaire pour répondre à la question.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Maîtrise des connaissances avec question de synthèse :

– En vous appuyant sur quelques exemples, montrez que le flux et le gradient géothermiques varient en fonction du contexte géodynamique.

Étude de documents :

– Étude d'une région : relations entre flux et gradient géothermiques, données de la tomographie sismique, contexte géodynamique et possibilité d'exploitation géothermique.

La France mise sur l'eau chaude pour s'éclairer

Une vingtaine de projets de géothermie profonde attendent le feu vert du gouvernement pour débiter.

Les professionnels sont unanimes : « Ça bouge dans la géothermie. » Ils ne parlent pas des pompes à chaleur pour maisons individuelles ou bâtiments collectifs. Ni des réseaux de chaleur urbains, dont le Bassin parisien réunit la plus forte concentration au monde. Deux domaines où la France a acquis une expertise qui fait de cette ressource la troisième énergie renouvelable de l'Hexagone, après la biomasse et l'hydraulique. C'est de géothermie à haute température (150°C ou plus) qu'il est question. Celle qui va puiser dans les entrailles de la Terre, à plusieurs kilomètres de profondeur, les calories issues de la désintégration des éléments radioactifs présents dans la roche, pour produire de l'électricité ou de la chaleur.

Fin février, la ministre de l'écologie et de l'énergie, Delphine Batho, a signé deux nouveaux permis exclusifs de recherche : le premier, délivré à la société Electerre de France, dans la zone de Chaudes-Aigues-Coren (Cantal et Lozère), le second, attribué à Fonroche, dans le secteur de Pau-Tarbes (Pyrénées-Atlantiques et Hautes-Pyrénées). « Dix-huit demandes sont actuellement en cours d'instruction », indique le ministère. Quatre permis avaient déjà été accordés ces dernières années, l'un en Auvergne, les trois autres en Alsace. Et, depuis quelques jours, quatre autres, en Alsace également, sont soumis à la consultation du public, cette activité étant strictement encadrée par le code minier, le code de l'environnement et le code de la santé publique.

Cette effervescence pourrait marquer l'émergence d'une nouvelle filière énergétique. La géothermie à haute température a d'abord exploité les aquifères brûlants (jusqu'à 350°C) des régions volcaniques actives. C'est la raison pour laquelle elle s'est développée sur la Côte ouest des Etats-Unis, en Indonésie, aux Philippines, au Japon ou, sur le continent européen, en Italie et en Islande, avec une

capacité de production électrique totale de 11 000 mégawatts (MW). La France ne compte qu'une installation de ce type, en Guadeloupe, sur la commune bien nommée de Bouillante, où une centrale de 15 MW fournit 8 % de l'électricité de l'archipel.

Les industriels explorent aujourd'hui une voie différente, ouverte par un programme européen mené à Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin) et devenu une référence mondiale. Le principe consiste à pomper par un puits, à 5 000 mètres de profondeur, de l'eau à 200°C. En surface, un échangeur thermique la transforme en vapeur entraînant une turbine électrique, avec une cogénération possible de chaleur. L'eau, refroidie à 70°C est ensuite réinjectée, par un puits séparé, dans le sous-sol, où elle se réchauffe avant d'être pompée à nouveau.

Fonroche, qui a obtenu, à Pau-Tarbes, un permis sur une zone de 1 000 km², va ainsi forer jusqu'à 6 000 m, dans l'espoir de mettre en service, en 2016, une centrale de 5 MW électriques et 15 MW thermiques. Coût de ce démonstrateur : 80 millions d'euros, dont la moitié pourrait être financée par les « investissements d'avenir ». « La géothermie est la seule énergie renouvelable disponible en permanence, sans les intermittences du solaire ou de l'éolien », défend son directeur, Jean-Phi-

lippe Soulé. Cela, « à un coût avantageux pour la collectivité » et « en évitant le rejet de 60 000 tonnes de CO₂ par an pour une installation standard ». Selon lui, la France dispose d'un potentiel de 2 700 MW d'électricité géothermique, l'équivalent de trois réacteurs nucléaires.

Du fossé rhénan au Bassin aquitain, en passant par le Massif central ou le couloir rhodanien, le sous-sol français compte de vastes territoires propices à l'extraction de la chaleur profonde. « Il reste encore des verrous technologiques et économiques à lever, mais l'énergie géothermique a un fort potentiel de développement », est persuadé Romain Vernier, directeur du département géothermie du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). « Dans les territoires d'outre-mer, la géothermie à haute température peut permettre, en complément du solaire et de l'éolien, d'atteindre l'autonomie énergétique. En métropole, elle restera relativement marginale, mais la France doit mettre le paquet pour exporter sa technologie », ajoute Elsa Demangeon, du Syndicat des énergies renouvelables (SER). Celui-ci chiffre à plus d'une centaine les entreprises françaises du secteur et à 11 500 les emplois actuels, toutes formes de géothermies confondues.

Pour sortir de terre, la géothermie profonde doit toutefois réduire

son impact environnemental. Car les techniques mises en œuvre ne sont pas sans risques. La « stimulation » de la roche utilisée pour accroître les débits d'eau peut provoquer des milliers de microséismes. A Soultz-sous-Forêts, le plus fort, d'une magnitude de 2,9, a suscité de nombreuses plaintes des riverains. En Suisse, la ville de Bâle a renoncé à un forage à la suite d'une série de secousses qui avaient endommagé des bâtiments et semé la panique dans la population.

En outre, les eaux souterraines remontées à la surface sont chargées en sel (plus de 100 grammes par litre à Soultz) mais aussi en sulfures et en métaux lourds toxiques, comme l'arsenic ou le plomb, ainsi qu'en radioéléments. Il faut donc éviter, par des tubages multiples, que des fuites ne polluent les nappes phréatiques. De surcroît, certains fluides utilisés dans les échangeurs thermiques présentent un danger, comme l'isobutane, inflammable et explosif, ou l'ammoniac, toxique. Même si les industriels travaillent à des alternatives plus « douces », nul doute que la géothermie des grandes profondeurs sera placée, par les associations environnementales, sous haute surveillance. ■

Pierre Le Hir
(17 mars 2013)

POURQUOI CET ARTICLE ?

À l'heure actuelle, en France, la géothermie est exploitée pour le chauffage individuel ou collectif grâce à des pompes à chaleur et à des réseaux de chaleur urbains – ce qui en fait la troisième énergie renouvelable de notre pays. Cet article présente les projets actuellement en cours en France et portant sur la géothermie à haute température, c'est-à-dire à 150°C ou plus. Différente de celle exploitant les régions vol-

caniques actives, elle consiste à pomper de l'eau à 200°C à grande profondeur pour la transformer en vapeur, qui permettra la production d'électricité et éventuellement de chaleur. Après refroidissement, l'eau est renvoyée dans le sous-sol où elle se réchauffe et peut donc à nouveau être utilisée.

Cette technique permettrait de réaliser des économies non négligeables puisqu'elle pourrait produire autant d'électricité que trois réacteurs nucléaires.

De plus, cela limiterait les rejets de CO₂ dans l'atmosphère. Enfin, elle est réalisable dans de nombreuses régions françaises. Cependant, elle présente également plusieurs inconvénients : elle peut notamment provoquer des microséismes, et être source de pollution, du fait des substances toxiques utilisées. Cette technique est donc certes intéressante d'un point de vue économique mais elle fait encore l'objet de recherches pour limiter son impact environnemental.

NOTIONS CLÉS

DOMESTICATION

Processus de sélection par l'homme d'espèces végétales sauvages à l'origine des premières espèces cultivées.

GÉNIE GÉNÉTIQUE

Ensemble de techniques de modification du génome d'un être vivant sans intervention des moyens naturels de reproduction.

OGM

Organisme génétiquement modifié, dont le génome a été modifié par transgénèse, c'est-à-dire par l'insertion de matériel génétique exogène.

SÉLECTION ARTIFICIELLE

Choix effectué par l'homme des espèces à cultiver en fonction des caractères jugés intéressants pour lui et qui seront transmis à la descendance de ces espèces.

ZOOM SUR...

La révolution du Néolithique

À partir d'environ 9 000 avant J-C, d'abord en Orient puis en Occident, notamment dans le bassin méditerranéen, les populations connaissent un changement radical de leur mode de vie. Auparavant chasseurs-cueilleurs, ils deviennent des producteurs, pratiquant cultures et élevages. Des céréales et légumineuses sont sélectionnées et cultivées, et des animaux domestiques sont élevés : porc, bœuf, mouton, chèvre, sans oublier le chat, le chien et le cheval. La chasse et la cueillette restent toutefois pratiquées.

Cette transformation du mode de vie, qualifiée de « révolution », a de nombreuses conséquences : amélioration et diversification de l'alimentation, modification de l'habitat, de la vie culturelle et spirituelle, etc. Elle s'accompagne également du développement de la céramique. Le Néolithique prend fin avec le développement de la métallurgie et l'invention de l'écriture vers 3 300 avant J-C.

La plante domestiquée

La culture des plantes pour l'alimentation humaine mais aussi l'habillement, l'énergie, la médecine, etc., constitue un enjeu majeur pour l'humanité. Au Néolithique (12 000 à 4 000 environ avant J-C), la sédentarisation de l'homme s'est accompagnée d'une domestication des espèces végétales, qui s'est poursuivie depuis. Comment des plantes sauvages ont-elles été domestiquées par l'homme dans le passé ? Quelles méthodes l'homme utilise-t-il actuellement pour modifier les plantes qu'il cultive ?

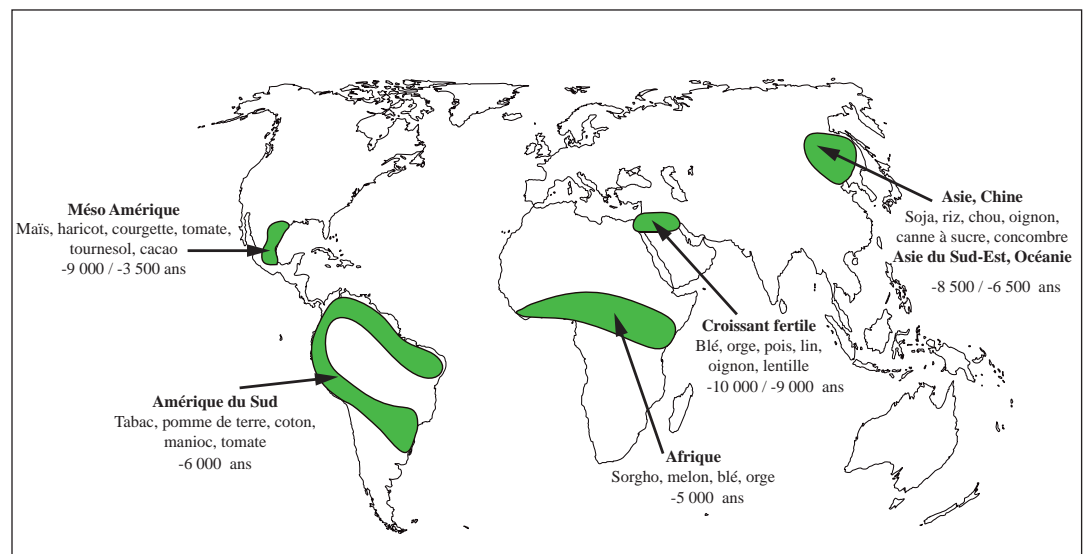
La domestication à l'origine des plantes cultivées

Les espèces végétales actuellement cultivées sont issues d'un processus de domestication d'espèces initialement sauvages qui s'est déroulé sur **plusieurs milliers d'années**, comme l'attestent les études archéologiques. La domestication consiste en une **sélection artificielle**, au cours de laquelle l'homme choisit des **caractères intéressants** pour la culture et l'utilisation de la plante. Ces caractères sont généralement contrôlés génétiquement et sont donc transmis à la descendance de la plante. Par exemple, les premiers agriculteurs ont sélectionné les grains de blé les plus lourds pour servir de semences à leurs cultures suivantes. Après plusieurs générations et sélections successives des grains les plus lourds, les grains produits ont une masse plus élevée que ceux initiaux. Les caractères des plantes favorables à leur utilisation par l'homme sont en général défavorables à la croissance de la plante en milieu sauvage.

Le croissant fertile (Moyen-Orient), l'Amérique centrale et l'Asie du Sud-Est sont les berceaux de la majorité des espèces végétales cultivées aujourd'hui dans le monde entier.

La sélection artificielle se poursuit après la domestication

Après domestication, la sélection artificielle se poursuit par différentes modalités : sélection des caractères intéressants, mais aussi hybridations (spontanées ou provoquées) entre deux espèces différentes, doublement spontané du nombre de chromosomes après hybridation, mutations spontanées, etc. Dans le passé, une espèce était souvent soumise à une **sélection variétale**, consistant à générer différentes variétés de cette même espèce. Chaque variété présentait alors des caractères propres, sélectionnés en fonction des conditions de cultures locales. L'existence de ces différentes variétés d'une même espèce végétale cultivée constitue une forme de **biodiversité**. Actuellement, la création de nouvelles variétés se



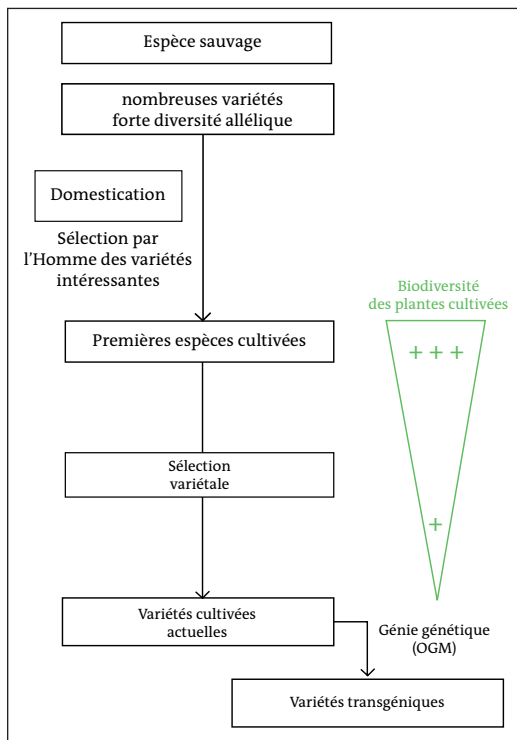
L'origine d'espèces végétales cultivées actuellement

poursuit. Ainsi, dans une espèce donnée, on peut conférer un caractère intéressant d'une variété dite « donneuse » à une autre variété dite « receveuse », qui, elle-même présente d'autres caractères intéressants. Pour cela, les deux variétés sont croisées, et les descendants du croisement présentant le caractère d'intérêt sont sélectionnés et croisés à nouveau avec la variété receveuse. Après répétition des étapes de croisement et de sélection, la variété receveuse présente le caractère d'intérêt, tout en ayant conservé ses autres caractères intéressants. Cette **amélioration variétale** est un long processus.

Les croisements peuvent aboutir à l'émergence d'une nouvelle espèce. Ainsi la clémentine est-elle un hybride entre la mandarine et l'orange douce.

La biodiversité des plantes cultivées

La biodiversité des plantes cultivées a, pendant longtemps, été assez importante. Mais depuis quelques dizaines d'années, la sélection des variétés les plus productives aboutit à la **culture d'un nombre réduit de variétés**. Or, cette réduction de la biodiversité peut avoir de graves conséquences. Par exemple, au début du XIX^e siècle, un champignon, le mildiou, s'attaqua aux plants de pommes de terre en Irlande et provoqua une immense famine. À la même époque, l'Europe fut touchée par une épidémie d'un insecte piqueur, le phylloxera, qui décima presque tous les ceps de vigne. Le vignoble français fut reconstruit à partir de greffes de cépages français sur des pieds de vignes américains naturellement résistants au phylloxera.



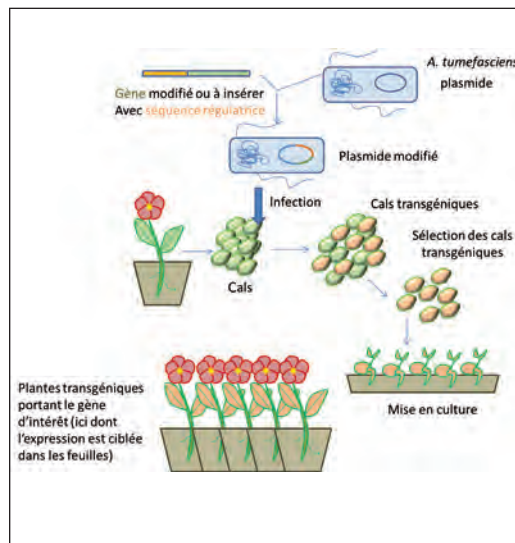
Évolution de la biodiversité des espèces cultivées

Il est toujours judicieux, comme le démontrent ces exemples, de **conserver des variétés végétales moins productives** mais susceptibles d'être porteuses de caractères pouvant se révéler intéressants, comme la résistance à des maladies.

Génie génétique et plantes cultivées

Le **génie génétique** permet de modifier le **génome** d'un être vivant. Les outils du génie génétique introduisent un gène d'intérêt dans le génome des cellules d'une plante : il s'agit d'un **transfert de gène** ou **transgénése**. La présence du gène transféré ou transgène confère à la plante de nouveaux caractères.

La plante ainsi modifiée est un **OGM** (organisme génétiquement modifié). Des OGM, comme le maïs transgénique résistant à des herbicides, sont cultivés dans plusieurs pays. Les avantages et les inconvénients des OGM sont encore largement débattus et sont sujets à controverse. ■



Principe du transfert biologique de gènes pour créer des organismes génétiquement modifiés (OGM)
Un cal est un amas de cellules végétales non différenciées pouvant générer *in vitro* une plante.

DEUX ARTICLES DU MONDE À CONSULTER

- **Les insectes survivent de mieux en mieux aux OGM** p. 63
(Stéphane Foucart, 13 juin 2013)
- **L'étude qui relance la polémique sur les OGM** p. 64
(Stéphane Foucart, 21 septembre 2012)

ZOOM SUR...

UN OGM : LE MAÏS Bt

Les végétaux peuvent être attaqués par une bactérie appelée *Agrobacterium tumefaciens*. Cette bactérie porte des petites molécules circulaires d'ADN, appelées plasmides Ti, qui sont distinctes du chromosome bactérien. À la faveur d'une blessure du végétal, la bactérie l'infecte et injecte ses plasmides Ti dans les cellules végétales. Les plasmides Ti sont alors capables de s'intégrer dans le génome des cellules de la plante. C'est ce système naturel de transfert de gène qui a été utilisé pour fabriquer les premiers OGM. Pour la construction de l'OGM, le plasmide Ti est modifié. Le gène responsable de la virulence de la bactérie est remplacé par le gène codant la toxine d'une autre bactérie appelée *Bacillus thuringiensis*. Cette protéine est toxique pour un insecte ravageur, la pyrale. Le plasmide Ti portant le gène d'intérêt (ici celui de la toxine de la bactérie *Bacillus thuringiensis*) est introduit dans des calus. Les calus sont des amas de cellules végétales indifférenciées obtenus *in vitro*. Seuls les calus ayant intégré le plasmide Ti dans leur génome sont sélectionnés et sont alors capables de générer des plantes entières de maïs dont toutes les cellules sont transgéniques. Ainsi, le maïs transgénique obtenu, appelé « Bt » (car produisant la toxine de *Bacillus thuringiensis*), a acquis un nouveau caractère : capable de synthétiser une molécule toxique pour la pyrale, il lui est devenu résistant.

UN OGM : LE SOJA TOLÉRANT À UN HERBICIDE

Plante transgénique la plus cultivée, cet OGM porte un gène d'origine bactérienne codant une protéine, l'enzyme EPSPS, qui permet la croissance de la plante en présence de l'herbicide. La plante possède une autre enzyme EPSPS végétale qui est bloquée par l'herbicide. Seules les plantes transgéniques ayant l'enzyme EPSPS microbienne poussent en présence de l'herbicide, mais pas les autres végétaux, comme les mauvaises herbes, ainsi éliminés par l'herbicide.

ZOOM SUR...

L'ORIGINE DES BLÉS CULTIVÉS

Actuellement, nous consommons du blé tendre, utilisé pour les farines de pain, de pâte à pizza, et du blé dur pour la semoule et les pâtes. Quelle est l'origine de ces deux blés ?

Il y a - 17 000 ans, a eu lieu une hybridation spontanée entre deux espèces sauvages de céréales : l'engrain sauvage (dont le génome comporte $2n = 14$ chromosomes) et un égilope inconnu mais proche de l'égilope faux épeautre actuel (comportant également $2n = 14$ chromosomes). Cette hybridation s'est accompagnée d'un doublement du nombre de chromosomes et a donné naissance à une nouvelle espèce : l'amidonnier sauvage, dont les cellules comportent $2n = 28$ chromosomes.

Au tout début du Néolithique, vers - 12 000 ans, l'homme a domestiqué cet amidonnier sauvage. Puis, il a continué de sélectionner des phénotypes de l'amidonnier intéressants pour sa culture. Les caractères de l'amidonnier cultivé ont ainsi été peu à peu modifiés pour donner, il y a environ - 2 000 ans, le blé dur, dont le génome comporte $2n = 28$ chromosomes. D'autre part, vers - 9 000 ans, une hybridation a eu lieu entre l'amidonnier cultivé et l'égilope rugueux (espèce à $2n = 14$ chromosomes), suivie d'un doublement du nombre de chromosomes, qui a abouti à la formation d'une nouvelle espèce : le blé tendre, dont le génome comporte $2n = 42$ chromosomes.

L'ORIGINE DU MAÏS

Le maïs, originaire du Mexique, est issu d'une domestication, datée vers - 7 000 ans, d'une espèce ancestrale, proche d'une espèce sauvage actuelle : la téosinte. Suite à cette domestication, les populations amérindiennes ont procédé à une sélection variétale générant plusieurs variétés adaptées localement. Introduite en Europe au XIX^e siècle, le maïs est une des céréales les plus produites au monde, avec le blé et le riz.

Partie 2.1 : Un OGM riche en précurseurs de vitamine

Les documents

La carence¹ en vitamine A affecte, d'après l'Organisation mondiale de la santé (OMS), entre 100 et 200 millions d'enfants. Cette carence est responsable de graves troubles oculaires, de cécité infantile et du décès de plus d'un million d'enfants chaque année. Or, les tentatives de diversification nutritionnelle ou de suppléments en vitamines atteignent difficilement toutes les personnes concernées. Des chercheurs ont donc travaillé sur l'enrichissement en vitamine A (ou en précurseurs de vitamine A) de certains aliments de base dans certains régimes alimentaires. Ils ont ainsi mis au point un riz transgénique appelé « riz doré ».

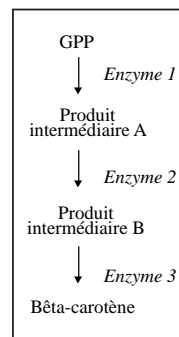
Document 1 : Particularités du riz doré

« Le bêta-carotène qui, une fois assimilé dans le corps humain, se transforme en vitamine A existe naturellement dans l'enveloppe du riz mais pas dans sa partie comestible, c'est-à-dire l'albumen. L'enveloppe du riz étant éliminée de manière à améliorer sa conservation, les grains consommés ne contiennent plus de bêta-carotène. Par l'introduction de trois gènes dans du riz, des chercheurs allemands ont réussi à restaurer dans l'albumen une voie de biosynthèse du bêta-carotène à partir de son précurseur : le GPP. Le bêta-carotène alors synthétisé colore les grains en jaune, d'où le surnom de « riz doré ». Cependant, les teneurs obtenues jusqu'à présent ne fourniraient pas aux populations démunies en vitamine A les quantités de bêta-carotène qui leur seraient nécessaires. Mais les effets de carences plus ou moins prononcés pourraient être sensiblement allégés. Le génome du riz doré contient trois gènes codant pour la synthèse d'enzymes impliquées dans la chaîne de biosynthèse du bêta-carotène à partir du GPP à savoir : deux gènes de jonquille, qui permettent la fabrication des enzymes 1 et 2 ; un gène de bactérie, qui permet la fabrication de l'enzyme 3. »

Source : www.maison-des-sciences.ac-versailleurs.fr/docs/OGM.pdf

1. apport insuffisant voire manquant

Document 2 : Incertitudes scientifiques autour du riz doré



La chaîne de biosynthèse du bêta-carotène

Le GPP, naturellement présent dans le riz, permet à la cellule de fabriquer un certain nombre de molécules, dont la vitamine E, des chlorophylles et de l'acide gibbérélique (substance favorisant la croissance végétale). La fraction du GPP, qui dans le riz doré sera utilisée pour fabriquer du bêta-

carotène, ne sera plus disponible pour la synthèse des autres molécules dont il est également le précurseur. Autrement dit, il est probable que le riz doré, qui fabrique du bêta-carotène, fabrique moins de vitamine E, et que les rendements obtenus avec ce riz transgénique soient nettement diminués en raison d'une synthèse amoindrie de chlorophylles et d'acide gibbérélique.

Les questions

1. Le bêta-carotène, contenu notamment dans le riz doré :

- permet de pallier les carences en GPP.
- empêche la synthèse de la vitamine E de l'individu qui ingère du riz doré.
- permet de pallier à 100 % les carences en vitamines A.
- se transforme en vitamine A chez la personne qui ingère du riz doré.

2. Le riz doré est issu d'une transgénèse de trois gènes codant pour la synthèse :

- de la vitamine A du riz dans le génome d'une bactérie.
- des enzymes permettant la production du bêta-carotène.
- de la vitamine A d'une jonquille dans le génome du riz.
- des enzymes activant la voie de la biosynthèse de la vitamine A.

3. La fabrication du riz doré transgénique a été faite pour :

- pallier les problèmes liés à l'utilisation de pesticides.
- améliorer le rendement des rizicultures pour nourrir certaines populations humaines.
- diminuer les effets d'une carence alimentaire touchant certaines populations humaines.
- éviter l'apport massif d'engrais dans les cultures.

4. D'après certains scientifiques, la modification génétique du riz aboutissant à des plants de riz doré pourrait entraîner une production :

- moindre du fait d'un rendement végétal diminué.
- accrue de vitamine E par la plante.
- de plantes plus riches en pigments chlorophylliens.
- de plantes plus résistantes aux parasites.

Le corrigé

1. d), 2. b), 3. c), 4. a). ■

Ce qu'il ne faut pas faire

- Cocher deux réponses, ou ne cocher aucune réponse.
- Négliger les informations apportées par les documents.

Les insectes survivent de mieux en mieux aux OGM

Cinq espèces de coléoptères et de lépidoptères ont développé, surtout aux Etats-Unis, des résistances aux plantes transgéniques insecticides.

La théorie de l'évolution fonctionne à merveille. Face à l'augmentation du nombre de surfaces de cultures transgéniques, modifiées pour sécréter des toxines insecticides Bt (*Bacillus thuringiensis*), coléoptères et lépidoptères développent mécaniquement toujours plus de résistances. C'est le principal constat d'une synthèse de la littérature scientifique, publiée le 10 juin dans la revue *Nature Biotechnology* qui soulève la question des précautions à prendre avec ces cultures. Selon ces travaux, conduits par Bruce Tabashnik (université d'Arizona à Tucson, Etats-Unis) des résistances à des toxines Bt sont établies pour cinq des treize grandes espèces d'insectes ravageurs ciblés par ces végétaux modifiés, à l'instar de la chrysomèle du maïs, un coléoptère. En 2005, voilà moins d'une décennie, seule une espèce était, localement, parvenue à s'adapter à ces cultures. L'émergence accélérée de ces résistances cadre avec la forte augmentation des surfaces cultivées de maïs et de coton Bt. En 2011,

celles-ci représentaient au niveau mondial environ 66 millions d'hectare, soit près de soixante fois plus qu'en 1996. Les Etats-Unis, qui représentent la moitié des superficies mondiales de cultures Bt, hébergent trois des cinq espèces ayant développé des résistances. Les auteurs ont passé en revue 77 études documentant l'apparition de ces résistances dans huit pays et, surtout, les conditions dans lesquelles celles-ci surviennent. « L'objectif était d'expliquer pourquoi la résistance a évolué très rapidement dans certains cas et pas dans d'autres », explique l'entomologue Yves Carrière (université d'Arizona), coauteur de ces travaux. Dans des situations comparables, les populations de nuisibles peuvent en effet s'adapter en deux à trois ans ou, au contraire, demeurer vulnérables après quinze ans de cultures Bt.

Pourquoi ? Les auteurs montrent toute l'importance de planter, autour des champs Bt, des surfaces « refuges » de cultures conventionnelles. Dans ces zones exemptes de toxines, les insectes non résistants

peuvent prospérer et se reproduire avec ceux qui le sont devenus : c'est une sorte de « dilution génétique » de la résistance.

« Il faut adapter cette politique de refuge, notamment en fonction de la situation locale », explique Denis Bourguet, chercheur à l'Institut national de recherche agronomique (INRA). Par exemple, selon la fréquence de gènes de résistance à la toxine Bt déjà présents dans les populations d'insectes, avant même l'implantation d'une culture Bt. »

Une faible proportion de ravageurs possède naturellement un gène de résistance. C'est lorsque ce gène, par le biais de la sélection naturelle, devient présent chez la moitié des individus au moins qu'on parle de population devenue résistante. L'étendue des surfaces refuges doit être adaptée à cette proportion initiale. Un autre paramètre entre également en ligne de compte : moins la plante transgénique est efficace, plus les refuges doivent être étendus.

Dans certains pays, comme la Chine, les refuges ne sont pas obligatoires. Une situation qui rend

non durable le bénéfice procuré par les cultures Bt. « Ailleurs, en Australie par exemple, cette politique a été menée avec succès avec, initialement, l'obligation de maintenir 70 % de zones refuges dans les cultures Bt », dit M. Bourguet. Pour gérer l'apparition des résistances, les chercheurs notent l'utilisation accrue de plantes transgéniques sécrétant deux toxines Bt (dites « pyramides »), et non plus une seule. Mais là encore, les chercheurs recommandent certaines bonnes pratiques.

« L'efficacité des « pyramides » est réduite dans le cas où les plantes à deux toxines sont cultivées en même temps que des plantes n'en produisant qu'une seule des deux, ou lorsque les insectes ont déjà acquis une résistance », explique Thierry Brévault, chercheur au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) et coauteur de l'étude.

Paradoxe : l'apparition de populations résistantes oblige les agriculteurs à employer davantage d'insecticides utilisés en pulvérisation. Une sorte de retour à la case départ. « C'est cet indicateur qui a permis de déceler dans certaines régions des Etats-Unis, une perte d'efficacité du coton Bt vis-à-vis d'une espèce de chenille devenue résistante aux plantes produisant deux toxines Bt », dit M. Brévault. Les cultures Bt ont jusqu'à présent permis de limiter l'épandage d'insecticides chimiques. L'agronome Charles Benbrook (Washington State University) estime que ces cultures ont en « économisé » 56 000 tonnes, aux Etats-Unis, entre 1996 et 2011. Mais jusqu'à quand ? ■

Stéphane Foucart
(13 juin 2013)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article a la particularité de se rapporter à la fois au chapitre sur la plante domestiquée, car il traite des OGM, et au chapitre sur l'évolution et la sélection naturelle. Depuis une vingtaine d'années, des cultures transgéniques, principalement de maïs et de coton, sécrétant des toxines insecticides Bt (*Bacillus thuringiensis*), sont réalisées à grande échelle. Ces OGM permettent à l'agriculteur de limiter le recours à des insecticides.

Aujourd'hui, on sait que près de la moitié des insectes ravageurs ciblés par ces OGM ont développé une résistance, d'autant plus que les surfaces cultivées avec ces OGM augmentent.

L'intérêt d'utiliser ces OGM « insecticides » diminue donc avec l'augmentation de la résistance à la toxine Bt et oblige les agriculteurs à pulvériser des insecticides.

Une solution pour ralentir l'apparition des résistances est de cultiver des surfaces dites « refuges » sans OGM. Cela per-

mettrait de limiter la sélection naturelle des insectes devenus résistants puisque ces derniers pourraient se reproduire avec des insectes non résistants. Une 2e solution consiste à utiliser des OGM produisant deux toxines Bt maïs, là encore, des insectes développent des résistances. Les cultures de ces OGM « insecticides » avaient permis de limiter l'utilisation des pesticides, mais cette « économie » semble de plus en plus compromise par l'apparition de ces insectes résistants

L'étude qui relance la polémique sur les OGM

Des travaux concluent à un lien entre la consommation du maïs NK 603 et l'apparition de tumeurs chez le rat.

Tumeurs mammaires chez les femelles, troubles hépatiques et rénaux chez les mâles, espérance de vie réduite... L'étude conduite par le biologiste Gilles-Éric Séralini (université de Caen) et parue dans la revue *Food and Chemical Toxicology* a déclenché une formidable tempête médiatique. De fait, elle est la première à suggérer des effets délétères, sur le rat, de la consommation d'un maïs génétiquement modifié – le NK603 de Monsanto –, associé ou non au Roundup, l'herbicide auquel il est rendu tolérant.

La démonstration est-elle faite que cet OGM est toxique ? Voir. La même édition de *Food and Chemical Toxicology* publie aussi une étude conduite par Yaxi Zhu (université d'agriculture de Chine, à Pékin), évaluant la toxicité d'un maïs résistant au même herbicide, sur la même souche de rongeurs... mais sans détecter de problème.

L'originalité des travaux de M. Séralini et ses coauteurs est d'avoir mis en place un protocole expérimental très ambitieux. Les chercheurs ont utilisé un total de 200 rats pendant deux ans, contre trois mois en général pour ce type d'expérience. Ils ont évalué les effets d'un régime alimentaire composé de trois doses différentes du maïs transgénique (11 %, 22 % et 33 %), cultivé ou non avec son herbicide compagnon. Trois groupes ont également été testés avec des doses croissantes du produit phytosanitaire seul, non associé à l'OGM.

Au total, donc, ce sont neuf groupes de vingt rats (trois groupes avec OGM, trois groupes avec OGM et Roundup, trois groupes avec Roundup) qui ont été comparés à un groupe témoin de même taille, nourri avec la variété de maïs non transgénique la plus proche de l'OGM testé, et sans exposition à l'herbicide.

Sur l'ensemble des groupes traités, les différences les plus significatives avec le groupe témoin apparaissent

au bout d'environ un an. Chez les mâles, les congestions et les nécroses du foie sont 2,5 fois à 5,5 fois plus fréquentes. Ces derniers souffraient également 1,3 fois à 2,3 fois plus d'atteintes rénales sévères. Les tumeurs mammaires ont été également plus fréquemment observées dans les groupes traités – mais pas toujours de manière significative. Quant à la mortalité, elle a également été accrue dans l'ensemble des groupes traités. Dans le groupe témoin, la durée de vie des mâles a été en moyenne de six cent vingt-quatre jours, et de sept cents jours pour les femelles. « *Après que la période moyenne de survie s'est écoulée, toute mort a été largement considérée comme due au vieillissement*, écrivent les auteurs. *Avant cette période, 30 % des mâles et 20 % des femelles du groupe témoin sont morts spontanément, alors que jusqu'à 50 % des mâles et 70 % des femelles sont mortes prématurément dans des groupes nourris avec l'OGM.* »

« *Attention : tous les groupes d'animaux ne sont comparés qu'à un groupe témoin de dix animaux du même sexe*, explique le biostatisticien Marc Lavielle (Inria). *Il aurait suffi qu'un ou deux rongeurs du groupe témoin meurent prématurément de manière aléatoire pour que la différence disparaisse ou ne soit plus significative. Statistiquement, tout cela est très fragile.* »

M. Séralini et ses coauteurs notent que les groupes d'animaux exposés à l'herbicide seul, de même qu'à l'OGM seul, sont affectés par les diverses pathologies relevées. Selon eux, l'herbicide pourrait se comporter comme un perturbateur du système hormonal et produire ainsi des effets non proportionnels à la dose reçue.

Quant à l'OGM seul, sa toxicité éventuelle pourrait provenir de la modification d'une enzyme (dite « *ESPS synthase* ») produite par la plante et impliquée dans la synthèse d'acides aminés ayant un effet de protection

contre la cancérogénèse. Le fait que la synthèse de ces acides aminés soit réduite pourrait expliquer, selon les auteurs, les pathologies les plus fréquemment observées chez les rats testés. Un mécanisme très spéculatif.

« *Il faudra que les auteurs répondent à quelques questions qui ne sont pas détaillées dans leur article, pointe un spécialiste qui a requis l'anonymat. Comme par exemple le protocole d'application du maïs traité, ou encore l'historique de l'élevage dont proviennent les rats, etc.* »

La souche utilisée – dite de « *Sprague-Dawley* », la plus couramment employée dans ce type d'expérience – est en effet connue pour contracter des cancers mammaires de manière fréquente. Des travaux publiés en novembre 1973 dans *Cancer Research* ont ainsi montré que l'incidence de cette pathologie peut atteindre 45 % chez ces rongeurs, en l'absence de toute intervention.

« *Je regrette la médiatisation excessive de ces données scientifiques, qui méritent le temps de l'analyse* », estime pour sa part le médecin et biochimiste Jean-Christophe Pagès, membre du Haut Conseil des biotechnologies (HCB) et professeur à l'université François-Rabelais de Tours.

La prudence est d'autant plus de mise que de nombreuses études

de toxicologie ont été menées pour différents OGM et sur différentes espèces, sans montrer d'effets délétères entre les animaux témoins et ceux nourris avec les végétaux modifiés.

Cependant, la plupart de ces travaux, rassemblés dans une analyse conduite par Chelsea Snell (université de Nottingham, Royaume-Uni) et publiée en janvier dans *Food and Chemical Toxicology*, ont été menés sur des durées inférieures à deux ans et avec un plus faible nombre de paramètres contrôlés. Avec des financements souvent industriels. Quant aux quelques études de longue durée déjà menées, elles ne montrent pas non plus d'effets biologiques notables, mais ne concernent pas le maïs NK603.

Les travaux de M. Séralini – dont le budget est selon lui de plus de 3 millions d'euros – ont été financés par la Fondation Charles-Léopold Mayer, par l'association Ceres (qui rassemble notamment des entreprises de la grande distribution), le ministère français de la Recherche et le Criigen (Comité de recherche et d'information indépendantes sur le génie génétique), association qui milite contre les biotechnologies. ■

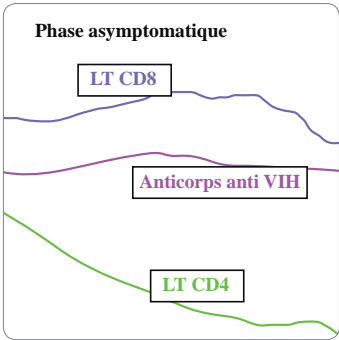
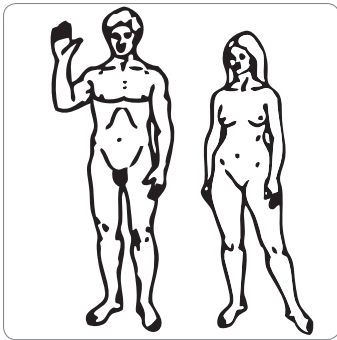
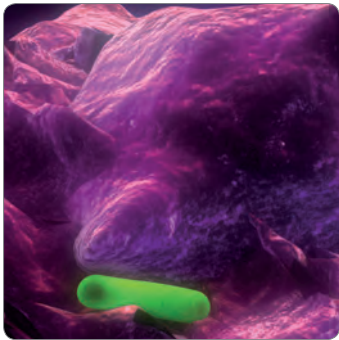
Stéphane Foucart
(21 septembre 2012)

POURQUOI CET ARTICLE ?

L'article présente l'étude portant sur la toxicité du maïs OGM, effectuée par l'équipe française du professeur Séralini, parue en septembre 2012 et fortement médiatisée. Conduite pendant deux années sur des rats, cette étude conclut que le maïs transgénique est toxique, entraînant la formation de tumeurs à l'origine d'une mortalité accrue de ces rongeurs. Cette étude est inté-

ressante car elle porte sur une longue période de temps alors que les études de toxicité des OGM sont d'habitude limitées à 6 mois. Mais les instances ayant expertisé l'étude de M. Séralini ont conclu que le nombre d'animaux étudiés par lot n'était pas suffisant pour soutenir les conclusions avancées. La reproduction de l'étude de l'équipe du professeur Séralini dans des conditions plus rigoureuses pourrait permettre d'avancer dans ce débat très animé.

LE MAINTIEN DE L'INTÉGRITÉ DE L'ORGANISME : QUELQUES ASPECTS DE LA RÉACTION IMMUNITAIRE



NOTIONS CLÉS

IMMUNITÉ INNÉE

Ensemble des défenses de l'organisme existant dès la naissance, ne nécessitant pas d'apprentissage et qui se mettent en place très rapidement dans des situations diverses.

INFLAMMATION

Ensemble des réactions se produisant au niveau d'une lésion de l'organisme, où des éléments pathogènes peuvent se trouver.

PHAGOCYTOSE

Mécanisme assurant l'ingestion par les cellules phagocytaires de particules ou de cellules à l'intérieur de vésicules, les phagosomes, en vue de leur élimination.

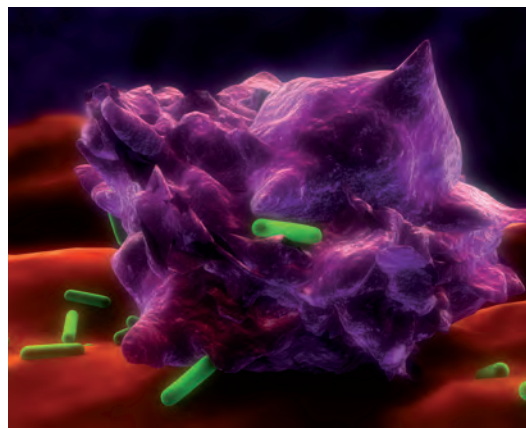
REPÈRE

Les différentes cellules sanguines

- Les hématies, ou globules rouges, sont des cellules sans noyau, biconcaves et aplaties au centre. Elles assurent le transport de dioxygène dans le sang.
- Les leucocytes, ou globules blancs, interviennent dans la défense immunitaire de l'organisme :
 - les granulocytes (également appelés « polynucléaires ») ont une activité antibactérienne (diapédèse, chimiotactisme et phagocytose) ;
 - les cellules dendritiques sont présentes dans tous les tissus et en faible quantité dans le sang. Dans les tissus, elles détectent les agents pathogènes et déclenchent la réaction immunitaire adaptative ;
 - les monocytes se différencient en macrophages dans les tissus et réalisent alors la phagocytose et la présentation de l'antigène aux autres cellules immunitaires ;
 - les lymphocytes participent à la réponse immunitaire adaptative. Les lymphocytes T sont produits dans la moelle osseuse et subissent leur maturation dans le thymus, tandis que les lymphocytes B naissent puis mûrissent dans la moelle osseuse.
- Les plaquettes sont des fragments cellulaires qui interviennent dans la coagulation du sang.

La réaction inflammatoire, un exemple de réponse innée

L'organisme humain est pourvu d'un système de protection contre les éléments pathogènes qui menacent son intégrité. Ces éléments pathogènes peuvent être des virus, des bactéries, des eucaryotes, des parties d'êtres vivants (pollens, poils, etc.), des éléments physico-chimiques (fibres d'amiante, poussières, etc.) ou encore les propres cellules modifiées de l'organisme, comme les cellules cancéreuses. Ces éléments pathogènes sont potentiellement dangereux pour l'organisme et le système immunitaire est chargé du maintien de l'intégrité de ce dernier. Comment le système immunitaire protège-t-il l'organisme des éléments pathogènes ?



Les défenses de l'organisme contre l'intrusion des pathogènes

Nous possédons des **défenses physiques**, comme l'imperméabilité de notre épiderme et de nos muqueuses. Ces défenses sont complétées par des **défenses chimiques** (larmes, sueur, mucus) et **microbiologiques** (flore bactérienne, présente naturellement sur et dans notre corps). Malgré tout, à la faveur d'une blessure, d'une morsure ou d'une piqûre, des **pathogènes** peuvent pénétrer dans notre organisme. Une seconde ligne de défense est alors opérationnelle pour les neutraliser. Cette défense, l'**immunité innée**, se caractérise par la mise en place de la **réaction inflammatoire aiguë**. Cette réaction inflammatoire aiguë est **stéréotypée** : elle se déroule de la même façon, quel que soit l'agresseur, et se met en place dès son entrée, que l'agresseur soit connu ou non de l'organisme.

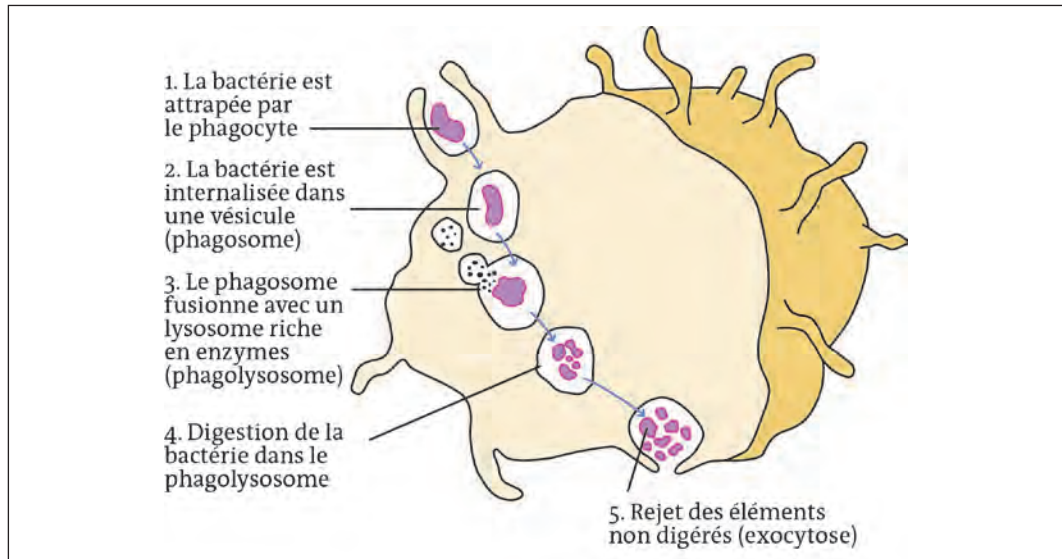
La réaction inflammatoire aiguë

Dans les tissus, des cellules comme les mastocytes, les macrophages, les cellules dendritiques sont présentes, en attente d'une rencontre éventuelle avec un pathogène. Ces cellules font partie des leucocytes (ou globules blancs) : ce sont des cellules sentinelles. Les pathogènes sont détectés par les récepteurs PRR à la surface de ces leucocytes. La détection de ces agents infectieux entraîne la sécrétion des **médiateurs chimiques de l'inflammation** par ces leucocytes. Il existe différents médiateurs chimiques de l'inflammation, comme l'histamine, la sérotonine, les cytokines pro-inflammatoires (IL-1, IL-6, TNF- α , etc.) et les éicosanoïdes (molécules dont font partie les prostaglandines, le thromboxane, la prostacycline et les leucotriènes). Ces médiateurs chimiques de l'inflammation activent la vasodilatation des capillaires. Ce qui entraîne une augmentation du flux sanguin irriguant le site inflammatoire. Les cellules des parois des capillaires s'écartent, facilitant le passage des leucocytes du sang vers les tissus, mais aussi du plasma : cela induit **chaleur, rougeur et gonflement**. La stimulation des terminaisons nerveuses voisines provoque une sensation de **douleur**.

Les leucocytes attirés sur le site inflammatoire éliminent différemment les pathogènes. Les granulocytes, les cellules dendritiques et les monocytes transformés en macrophages à leur arrivée dans les tissus réalisent la **phagocytose** du pathogène. La phagocytose est l'ingestion et l'élimination d'éléments considérés comme étrangers par les cellules phagocytaires. La phagocytose nécessite

la reconnaissance du pathogène par des récepteurs membranaires des cellules phagocytaires (récepteurs PRR). La membrane du phagocyte se déforme et emprisonne le pathogène dans une vésicule, appelée « phagosome ». Cette vésicule fusionne avec des lysosomes, vésicules cytoplas-

provenant du pathogène détruit, associés aux récepteurs du phagocyte, sont alors présentés à des lymphocytes T, déclenchant ainsi la **réponse immunitaire adaptative**, spécifique de l'agent infectieux.



La phagocytose (d'après *Immunologie : le cours de Janis Kuby*)

miques à contenu acide et riches en enzymes. Les enzymes contenues initialement dans les lysosomes digèrent le pathogène. Ainsi la réaction inflammatoire aiguë constitue la première ligne de défense active du système immunitaire qui vise à éliminer les pathogènes dès leur entrée dans l'organisme.

La réaction inflammatoire aiguë peut produire des effets gênants (douleur, gonflement, fièvre) voire délétères pour certains organes si elle se prolonge trop longtemps. Il peut être nécessaire d'utiliser des médicaments qui limitent cette réaction inflammatoire sans limiter le déclenchement des réactions immunitaires détruisant les pathogènes. Il s'agit de médicaments anti-inflammatoires comme par exemple l'aspirine ou l'ibuprofène. Les anti-inflammatoires inhibent la synthèse des médiateurs chimiques de l'inflammation. Ces molécules ont également une action antalgique, qui diminue la sensation de douleur et certains anti-inflammatoires font également baisser la fièvre.

La réponse innée prépare la réponse adaptative

Après digestion du pathogène, une partie des molécules restantes sont exposées sous forme de **peptides** (ou **antigènes**) sur des récepteurs membranaires des phagocytes, les molécules du CMH. Si l'infection persiste, ces phagocytes, notamment les cellules dendritiques, quittent le site inflammatoire et migrent jusqu'aux **ganglions lymphatiques**. Les fragments protéiques

Les caractéristiques de l'immunité innée

Les mécanismes de l'immunité innée, qui existent chez tous les **animaux**, sont conservés au cours de l'évolution. L'immunité innée correspond aux réactions se mettant en place rapidement et se déroulant de manière stéréotypée, quelle que soit la situation initiale l'ayant déclenchée (infection, lésion des tissus, tumeur, etc.). La réaction inflammatoire aiguë est l'un des mécanismes essentiels de l'immunité innée. L'immunité innée est **fonctionnelle dès la naissance** et ses caractéristiques sont héritées génétiquement. Elle ne nécessite **aucun apprentissage** : les réactions de l'immunité innée sont similaires lors de la première rencontre avec un pathogène et lors des suivantes. Enfin, l'immunité innée coopère avec l'immunité adaptative, qui n'existe que chez les seuls vertébrés. ■

DEUX ARTICLES DU MONDE À CONSULTER

• **Trois chercheurs qui ont révolutionné la compréhension du système immunitaire.** p. 70

(Sandrine Cabut et Hervé Morin, 5 octobre 2011)

• **L'aspirine, un nouvel espoir contre le cancer.** p. 71

(Paul Benkimoun, 28 mars 2012)

REPÈRE

La détection d'une réaction inflammatoire

Une analyse sanguine permet la détection de la survenue d'une réaction inflammatoire chez un patient. Pour cela, on mesure :

– la vitesse de sédimentation (VS) des hématies. L'inflammation entraîne la production d'une protéine, le fibrinogène, qui augmente l'agrégation des plaquettes et donc la sédimentation des hématies. La vitesse de sédimentation est donc augmentée ;

– la protéine-C-réactive (CRP). Cette protéine est produite rapidement lors de l'inflammation. La mesure de la concentration de la protéine-C-réactive permet d'estimer quand est survenue la réaction inflammatoire.

ZOOM SUR...

Les maladies inflammatoires chroniques

Ces maladies se caractérisent par une inflammation quasi permanente des tissus touchés. On peut mentionner :

– la polyarthrite rhumatoïde. Les articulations sont le siège d'une réaction inflammatoire, elles deviennent douloureuses et déformées ;

– la maladie de Crohn. Elle consiste en une inflammation pouvant toucher la paroi de l'ensemble du tube digestif et se manifeste par des diarrhées et des douleurs abdominales.

Ces maladies se caractérisent par des poussées inflammatoires très douloureuses. La prise en charge médicale consiste en des traitements anti-inflammatoires visant à réduire les poussées inflammatoires douloureuses lors des crises. Des traitements de fond, notamment avec des immunosuppresseurs, sont prescrits pour réduire la réaction immunitaire à l'origine de l'inflammation. Ces maladies affectent des adultes plutôt jeunes et sont handicapantes dans la vie quotidienne. Le patient doit être suivi toute sa vie : il n'y a pas pour l'instant de traitement conduisant à une guérison complète.

ZOOM SUR...

LES ANTI-INFLAMMATOIRES

Parmi les anti-inflammatoires, on distingue :

- les corticoïdes, dérivés de la cortisone. Les corticoïdes inhibent la plupart des phénomènes immunitaires, dont la production des médiateurs chimiques de l'inflammation comme l'histamine et les éicosanoïdes (molécules dérivées de l'oxydation d'acides gras de la membrane plasmique des cellules immunitaires, comme les prostaglandines, le thromboxane, la prostacycline et les leucotriènes) ;

- les anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS), comme l'aspirine et l'ibuprofène. Le mode d'action commun des AINS repose sur l'inhibition de la formation d'une partie des éicosanoïdes : les prostaglandines. Les AINS ont donc aussi une action antalgique (lutte contre la douleur) et antipyrétique (diminution de la température de l'organisme).

À noter : le paracétamol n'est pas prescrit comme anti-inflammatoire mais comme antalgique et antipyrétique.

L'ASPIRINE

Depuis l'Antiquité, des décoctions d'écorce de saule, contenant de l'acide salicylique, étaient utilisées contre la douleur et la fièvre. En 1899, la société Bayer commercialise l'acide acétylsalicylique obtenu par synthèse chimique. Ce n'est qu'en 1971 qu'est élucidé son mécanisme d'action, qui consiste en l'inhibition de la formation des prostaglandines. En plus de ses actions anti-inflammatoire, antalgique et antipyrétique, l'aspirine a une action anticoagulante en limitant l'agrégation des plaquettes et peut être utilisée pour prévenir des maladies cardio-vasculaires. Des études récentes montreraient que l'aspirine à faible dose réduirait les risques de survenue de certains cancers.

Partie 1 : La réaction inflammatoire aiguë et l'intérêt des anti-inflammatoires

L'intitulé complet du sujet

Un camarade s'est blessé lors d'une chute. Quelques jours plus tard, il a mal, sa plaie est gonflée, rouge et purulente ; il consulte un médecin. Celui-ci, après avoir bien nettoyé la plaie, lui donne un médicament anti-inflammatoire. Votre camarade ne comprend pas la prescription du médecin : « Pourquoi dois-je prendre un médicament puisque je ne suis pas malade ! », vous dit-il.

Expliquez les mécanismes immunitaires mis en jeu dans ce cas précis et l'intérêt de prendre un anti-inflammatoire. Des schémas explicatifs sont attendus.

Proposition de corrigé

Introduction

Un camarade a fait une chute et s'est blessé. Quelques jours après qu'il soit tombé, sa plaie est rouge, gonflée et du pus s'en écoule. Son médecin a nettoyé la plaie et lui a prescrit un anti-inflammatoire. Quels sont les mécanismes de la réaction inflammatoire et quel est l'intérêt de prescrire un anti-inflammatoire ? Dans une première partie, nous allons expliquer à notre camarade les mécanismes de la réaction immunitaire, puis, dans une seconde partie, nous lui expliquerons pourquoi le médecin lui a prescrit un anti-inflammatoire.

I. Les mécanismes de la réaction inflammatoire aiguë (ou RIA)

La chute s'accompagne de lésions cellulaires avec un risque élevé d'entrée de micro-organismes pathogènes dans l'organisme : une réaction immunitaire aiguë se met alors en place très rapidement.

a. Les symptômes stéréotypés de la RIA

La réaction inflammatoire aiguë se caractérise au niveau de la plaie par un gonflement, une rougeur, une douleur, une chaleur et une impotence fonctionnelle.

b. Le recrutement des défenses innées lors de la RIA

Des cellules immunitaires, comme par exemple les mastocytes, les cellules dendritiques ou les macrophages, sont constamment présentes aux lieux d'entrée potentielle de micro-organismes dans l'organisme. Par leurs récepteurs présents à leur surface, ces cellules immunitaires sont capables de reconnaître des molécules présentes sur la paroi de nombreuses espèces de bactéries.

Cette reconnaissance entraîne la sécrétion par ces cellules immunitaires de molécules : les médiateurs chimiques de l'inflammation, comme l'histamine, la sérotonine, les cytokines pro-inflammatoires (IL-1, IL-6, TNF- α , etc.) et les éicosanoïdes. Ces médiateurs chimiques de l'inflammation déclenchent une réaction inflammatoire aiguë. Ainsi l'histamine, en augmentant la perméabilité de la paroi des vaisseaux sanguins, entraîne une vasodilatation et un afflux local de plasma, d'où la rougeur observée. De plus, les médiateurs chimiques de l'inflammation attirent sur le lieu de l'inflammation les cellules immunitaires sanguines, comme les granulocytes et les monocytes sanguins, qui se différencient dans le tissu lésé en macrophages.

c. L'action des cellules immunitaires lors de la RIA

Les cellules immunitaires, comme les granulocytes et les macrophages présents dans le tissu lésé, réalisent la phagocytose, c'est-à-dire qu'ils ingèrent puis éliminent les agents infectieux.

Dans le cas où cette première réponse immunitaire n'est pas suffisante pour éliminer les micro-organismes pathogènes, interviennent d'autres cellules immunitaires : les cellules dendritiques, présentes dans le tissu lésé. Ces cellules fixent sur leurs molécules membranaires du CMH (complexe majeur d'histocompatibilité) des antigènes de l'élément infectieux. Ces cellules migrent alors jusqu'aux ganglions lymphatiques, où elles présentent les antigènes liés aux molécules du CMH aux lymphocytes T. Les lymphocytes ainsi activés interviendront dans l'élimination des agents pathogènes, dans le cadre de l'immunité adaptative.

II. L'intérêt de la prescription d'un anti-inflammatoire

Les médicaments anti-inflammatoires, comme l'aspirine, bloquent la sécrétion de certains médiateurs chimiques de l'inflammation. Ils permettent de limiter la vasodilatation, la douleur ou la chaleur. Ainsi, les anti-inflammatoires permettent de réduire certains symptômes de la réaction inflammatoire aiguë sans empêcher le déroulement des mécanismes immunitaires qui permettent de lutter contre les micro-organismes pathogènes et qui sont donc bénéfiques à l'organisme.

ZOOM SUR...

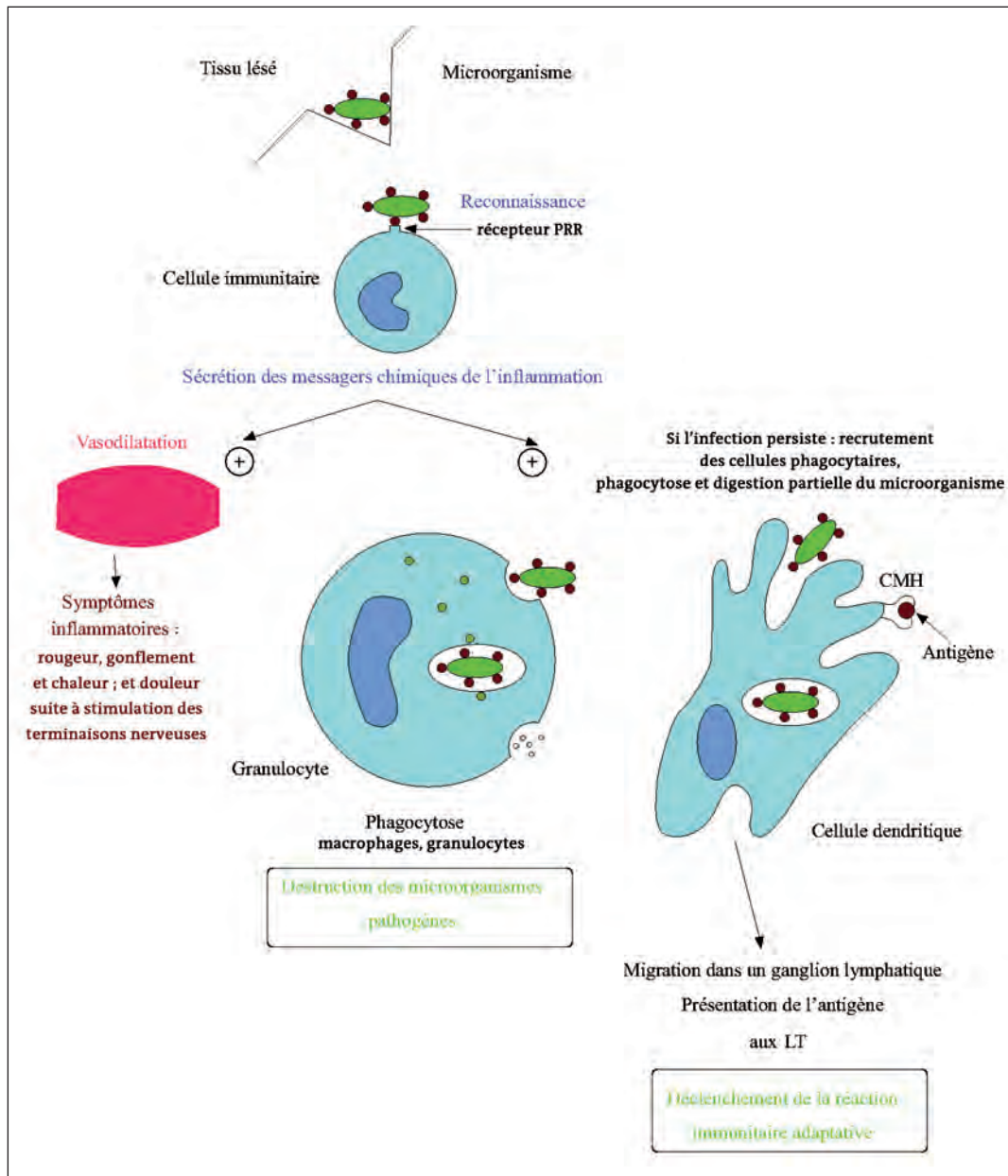
LES RÉCEPTEURS DE L'IMMUNITÉ INNÉE : LES PRR

Pendant longtemps, on pensait que les mécanismes de l'immunité ne faisait pas intervenir la reconnaissance spécifique des pathogènes. Or, dans les années 1980 furent découvertes chez les cellules de l'immunité innée (mastocytes, macrophages, granulocytes, cellules dendritiques) des récepteurs cellulaires, appelés PRR pour *Pattern Recognition Receptors*, capables de reconnaître les pathogènes. Les éléments pathogènes présentent des motifs moléculaires caractéristiques appelés PAMP (*Pathogen Associated Molecular Patterns*) qui sont reconnus par les PRR des cellules de l'immunité innée.

Les PAMP sont des molécules abondantes des micro-organismes : les acides nucléiques (ADN ou ARN) constituent les PAMP des virus, alors que les mannanes constituent les PAMP des champignons. Les PRR reconnaissant les PAMP sont localisés à la surface de cellules immunitaires ou à l'intérieur de ces cellules : ces localisations augmentent la possibilité de rencontre entre les PRR et les PAMP.

LES RÉCEPTEURS DE L'IMMUNITÉ INNÉE : DES MOLÉCULES TRÈS CONSERVÉES

On distingue plusieurs familles de récepteurs de l'immunité innée ou PRR. Chez la drosophile, l'infection par un champignon entraîne sa reconnaissance par les récepteurs appelés « Toll », présents sur des cellules immunitaires de l'insecte et déclenchant l'élimination de ce pathogène. Chez les mammifères, une famille de récepteurs proches des récepteurs de la drosophile a été identifiée récemment : il s'agit des récepteurs TLR pour *Toll Like Receptors*. Ainsi les récepteurs de l'immunité innée semblent fortement conservés lors de l'évolution.



Conclusion

Ainsi, lors d'une chute, une réaction inflammatoire aiguë se met en place rapidement. Elle se caractérise par des symptômes stéréotypés. En faisant intervenir des cellules immunitaires et des médiateurs chimiques, elle vise à éliminer les agents pathogènes présents sur les lésions cellulaires. Si nécessaire, la RIA déclenche l'activation de l'immunité adaptative qui interviendra par la suite. Les anti-inflammatoires permettent de réduire les symptômes de l'inflam-

mation sans diminuer l'efficacité de celle-ci. Quels sont alors les mécanismes immunitaires mis en jeu dans la réponse immunitaire adaptative ? ■

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Étude de documents

- Étude des mécanismes de la réaction inflammatoire aiguë : cellules immunitaires, molécules de l'inflammation.
- Étude des modes d'action des anti-inflammatoires.
- Mise en évidence de la conservation des molécules de l'immunité innée lors de l'évolution.

Ce qu'il ne faut pas faire

- Ne pas tenir compte des deux parties de la réponse imposées par l'énoncé.
- Ne pas faire de schéma(s).

Trois chercheurs qui ont révolutionné la compréhension du système immunitaire

À eux trois, ils ont révolutionné la compréhension du système immunitaire, ouvrant la voie à des progrès décisifs dans la lutte contre les infections, les cancers ou encore les maladies inflammatoires. Le Français Jules Hoffmann, 70 ans, l'Américain Bruce Beutler, 53 ans, et le Canadien Ralph Steinman, 68 ans, sont les trois lauréats 2011 du prix Nobel de médecine, décerné lundi 3 octobre par le comité Nobel de Stockholm.

Hoffmann et Beutler, qui se partagent la moitié du prix (doté de 10 millions de couronnes suédoises, soit 1,08 million d'euros), sont récompensés pour leurs travaux sur l'immunité innée, première ligne de défense de l'organisme contre les agressions extérieures. L'immunologiste Ralph Steinman, qui avait obtenu l'autre moitié du prix pour sa découverte de cellules appelées « dendritiques », impliquées dans l'immunité dite « spécifique », est, lui, décédé le 30 septembre.

Comment les espèces vivantes, et en particulier l'homme, résistent-elles aux multiples attaques, infectieuses et autres, dont elles font l'objet en permanence ? Les travaux de Jules Hoffmann et de Bruce Beutler ont été décisifs pour la compréhension de l'immunologie « innée », c'est-à-dire des tout premiers mécanismes de défense de l'organisme. Le point commun de ces deux chercheurs est d'avoir découvert des récepteurs qui interviennent dans la reconnaissance comme non-soi des germes pathogènes (bactéries, champignons...) : Jules Hoffmann chez les insectes, en 1996, et Bruce Beutler chez les souris, en 1998. Le lien entre l'insecte – en l'occurrence, la mouche drosophile –, la souris et l'homme a été rapidement établi avec l'identification de récepteurs

de type Toll, permettant d'enclencher la réponse innée chez toutes ces espèces.

« Étudier la biodiversité »

Quant à Ralph Steinman, il a découvert, en 1973, des cellules appelées « dendritiques », qui interviennent en deuxième ligne. « Ces cellules sont capables de sentir les dangers extérieurs et de déclencher les réponses immunitaires dites « adaptatives », spécifiques pour chaque pathogène et qui nous protègent à long terme, précise Sebastian Amigorena, immunologiste et biologiste cellulaire, directeur de recherche au CNRS. *Les applications de ces travaux sont énormes, dans de multiples domaines, comme les cancers, les vaccins synthétiques, les maladies auto-immunes.* » Pour Nicole Le Douarin, professeur honoraire au Collège de France, qui a beaucoup soutenu les recherches de Jules Hoffmann, ses travaux « ont permis d'éclairer une question essentielle restée longtemps sans réponse, celle de l'initiation de la réponse immunitaire, avant la phase d'activation des lymphocytes T ou la fabrication d'anticorps ». Surtout, continue la chercheuse

en embryologie et biologie, « ils ont établi que les mécanismes de défense des insectes étaient conservés chez des espèces plus évoluées. Cette persistance d'un processus ancien dans l'évolution est un argument de poids pour étudier la biodiversité. Il y a une grande unité dans le monde vivant. »

Jean-Luc Dimarcq, qui a passé sa thèse sous la direction de Jules Hoffmann, salue la « vista » de son ancien patron, qui l'a conduit « à prendre les bonnes décisions au bon moment ». Réorienter l'ensemble des ressources du laboratoire qu'il dirigeait vers l'étude de l'immunité chez les insectes était un pari audacieux. « À l'époque, on considérait cette immunité comme ancestrale, on hésitait même à employer ce terme dans les congrès », se souvient-il. En effet, les insectes ne disposent pas d'anticorps, qui constituaient alors pour la médecine le cœur du système immunitaire. « Mais cette caractéristique a sans doute rendu l'étude de l'immunité innée plus facile », note M. Dimarcq.

À Strasbourg, entre sablage de champagne et sollicitations médiatiques, Jean-Marc Reichhart,

qui a succédé à Jules Hoffmann à la tête de l'unité 9022 du CNRS, confirme que cette orientation, également portée par son épouse Danielle Hoffmann, était risquée. « Pour convaincre nos tutelles, nous avons eu la chance que Nicole Le Douarin plaide pour nous », note-t-il. Il y voit « une morale à tirer pour nos instances : laisser les chercheurs se lancer dans de telles aventures, dans des zones qu'ils explorent sans être assurés qu'elles conduiront à des innovations ».

L'équipe de Jules Hoffmann a peut-être été en avance sur son temps en créant, en 1999, une start-up, Entomed, destinée à la production de peptides antimicrobiens tirés du vaste arsenal des insectes. « Ces grosses molécules étaient difficiles à synthétiser, trop onéreuses à faire fabriquer par des levures : c'est là que le bât a blessé », se souvient Roland Lupoli, qui a participé à cette initiative, stoppée en 2005 après le retrait d'investisseurs américains. Mais les « Hoffmanniens » sont persuadés que cette approche finira par aboutir. ■

Sandrine Cabut et Hervé Morin
(5 octobre 2011)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article détaille les découvertes qu'a récompensées la plus haute distinction internationale dans le domaine de la médecine. En 2011, le prix Nobel de médecine fut décerné conjointement à trois immunologistes, un Français, Jules Hoffmann, un Américain, Bruce Beutler et un Canadien, Ralph Steinman. Jules Hoff-

mann et Bruce Beutler ont fait progresser les connaissances sur les mécanismes de l'immunité innée. Chez les insectes, où seule existe la réponse immunitaire innée, Jules Hoffmann et son équipe ont découvert les récepteurs Toll capables de reconnaître les agents pathogènes. Bruce Beutler a identifié chez les mammifères des récepteurs TLR (*Toll Like Receptors*) semblables aux récepteurs Toll des insectes. Enfin Ralph Steinman

a découvert chez l'homme les cellules dendritiques et leur importance dans la coopération entre l'immunité innée et l'immunité adaptative. Enfin, l'article montre que la recherche comporte souvent une part non négligeable d'inconnu : Jules Hoffmann choisit de travailler sur l'immunité innée des insectes, sujet qui paraissait bien peu porteur à l'époque et qui se révéla à l'origine d'un prix Nobel des années plus tard.

L'aspirine, un nouvel espoir contre le cancer

Le médicament réduit les risques de métastases et de décès, mais sa prescription généralisée est encore prématurée.

Devons-nous tous prendre de l'aspirine pour prévenir un cancer ? La question est de nouveau posée après la publication, mercredi 21 mars, sur le site de l'hebdomadaire médical britannique *The Lancet*, de trois nouvelles études, menées par l'équipe du professeur Peter Rothwell. Elles montrent qu'une prise quotidienne d'aspirine réduit la mortalité et le risque de métastases.

Fondateur de l'Unité de recherche sur la prévention des accidents vasculaires cérébraux à l'université d'Oxford, Peter Rothwell invite toutefois à la prudence : il est trop tôt pour conclure que tout le monde tirerait un bénéfice d'une telle prophylaxie. Un avis qui rejoint celui, unanime, d'autres spécialistes.

Les chercheurs britanniques ont rassemblé des données issues d'essais destinés à l'origine à évaluer les bénéfices, sur le plan cardio-vasculaire, d'une prise en continu d'aspirine. Cette méthode, si elle présente l'avantage d'autoriser facilement l'accès aux données de plusieurs dizaines de milliers d'individus, ne présente pas les mêmes garanties qu'une étude spécifiquement conçue pour étudier les bénéfices d'un médicament vis-à-vis du cancer. Dans une précédente étude, publiée en décembre 2010, M. Rothwell et ses collègues avaient mis en évidence une réduction d'environ 20 % du risque de décès par cancer chez 25 000 participants traités quotidiennement pendant quatre ans avec une faible dose (75 mg) d'aspirine. Elle atteignait 30 % à 40 % après cinq ans de ce traitement.

Les trois nouvelles études confirment la réduction des décès et du risque de tumeurs malignes.

Elles montrent aussi une diminution du risque de cancer avec métastases. Les bénéfices sont particulièrement évidents sur les adénocarcinomes, les tumeurs les plus fréquentes.

La première étude regroupe les résultats de 51 essais dans lesquels les participants étaient répartis, de manière aléatoire, dans un groupe avec aspirine ou un groupe sans aspirine. Le risque de cancer est diminué de 15 % sous aspirine. La réduction atteint 37 % avec une prise pendant cinq ans ou plus. Le bénéfice est déjà perceptible après trois ans de traitement : l'incidence est alors réduite d'environ un quart. « *C'est énorme* », reconnaît Anne-Odile Hueber (Institut national de la santé et de la recherche médicale, université de Nice), spécialiste du cancer colorectal.

La deuxième étude démontre une réduction de 31 % du risque d'adénocarcinome déjà métastasé lors du diagnostic et de 55 % d'apparition ultérieure de métastases. Dans le cas du cancer colorectal, le risque de métastases ultérieures est même réduit de 74 %.

La prise quotidienne d'aspirine est aussi associée à une diminution des décès dus au cancer chez les personnes qui avaient développé un adénocarcinome, en particulier en l'absence de métastases lors du diagnostic (50 % de réduction). « *Ces résultats constituent la première preuve chez l'homme que l'aspirine prévient les métastases à distance des cancers* », se réjouissent les auteurs des trois études.

Enfin, la troisième étude situe la réduction du risque de cancer colorectal aux alentours de 40 %. Dans un commentaire qui accompagne les trois études du *Lancet*, deux médecins de Harvard saluent ces résultats « incontestables »,

mais soulignent le problème du risque de saignement inhérent aux effets de l'aspirine, qui fluidifie le sang. Un inconvénient qui tempère les bénéfices de ce médicament. L'équipe de Peter Rothwell a en effet constaté que le risque hémorragique augmente au début des essais, même s'il diminue avec le temps pour disparaître après trois ans de traitement.

« *Personne ne se hasarderait à recommander sur la seule base de ces études la prise quotidienne d'aspirine en prévention du cancer* », affirment en chœur Anne-Odile Hueber, Fabio Calvo, directeur de la recherche à l'Institut national du cancer (INCa), et Dominique Maranichi, ancien président de l'INCa. « *Pour savoir à qui et à partir de quel âge donner de l'aspirine, soit en prévention de la survenue d'un cancer, soit pour éviter les métastases ou une récurrence, il est indispensable de monter un essai clinique spécifique de grande ampleur. Il appartient aux organismes publics comme l'INCa et à ses homologues dans d'autres pays de le mettre sur pied* », estime M. Calvo.

Les chercheurs doivent travailler dans deux directions, selon Mme Hueber : « *La première est d'élucider les mécanismes moléculaires expliquant l'effet de l'aspirine sur les cellules tumorales et les étapes initiales du développement d'un cancer. La seconde est de mettre au point des aspirines hybrides, qui conserveraient les avantages en prévention du cancer, sans les effets indésirables.* »

Un autre point est à éclaircir. « *Nous ne savons pas pourquoi cela ne marche pas avec une prise d'aspirine un jour sur deux* », remarque M. Calvo. Peter Rothwell ne serait pas surpris que « *les effets d'un traitement pris un jour sur*

deux, absents à court terme, se révèlent s'il est suivi sur le long terme ». Son équipe attend la publication, l'an prochain, des résultats d'un vaste essai sur l'aspirine en prévention cardio-vasculaire, la *Women Health Study*, pour trancher cette question. ■

Paul Benkimoun
(28 mars 2012)

POURQUOI CET ARTICLE ?

L'aspirine n'a pas fini de nous surprendre ! Utilisée comme anti-inflammatoire depuis l'Antiquité après avoir été extrait du saule, l'aspirine a depuis présenté d'autres indications thérapeutiques. Il est souvent dit que si l'aspirine était proposée actuellement pour une autorisation de mise sur le marché, celle-ci lui serait refusée à cause des effets trop divers de cette molécule. De plus, **l'article proposé présente les résultats d'études mettant en évidence le rôle de protection de l'aspirine contre les cancers.** Ces résultats très prometteurs ne sont néanmoins que préliminaires. D'autres études doivent être menées avant de formuler des recommandations thérapeutiques, étant donné le risque hémorragique important qui accompagne la prise prolongée d'aspirine. La découverte de l'origine de la protection contre le cancer que confère l'aspirine pourrait également ouvrir la voie à un nouveau champ thérapeutique dans la prévention des cancers.

MOTS CLÉS

ANTICORPS

Glycoprotéines synthétisées par les plasmocytes que l'on retrouve dans le plasma et dans d'autres liquides biologiques. Les anticorps sont aussi appelés « immunoglobulines » car ils sont retrouvés après électrophorèse dans des protéines du sérum, dans les différentes fractions (α , β et γ) des globulines. Chez l'homme, les anticorps ont pour forme un Y composé de quatre chaînes peptidiques (deux chaînes lourdes identiques et deux chaînes légères identiques). Chaque anticorps possède deux sites de fixation aux antigènes situés aux extrémités variables des chaînes légères et des chaînes lourdes. On distingue cinq classes d'immunoglobulines : IgG, IgM, IgA, IgE et IgD, en fonction de la nature de la région constante de la chaîne lourde. La séropositivité pour un antigène donné correspond à la présence dans le sérum d'anticorps dirigés contre cet antigène et signe l'activation du système immunitaire en réponse à la présence d'un antigène.

ANTIGÈNE

Toute structure moléculaire pouvant être reconnue par un récepteur de l'immunité adaptative, soit un anticorps, soit un TCR (récepteur des LT), soit un BCR (récepteur des LB) et déclenchant ainsi une réponse immunitaire adaptative.

CELLULES PRÉSENTATRICES D'ANTIGÈNE (CPAg)

Les CPAg constituent une catégorie de phagocytes capables d'exprimer à leur surface des déterminants antigéniques liés à des protéines du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH). Il s'agit, par exemple, des cellules dendritiques et des macrophages. Ces cellules sont au cœur de la coopération entre l'immunité innée et l'immunité adaptative.

L'immunité adaptative, prolongement de l'immunité innée

L'immunité innée est présente chez tous les êtres vivants. Mais chez les vertébrés s'est développée une réponse immunitaire plus spécifiquement dirigée contre le pathogène et dotée d'une mémoire : l'immunité adaptative. Cette réponse se met en place en parallèle de la réponse innée, avec quelques jours de délai. Quelles en sont les caractéristiques ?

La réponse immunitaire adaptative

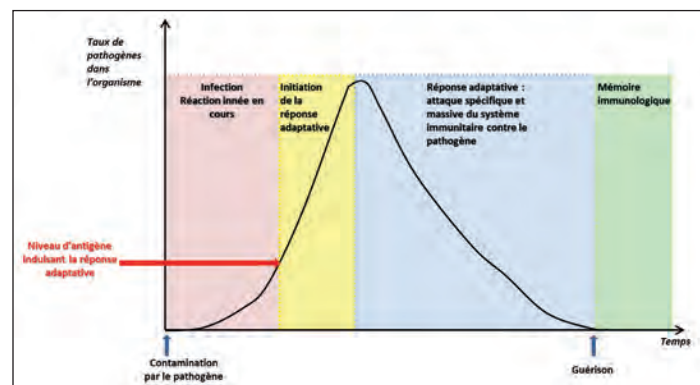
Suite à la réaction inflammatoire, des **cellules dendritiques** phagocytent sur les sites de l'infection l'agent infectieux, dont les fragments protéiques constituent des **antigènes**. Sur ces cellules dendritiques, les antigènes sont exposés au sein de molécules spécifiques appelées « **complexe majeur d'histocompatibilité** » (CMH). Les cellules dendritiques migrent vers des ganglions lymphatiques, où elles rencontrent de nombreux **lymphocytes T** (LT). Les LT expriment à leur surface des récepteurs T, appelés « **TCR** » (**T Cell Receptors**), associés à d'autres molécules de surface comme **CD4** ou **CD8**. Les LT CD4 portent le récepteur CD4 et le TCR, qui est identique pour un même clone de LT CD4. Le TCR des LT CD4 interagit avec le **peptide antigénique** présenté par le CMH des cellules dendritiques. Cette reconnaissance spécifique entraîne l'activation des LT CD4, qui sécrètent alors des cytokines, comme l'**interleukine 2** (IL2). IL2 est un médiateur soluble de communication qui induit la prolifération clonale puis la différenciation des LT CD4 l'ayant secrétée en **lymphocytes T auxiliaires**. Ainsi, les cellules dendritiques sont des **cellules présentatrices de l'antigène** activant la formation de LT auxiliaires, dont la fonction est de sécréter des molécules activant les cellules immunitaires.

Les **lymphocytes B** (LB) portent à leur surface un récepteur appelé « **BCR** » (**B Cell Receptor**), qui correspond à un **anticorps membranaire**. Tous les anticorps membranaires d'un même LB ou d'un même clone de LB sont identiques.

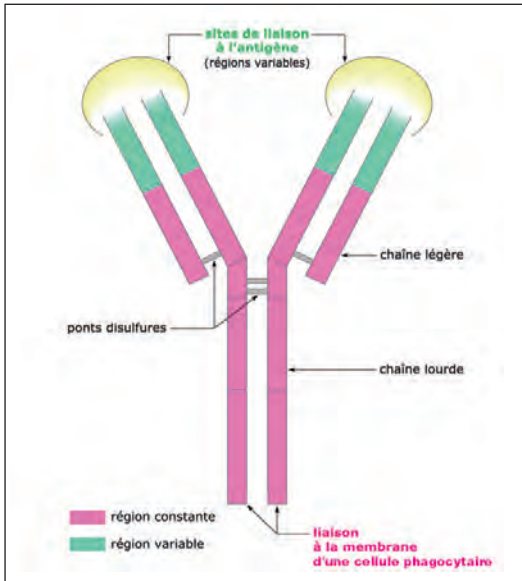
La reconnaissance spécifique entre un BCR et l'antigène correspondant entraîne l'activation du LB. Les LT auxiliaires, présentant la même spécificité pour l'antigène que les LB, sécrètent l'interleukine 2, qui stimule la prolifération clonale puis la différenciation de ces LB en **plasmocytes sécréteurs d'anticorps**. Les anticorps sécrétés par les plasmocytes issus d'un même clone de LB ont tous la même spécificité pour l'antigène.

Un **anticorps** ne reconnaît qu'un seul type d'antigène. L'anticorps possède, en effet, une partie constante et une partie variable, qui reconnaît l'antigène. Les anticorps permettent la **neutralisation de l'antigène**. Ils sont produits en grande quantité par les plasmocytes et se fixent sur les virus, sur des antigènes solubles ou recouvrent des bactéries. Il y a formation de complexes immuns. Cette fixation empêche les virus d'infecter leurs cellules-cibles. La partie constante des anticorps est reconnue par des récepteurs membranaires des cellules phagocytaires, qui éliminent l'agent infectieux recouvert d'anticorps par **phagocytose**. Ainsi, l'intervention des LB sécréteurs d'anticorps ou plasmocytes constitue l'**immunité adaptative à médiation humorale**, spécifique de l'antigène et qui nécessite l'intervention des LT auxiliaires.

Les cellules infectées par des virus, sont détruites par les **lymphocytes T cytotoxiques** (LTc). Dans les ganglions lymphatiques, des cellules présentatrices de l'antigène expriment au sein de leur CMH l'antigène, qui est reconnu spécifiquement par le TCR des LT, porteurs également du récep-



Chronologie de la réponse immunitaire



Structure d'un anticorps

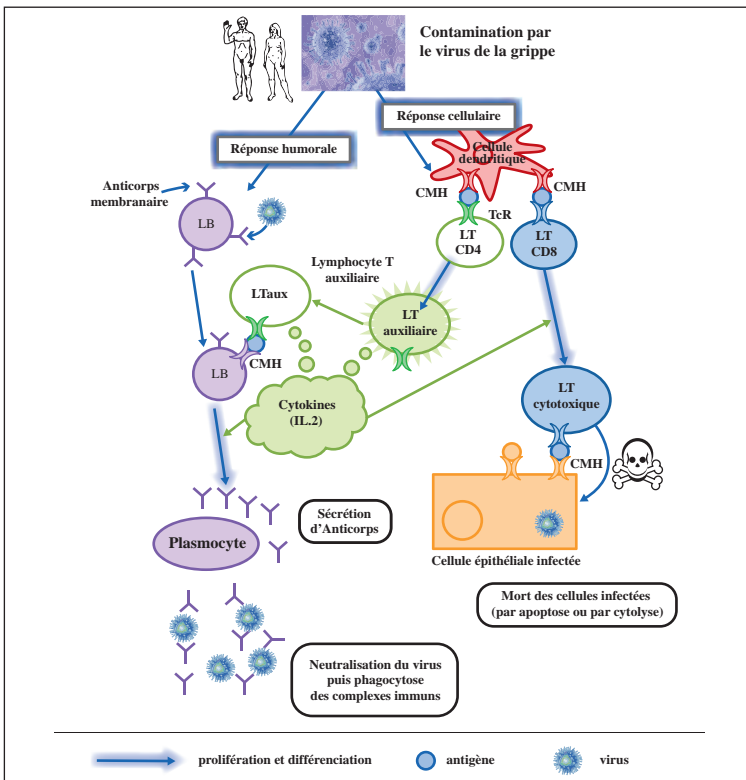
cellulaire, spécifique de l'antigène et nécessitant les LT auxiliaires.

Le VIH induit un syndrome d'immunodéficience acquise (sida)

Le **virus de l'immunodéficience humaine (VIH)** infecte et détruit différentes cellules, dont principalement les LT CD4. Le patient est dit **séropositif pour le VIH** quand il produit des anticorps anti-VIH. Pendant quelques années, le système immunitaire fait diminuer le taux de virus dans le sang. Mais le VIH, toujours présent dans l'organisme, détruit les LT CD4, désorganisant le système immunitaire. Le patient est dit « **atteint du sida** » quand il développe des maladies opportunistes, pouvant entraîner son décès. Les **trithérapies** actuelles retardent l'évolution de la maladie mais n'éradiquent pas le VIH de l'organisme.

La maturation du système immunitaire

Tous les lymphocytes sont produits dans la moelle osseuse, ils acquièrent leur immunocompétence dans le thymus pour les LB, dans la moelle osseuse pour les LT. La **grande diversité des récepteurs BCR des LB et TCR des LT**, capable de reconnaître une multitude d'antigènes, est le résultat aléatoire de mécanismes génétiques complexes. Puis, les LB et LT capables de reconnaître les constituants de l'organisme et dits **auto-réactifs**, sont éliminés. À l'issue de cette sélection négative, les LB et LT sont dits **naïfs** : ils n'ont pas encore rencontré leur antigène. Ces lymphocytes migrent dans les organes lymphoïdes secondaires (comme les ganglions lymphatiques), où ils sont susceptibles de rencontrer leur antigène. La **maturation du système immunitaire** est donc le produit d'un équilibre dynamique entre production et élimination des cellules immunitaires auto-réactives. ■



Lutte contre le virus de la grippe

teur CD8. Cette reconnaissance entraîne l'activation des LT CD8, qui prolifèrent puis se différencient en LT cytotoxiques. Cette prolifération et cette différenciation nécessitent la stimulation par l'interleukine 2, sécrétée par les LT auxiliaires activés par le même antigène. Les LT cytotoxiques se fixent par leur TCR à l'antigène présenté au sein du CMH de la cellule infectée et libèrent des molécules cytotoxiques la détruisant. Les LT cytotoxiques constituent l'**immunité adaptative à médiation**

CHIFFRES CLÉS

Le sida en France

Au total, en 2009, 83 000 personnes ont développé un sida depuis le début de l'épidémie dans les années 1980, et 46 000 malades en sont décédés. En 2009, 1 450 nouveaux cas de sida ont été déclarés.

En 2009, on estime à environ 152 000 le nombre total de personnes infectées en France par le VIH, dont environ 50 000 ne connaîtraient pas leur séropositivité.

Environ 6 300 personnes ont découvert leur séropositivité en 2010 : ce nombre est stable depuis quelques années. 30 % des diagnostics de séropositivité pour le VIH sont établis à un stade tardif, alors que le taux de LT CD4 est déjà faible. Le diagnostic précoce ne concerne que 36 % des séropositivités détectées.

ZOOM SUR...

La transmission du virus du sida et la prévention

La transmission du sida a lieu :
 – lors de rapports sexuels (80 % des cas). Prévention par utilisation de préservatifs masculin ou féminin ;
 – lors d'une contamination par le sang (transfusion sanguine, seringue contaminée). Prévention par utilisation de matériel stérile et à usage unique ;
 – de la femme enceinte à l'enfant, lors de la grossesse, à l'accouchement ou lors de l'allaitement. Dans les pays industrialisés, les traitements ont réduit presque totalement le risque de la transmission de la mère à l'enfant. Prévention par prise en charge médicale pendant la grossesse, naissance par césarienne, utilisation exclusive de lait artificiel et traitement post-natal de l'enfant. De fausses croyances persistent sur la transmission du virus. Il ne peut pas se transmettre par la salive, la sueur, les larmes, les piqûres d'insectes ou encore le toucher.

DEUX ARTICLES DU MONDE À CONSULTER

- **Cancers : cap sur l'immunothérapie** p.76-77 (Sandrine Cabut, 4 juin 2014)
- **Une piste pour éradiquer le VIH de l'organisme** p.77 (Paul Benkimoun, 17 mars 2012)

ZOOM SUR...

LE COMPLEXE MAJEUR D'HISTOCOMPATIBILITÉ

Le complexe majeur d'histocompatibilité (CMH) est l'ensemble de six gènes principaux (A, B, C, DR, DQ, DP) situés, chez l'homme, sur la paire de chromosomes 6 et codant des glycoprotéines de surface qui interviennent dans le rejet de greffes et la reconnaissance du soi modifié. Chez l'homme, le complexe majeur d'histocompatibilité est appelé « système HLA » (*Human Leucocytes Antigens*). Le complexe majeur d'histocompatibilité forme un ensemble de gènes très polymorphes de par un nombre élevé d'allèles : le complexe majeur d'histocompatibilité n'est jamais identique chez deux individus (sauf chez les vrais jumeaux).

LA GRANDE DIVERSITÉ DES RÉCEPTEURS DES CELLULES IMMUNITAIRES

L'immunité adaptative génère, tout au long de la vie, un très grand nombre de récepteurs BCR des lymphocytes B et TCR des lymphocytes T. L'immensité des répertoires B et T permet potentiellement de faire face à une multitude d'antigènes différents. La spécificité des lymphocytes B et lymphocytes T, fondée sur celle des récepteurs qu'ils expriment, est obtenue grâce à un réarrangement au hasard de l'information génétique : au cours de la maturation des lymphocytes dans la moelle osseuse (pour les LB) et dans le thymus (pour les LT), les gènes codant les récepteurs sont construits par combinaison aléatoire de segments de gènes présents dans les futurs lymphocytes B et lymphocytes T. Au cours de ce processus, les lymphocytes perdent une partie de leur génome. Les possibilités de ces réarrangements sont estimées à 10^{18} , alors que seulement 10^{12} à 10^{15} lymphocytes sont présents ou produits dans le corps. Ce réarrangement des gènes s'amorce avant la naissance.

Partie 2.1 : Greffe de peau chez la souris

L'intitulé complet du sujet

On sait que les greffes de tissus ne sont possibles que si le donneur et le receveur sont compatibles. On cherche à préciser les mécanismes immunitaires impliqués dans le rejet d'une greffe de peau chez la souris.

Exploitez l'ensemble des résultats expérimentaux proposés dans le document et montrez qu'ils sont en accord avec l'hypothèse selon laquelle le rejet de greffe chez la souris repose sur des mécanismes d'immunité adaptative impliquant des effecteurs cellulaires.

Le document

Quelques résultats expérimentaux chez les souris
Des greffes de peau ont été réalisées chez des souris de lignées pures (homozygotes pour tous leurs

gènes) appelées lignées A et lignées B. On observe que :

- un greffon de peau issu d'une souris de lignée B implanté à une souris de lignée B est toujours accepté ;
- un greffon de peau issu d'une souris de lignée A implanté à une souris de lignée B est parfaitement fonctionnel six jours après la greffe, mais totalement détruit au bout de onze jours ;
- une souris de lignée B ayant précédemment rejeté un premier greffon issu d'une souris de lignée A rejette un deuxième greffon de souris de lignée A en six jours.

Des souris de lignée B sont dites "hyperimmunisées" lorsqu'on leur a greffé à trois reprises, à trois semaines d'intervalle, de la peau de souris de lignée A. Les chercheurs prélèvent alors chez ces souris d'une part leur sérum (plasma sanguin) et d'autre part



des cellules lymphoïdes dans les ganglions lymphatiques situés près du greffon. Des souris de lignée B sont dites "neuves" (notées BN) si elles n'ont subi aucun traitement. »

Expérience 1

Des souris de lignée B « neuves » (BN) reçoivent le sérum des souris de lignée B hyperimmunisées, puis trois jours plus tard une greffe de peau de souris de lignée A. Onze jours plus tard, le greffon est rejeté, alors qu'il était entièrement fonctionnel jusqu'au sixième jour.

Expérience 2

D'autres souris BN reçoivent des injections au jour 1, une greffe de peau issue d'une souris de lignée A au jour 3. L'état du greffon est observé au jour 6. Les résultats sont les suivants :

Expérience 2

Des souris BN reçoivent les cellules lymphoïdes vivantes des souris de lignée B hyperimmunisées, puis reçoivent trois jours plus tard une greffe de peau de souris de lignée A : le greffon est rejeté dès le sixième jour. Les souris BN ayant reçu les cellules lymphoïdes vivantes des souris de lignée B hyperimmunisées réagissent à la greffe comme les souris de lignée B hyperimmunisées, comme si elles avaient déjà été en contact avec le greffon et l'avaient rejeté.

De plus, la greffe des souris BN ayant reçu les cellules lymphoïdes tuées des souris de lignée B hyperimmunisées entraîne un greffon encore fonctionnel au sixième jour. Les cellules lymphoïdes injectées doivent donc être vivantes pour entraîner le rejet du greffon au sixième jour.

Infection au jour 1	Grefe au jour 3	Résultat au jour 6
de cellules lymphoïdes vivantes de souris de lignée B hyperimmunisées	peau de souris de lignée A	la majorité des greffons sont détruits ou présentent des nécroses partielles
de cellules lymphoïdes tuées de souris de lignée B hyperimmunisées	peau de souris de lignée A	les greffons sont toujours fonctionnels
de cellules lymphoïdes vivantes de souris de lignée B non immunisées	peau de souris de lignée A	les greffons sont toujours fonctionnels

Ce qu'il ne faut pas faire

- Se contenter de saisir les données du document sans montrer comment les résultats expérimentaux permettent de valider l'hypothèse formulée par l'énoncé.

Proposition de corrigé

Une greffe de peau entre une souris donneuse et une souris receveuse appartenant à une même lignée homozygote n'est jamais rejetée : les deux souris sont donc compatibles.

Une greffe de peau d'une souris donneuse de la lignée A à une souris receveuse de la lignée B est fonctionnelle au sixième jour mais est rejetée au onzième jour : les souris ne sont pas compatibles.

La greffe de peau d'une souris donneuse de la lignée A à une souris receveuse de la lignée B qui a déjà rejeté un premier greffon issu de A est rejetée beaucoup plus rapidement, en six jours.

Expérience 1

Des souris de lignée B « neuves » (souris NB) n'ayant reçu aucun traitement au préalable reçoivent le sérum des souris de lignée B hyperimmunisées, puis reçoivent trois jours plus tard une greffe de peau de souris de lignée A : la greffe n'est rejetée qu'au onzième jour. Les molécules contenues dans le sérum des souris de lignée B hyperimmunisées ne permettent pas un rejet précoce de la greffe au sixième jour chez les souris NB, comme il est observé chez les souris de lignée B hyperimmunisées.

Enfin, la greffe des souris BN ayant reçu les cellules lymphoïdes vivantes des souris de lignée B non immunisées entraîne un greffon encore fonctionnel au sixième jour. Pour entraîner un rejet précoce du greffon, les cellules lymphoïdes injectées vivantes doivent provenir de souris hyperimmunisées.

Ainsi, les cellules lymphoïdes contenues dans les ganglions lymphatiques des souris sont responsables du phénomène de rejet lors des greffes entre donneur et receveur non compatibles. La réponse immunitaire est d'autant plus rapide que le receveur a déjà été en contact avec l'antigène : cela justifie donc le caractère adaptatif de cette réponse immunitaire. ■

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Maîtrise des connaissances :

question de synthèse

- Présenter les réactions immunitaires de l'immunité adaptative en s'appuyant sur l'exemple d'une infection virale, la grippe.
- Présenter le recrutement des LB et leur fonction dans l'élimination des agents pathogènes.
- Présenter le recrutement des LT cytotoxiques et leur fonction dans l'élimination des cellules infectées par des virus.
- En s'appuyant sur l'exemple du sida, montrer le rôle central des LT auxiliaires dans la réponse immunitaire adaptative.

ZOOM SUR...

LA GREFFE D'ORGANES

La greffe ou transplantation d'organes est le remplacement d'un organe ou d'un tissu déficient par un organe ou un tissu sain, appelé « greffon » et provenant de la personne greffée ou d'un autre donneur. La greffe d'organes est parfois la seule issue thérapeutique lorsque les organes vitaux sont atteints de manière irréversible.

En 2011, en France, 40 000 personnes vivent avec un greffon fonctionnel. 4 945 personnes ont été greffées en 2011 : le rein est la greffe la plus courante (60 %), suivie de celle du foie (26 %), du cœur (8 %), puis du poumon et du pancréas. De 1991 à 2011, le nombre de greffes a augmenté de 41 % mais cette augmentation ne suffit pas à résorber l'attente : 16 371 patients étaient en attente d'un greffon en 2011, soit presque le double par rapport à 1997.

Le greffon étranger à l'organisme peut déclencher une réaction immunitaire de rejet. Le rejet peut être aigu, ou chronique, entraînant, à terme, la destruction du greffon ou une perte de sa fonctionnalité. Les traitements immunosuppresseurs ont progressé ces dernières années, mais ils s'accompagnent d'un risque accru d'infections et de tumeurs chez le patient. Les recherches se poursuivent pour augmenter la tolérance du système immunitaire pour le greffon, tout en conservant une réactivité vis-à-vis des autres antigènes.

LES MALADIES AUTO-IMMUNES

Les maladies auto-immunes sont dues à l'attaque et à la destruction des cellules de l'individu par son propre système immunitaire. Par exemple, le diabète juvénile ou insulino-dépendant est dû à l'attaque des cellules du pancréas responsables de la synthèse d'insuline ; la sclérose en plaques correspond à l'attaque de la gaine de myéline entourant les cellules nerveuses.

Cancers : cap sur l'immunothérapie

Le congrès de l'Association américaine d'oncologie clinique à Chicago a permis de mesurer les progrès récents d'une stratégie thérapeutique imaginée il y a plus d'un siècle : mobiliser nos cellules immunitaires pour combattre la maladie.

D'abord, un cocorico : parmi les 5 000 communications présentées au congrès annuel de l'Association américaine d'oncologie clinique (*American Society of Clinical Oncology* ; ASCO), qui s'est tenu à Chicago (Illinois) du 30 mai au 3 juin, près de 10 % ont au moins un auteur français. Un score en nette hausse par rapport à 2013, et qui place la France au premier rang des pays européens présents, se réjouit l'Institut national du cancer (INCa).

Ensuite, une bouffée d'oxygène pour les chercheurs et surtout pour les patients. De nombreuses études présentées à cette 50e édition de l'ASCO confirment que l'immunothérapie est bien une nouvelle arme thérapeutique contre les cancers. Cette approche permet même, dans certains cas, d'avoir des espoirs de guérison pour des tumeurs métastatiques, notamment les mélanomes.

Alors que les traitements anticancéreux classiques cherchent à détruire les cellules malignes, l'immunothérapie consiste à mobiliser nos propres cellules de défense pour faire ce travail. Les cellules cancéreuses ont en effet acquis la fâcheuse capacité d'échapper au contrôle des lymphocytes T, chargés d'éliminer les éléments étrangers de notre organisme.

L'idée de l'immunothérapie date de plus d'un siècle, mais les multiples tentatives (vaccins, médicaments, tels l'interféron) se sont longtemps révélées décevantes. Aujourd'hui, les succès se multiplient avec des stratégies plus modernes : anticorps d'action ciblée, nouveaux vaccins et même thérapies cellulaires. La donne a commencé à changer

en 2010 avec un anticorps monoclonal, l'ipilimumab, qui, pour la première fois, a permis de prolonger la survie de patients atteints de mélanomes métastatiques, des tumeurs quasi insensibles à la chimiothérapie. Le taux de réponse obtenu (une activité chez environ un malade sur cinq) pouvait sembler modeste et la toxicité importante (réactions auto-immunes notamment digestives, sévères, voire mortelles), mais les résultats étaient inédits. Certains de ces patients sont d'ailleurs toujours en rémission complète avec, jusqu'à dix ans de recul, même si leurs médecins sont réticents à prononcer le mot de « guérison ».

Désormais commercialisé sous le nom de Yervoy (laboratoires Bristol-Myers-Squibb) pour le traitement des mélanomes métastatiques, l'ipilimumab agit en bloquant un récepteur des lymphocytes T appelé « CTLA-4 », récepteur qui joue un rôle de frein du système immunitaire. En neutralisant ce frein, l'ipilimumab libère en quelque sorte les défenses de l'organisme contre la tumeur.

Pour savoir s'il serait utile de

le prescrire à un stade moins avancé de la maladie, l'équipe du professeur Alexander Eggermont (Institut Gustave-Roussy ; IGR) a mené une étude chez 951 patients ayant un mélanome sans métastases, mais à haut risque de rechute. Les résultats, présentés lundi 2 juin, confirment que cette immunothérapie réduit le risque de récurrence d'environ 25 % avec trois ans de recul. Mais le traitement a été mal toléré : plus d'un malade sur deux l'a interrompu en raison d'effets indésirables, et cinq sont décédés.

D'autres anticorps monoclonaux, semble-t-il bien moins toxiques que l'ipilimumab et efficaces chez une proportion plus importante de patients, font l'objet d'essais dans de multiples indications. Il en va ainsi des anticorps anti PD-1 (pour *programmed death* ou « mort programmée ») et anti PDL-1, que développent plusieurs laboratoires. « *Agir au niveau des récepteurs CTLA-4, c'est comme activer de jeunes soldats qui vont courir partout, mais de façon un peu désordonnée, alors que viser les récepteurs PD-1 permet de réveiller les lymphocytes*

plus spécifiquement sur le site de la tumeur, explique le docteur Caroline Robert (IGR), qui a participé à plusieurs essais sur les mélanomes. *Les anti PD-1 agissent plus rapidement, et de façon plus ciblée que l'ipilimumab, ce qui explique leur meilleure tolérance.* »

Ainsi, le nivolumab (anti PD-1 du laboratoire BMS) obtient, seul ou en association avec l'ipilimumab, des résultats encourageants dans les mélanomes, mais aussi dans d'autres cancers en phase avancée, notamment du rein et du poumon. Un autre anti-PD1 (MK 3475 ou pembrolizumab, Merck) s'est, lui, montré très efficace lors d'un essai chez plus de 400 patients atteints de mélanomes métastatiques, dont la moitié n'avait pas eu d'amélioration avec l'ipilimumab. Une régression tumorale a été obtenue chez un malade sur trois, avec un effet durable dans le temps et « seulement » 12 % d'effets indésirables graves.

Plusieurs de ces molécules devraient rapidement obtenir une autorisation de mise sur le marché, mais beaucoup de questions restent en suspens. Pour l'heure,

POURQUOI CET ARTICLE ?

Plusieurs stratégies thérapeutiques existent pour lutter contre les cancers : la chirurgie, qui consiste à éliminer physiquement les tumeurs et les métastases ; la chimiothérapie, qui tue les cellules cancéreuses avec des molécules cytotoxiques ; la radiothérapie, qui détruit les cellules cancéreuses en les expo-

sant à des radiations, et, enfin, l'immunothérapie.

L'immunothérapie vise à utiliser le système immunitaire du patient pour qu'il élimine lui-même les cellules tumorales. Le concept de l'immunothérapie est ancien mais n'a pas encore totalement prouvé son efficacité thérapeutique. Actuellement, certains traitements intéressants sont à l'essai. **Cet**

article détaille les différentes stratégies en cours d'étude en immunothérapie : certaines d'entre elles semblent particulièrement prometteuses. La progression des connaissances des mécanismes cancéreux d'une part, et des mécanismes immunitaires d'autre part devrait permettre d'améliorer l'approche immunothérapeutique du traitement des cancers.

il n'existe pas de biomarqueur idéal pour prédire leur efficacité chez un malade donné. Reste aussi à déterminer les meilleures combinaisons thérapeutiques, la durée optimale du traitement. Sans compter les enjeux économiques : l'imilimumab coûte environ 80 000 euros pour quatre injections.

L'immunothérapie anticancer peut aussi faire appel à diverses approches de thérapie cellulaire, réalisées à façon. Une équipe américaine a ainsi présenté à l'ASCO une stratégie originale pour traiter des cancers du col utérin métastasés, consécutifs à une infection à papillomavirus (HPV). Pour chacune des neuf

patientes, les chercheurs ont prélevé un échantillon tumoral, isolé des lymphocytes T qu'ils ont fait proliférer en présence d'antigène d'HPV avant de les réinjecter. Une rémission complète a été obtenue chez deux femmes (avec un recul de onze et dix-huit mois), et une réponse partielle chez une troisième, au

prix d'effets secondaires parfois sévères. L'étude doit se poursuivre avec de nouveaux patients, atteints d'un cancer du col utérin ou d'autres tumeurs liées à une infection par HPV, au niveau de la gorge ou de l'anus. ■

Sandrine Cabut
(4 juin 2014)

Une piste pour éradiquer le VIH de l'organisme

De nouveaux traitements pourraient éliminer les « réservoirs viraux » dans lesquels le virus du sida persiste.

Il est jusqu'ici impossible, malgré un traitement antirétroviral, d'éradiquer de l'organisme le virus de l'immunodéficience humaine (VIH). Cet objectif deviendra-t-il réalisable à une échéance de cinq à dix ans ? L'éventualité a été évoquée lors de la Conférence sur les rétrovirus et les infections opportunistes (CROI) qui s'est tenue à Seattle (États-Unis) du 5 au 8 mars. Le professeur Christine Rouzioux, virologue à l'hôpital Necker (Paris), a présenté une synthèse des travaux mardi 13 mars, lors d'une conférence de presse de l'Agence nationale de recherche sur le sida et les hépatites virales (ANRS). L'administration d'une combinaison d'antirétroviraux rend le VIH indétectable dans le sang. Cependant, le virus n'a pas disparu et persiste à l'état latent dans certaines cellules. Il est notamment intégré au génome des lymphocytes T CD4 dans les ganglions lymphatiques, l'intestin et le cerveau, qui constituent son réservoir.

Courtney Fletcher (université du Nebraska) a fait part de données accréditant l'hypothèse selon laquelle « une pénétration inadéquate des médicaments contribuerait à une répllication occulte du VIH, qui entretient l'infection par ce virus ».

La taille de ce réservoir viral peut être contrôlée de telle manière

qu'elle demeure réduite. C'est ce qui se produit chez les personnes capables spontanément de conserver l'infection à l'état latent. Il en va de même chez des patients mis très précocement sous antirétroviraux, tels ceux de l'essai ANRS « Visconti », dès la primo-infection par le VIH (dans les quinze jours ou les tout premiers mois suivant la contamination).

Réactivation du virus

« Les travaux présentés à la CROI ont montré qu'un traitement très précoce diminuait fortement le réservoir. Ce qui est cohérent avec ce que nous avons observé chez les patients de l'essai "Visconti" : plusieurs années après l'interruption du traitement, qui avait duré en moyenne trois ans, la charge virale demeurait indétectable », indique Christine Rouzioux.

Mais comment éradiquer le VIH ?

« Toute la difficulté est que les cellules dans lesquelles le VIH persiste à l'état latent sont des lymphocytes CD4 dotés de la mémoire immunitaire et possédant une longue durée de vie. Ces cellules sont très bien protégées par le système immunitaire », souligne Christine Rouzioux. Comme il est inconcevable d'éliminer tous les CD4, une autre stratégie est explorée. Sharon Lewin (Monash University, Melbourne) l'a présentée à Seattle : utiliser des agents pour réactiver les cellules à l'état latent. Cela déclencherait à nouveau la répllication virale, et les antirétroviraux pourraient alors agir.

Plusieurs médicaments employés contre certains cancers, appartenant à la classe des inhibiteurs d'une enzyme, l'histone déacétylase (HDACi), ont été testés avec succès sur un petit nombre de patients. « Nous n'en sommes qu'aux

balbutiements. Surtout, il y a des interrogations éthiques majeures à recourir à ces traitements lourds chez des patients qui se portent plutôt bien », tempère Christine Rouzioux.

Les chercheurs estiment indispensable que pouvoirs publics et industriels s'impliquent fortement dans ce défi majeur. La Société internationale sur le sida (IAS), qui rassemble la communauté scientifique dans ce domaine, et Françoise Barré-Sinoussi, qui en prendra la présidence en juillet, lancent l'initiative « HIV Cure », centrée sur la question des réservoirs viraux. Un accord-cadre sur cette recherche va être signé entre plusieurs institutions publiques, notamment l'ANRS et les instituts nationaux de la santé américains. ■

Paul Benkimoun
(17 mars 2012)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Ces dernières années, le développement des trithérapies contre le VIH est à l'origine d'un progrès considérable dans la prise en charge des patients infectés par ce virus. La prise de traitements antirétroviraux, débutée à un stade précoce de l'infection, retarde,

voire empêche, le développement du stade sida chez le patient. Cependant, chez le patient séropositif pour le VIH et traité par trithérapie, si la charge virale devient très faible voire inférieure au seuil de détection, le virus reste présent dans l'organisme. Le patient est donc capable de transmettre le virus. **L'article présente les pistes envisagées**

pour éliminer totalement le VIH de l'organisme, en ciblant les réservoirs de l'organisme abritant ce rétrovirus. Il s'agit pour l'instant de pistes de recherches à approfondir. Si ces pistes se révélaient prometteuses, elles pourraient contribuer à faire régresser l'épidémie, alors qu'un vaccin efficace tarde toujours à être mis sur le marché.

ZOOM SUR...

LA DISPARITION
DES MALADIES

De nouvelles maladies apparaissent (sida, etc.), certaines disparaissent, avec ou sans vaccination. La peste, à l'origine d'épidémies meurtrières au Moyen Âge en Europe, a disparu au XVIII^e siècle car les individus présentant une meilleure réponse immunitaire contre la peste ont été sélectionnés d'un point de vue évolutif. En octobre 1977, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a déclaré totalement éradiquée une maladie virale très contagieuse : la variole ou « petite vérole ». Cette éradication est le résultat de campagnes de vaccination massive mises en œuvre à partir des années 1960 sur tous les continents.

Actuellement, seuls quelques laboratoires au monde sont autorisés à conserver des échantillons du virus de la variole. Cette conservation fait débat au sein de la communauté scientifique : quel est l'intérêt de conserver ce virus particulièrement dangereux pour les populations actuelles qui n'y ont jamais été exposées ?

LE VACCIN DE PASTEUR
CONTRE LA RAGE

En 1885, un enfant, Joseph Meister, âgé de 9 ans, fut mordu par un chien enragé : il consulta rapidement Louis Pasteur, bien avant que sa rage soit déclarée. Pendant une dizaine de jours, Pasteur lui inocula une suspension de moelle osseuse de lapin mort de la rage et Joseph Meister ne développa pas cette maladie mortelle. Les injections ont permis à son système immunitaire de développer une réponse immunitaire primaire avant que se développe le virus. Puis, la réponse immunitaire secondaire a permis à l'enfant de lutter contre le virus contracté lors de la morsure. Par la suite, Pasteur fit même une injection de l'agent responsable de la rage à l'enfant pour prouver la protection conférée par la vaccination.

Le phénotype immunitaire au cours de la vie

Le phénotype immunitaire d'un individu est sa capacité à répondre aux agents infectieux qu'il rencontre. Or, cette capacité de réponse n'est pas figée dans le temps mais évolue au cours de la vie : certaines maladies ne peuvent pas être contractées deux fois et la vaccination confère une protection contre des infections. Comment expliquer l'évolution du phénotype immunitaire au cours de la vie ?

Le début de la vaccination

Les mécanismes de la réaction inflammatoire et de la mémoire du système immunitaire ne sont connus que depuis le XX^e siècle, mais la réaction de l'organisme contre les pathogènes avait déjà été observée et étudiée de façon empirique. Depuis l'Antiquité, on a remarqué que les survivants d'une épidémie pouvaient être protégés contre l'épidémie suivante de la même maladie. Guérir d'une maladie permet donc d'être protégé contre celle-ci des années durant. Cependant, cette constatation empirique est loin d'être systématique : ainsi, on peut à nouveau être atteint par le rhume, alors qu'on en avait guéri l'année précédente. Pourquoi existe-t-il une mémoire immunitaire contre certaines maladies mais pas contre d'autres ? La lutte contre la variole permet de répondre à cette question. Avant le XVII^e siècle, les médecins pratiquaient la variolisation, qui consistait à inoculer à des patients sains de vieilles pustules desséchées de varioleux. Cette pratique présentait un risque mais permettait une bonne protection contre une épidémie de cette maladie mortelle. Un médecin anglais, **Edward Jenner**, a constaté que les paysans au contact des vaches contractaient une maladie bovine proche de la variole : la vaccine, qui les protégeait contre les épidémies de variole. En 1796, Jenner eut l'idée (selon un protocole que l'éthique médicale réprouverait aujourd'hui) d'injecter à un jeune garçon des extraits de pustules, prélevés sur une jeune vachère atteinte par la vaccine. Il inocula ensuite la variole au jeune garçon, qui ne contracta pas la maladie. Cette découverte à l'orée du XIX^e siècle ouvrit la porte à ce qui fut appelée la **vaccination**. Les travaux de **Louis Pasteur** sur le choléra des poules et sur la rage ont confirmé la protection que l'injection d'un agent ressemblant à l'agent pathogène confère à l'organisme contre ce même agent pathogène.

Le principe de la vaccination

La première rencontre du système immunitaire avec un agent pathogène déclenche une **réponse immunitaire dite « primaire »** qui consiste en la mise en place de **cellules effectrices** (plasmocytes sécrétant d'anticorps, lymphocytes T auxiliaires, lymphocytes T cytotoxiques) spécifiques de cet agent. Lors d'un contact ultérieur avec le même agent infectieux, la **réponse immunitaire dite « secondaire »** est plus rapide et quantitativement plus importante. En effet, la réaction immunitaire primaire s'accompagne de la formation de cellules immunitaires mémoires à longue durée de vie : il s'agit des **lymphocytes T et B mémoires et des plasmocytes mémoires**. Les études ont montré que certaines cellules immunitaires, dont certains lymphocytes B et T, peuvent vivre très longtemps, au moins une dizaine d'années, dans l'organisme. Ainsi, lors d'un contact ultérieur avec l'agent infectieux, les LT et LB mémoires réagissent beaucoup plus vite à l'agent infectieux en proliférant et en se différenciant beaucoup plus rapidement que les LT et LB naïfs, qui n'ont jamais été activés par l'agent infectieux. L'existence de cette réaction secondaire intense et rapide nécessite que les LT et LB mémoires réagissent à des antigènes proches de ceux les ayant activés la première fois.

Le principe du **vaccin** utilise cette **mémoire immunitaire** : le patient est exposé à un pathogène modifié et non dangereux (pathogène tué, inactivé ou morceau de pathogène) mais immunogène, c'est-à-dire entraînant une réaction immunitaire suffisante pour former des LB et des LT mémoires.

Il est souvent nécessaire d'effectuer des **rappels de vaccination** pour entretenir cette mémoire immunitaire. Ainsi, par la vaccination, le patient qui n'a pas développé la maladie causée par l'agent infectieux possède un **phénotype immunitaire** qui lui permet lors d'un contact ultérieur avec l'agent infectieux de déclencher une réponse immunitaire secondaire, suffisamment rapide et intense, pour lui éviter de tomber malade.

DATES CLÉS

L'immunologie

1796 : Jenner pratique les premières vaccinations contre la variole avec la vaccine bovine.

1878 : mise au point par Pasteur de la vaccination avec des agents pathogènes.

1882 : découverte de la phagocytose par Metchnikoff.

1890 : isolement des anticorps par von Behring et Kitasato.

1980 : identification des gènes codants pour les LCR des LT et BCR des LB.

1983 : identification du VIH par l'équipe de Montagnier.

2011 : prix Nobel de Médecine décerné à Hoffmann, Beutler et Steinmann pour leurs travaux sur l'immunité innée (récepteurs Toll et TLR, cellules dendritiques).

REPÈRE

Les vaccinations

- Diphtérie, tétanos, coqueluche, poliomyélite (vaccination obligatoire) : 3 injections à 2, 3 et 4 mois, puis 4 rappels avant 18 ans. Rappels tous les dix ans chez l'adulte.

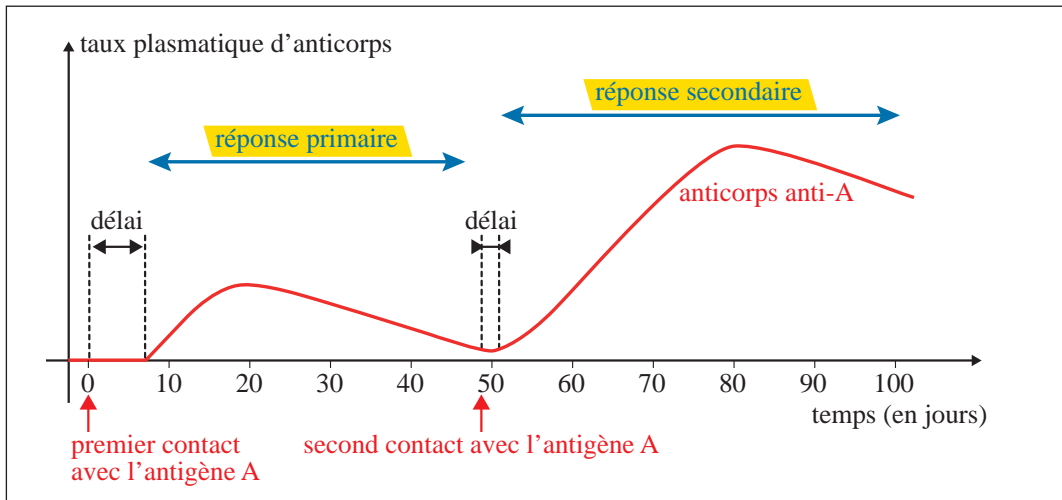
- Rougeole, oreillons, rubéole : 1 injection à 12 mois, puis une 2^e entre 13 et 24 mois.

- Hépatite B : 3 injections à 2, 4 et 16-18 mois.

- Tuberculose : vaccination non obligatoire pour l'entrée en collectivité depuis 2007 mais recommandée pour les enfants à risque élevé de tuberculose (Île-de-France, Guyane, Mayotte, antécédents familiaux de tuberculose, etc.) : injection dès la naissance et injections supplémentaires entre 3 et 11 mois, et après 12 mois si nécessaire.

- Grippe saisonnière : vaccination recommandée à partir de 65 ans, aux femmes enceintes, aux personnes avec diverses pathologies (dont l'obésité) : une injection tous les ans.

- De nombreuses autres vaccinations existent (coqueluche, varicelle, hépatite A, papillomavirus humain, pneumocoque, méningocoque, etc.) La vaccination est à adapter à chaque individu en fonction de son lieu de vie, de son mode de vie et de son état de santé.



Réponses primaire et secondaire du système immunitaire

L'adjuvant, déclencheur de la réaction innée, indispensable à la réaction adaptative

De nombreux vaccins contiennent, en plus de l'agent vaccinant, un **adjuvant**. L'adjuvant est une substance (comme les sels d'aluminium ou le squalène) qui déclenche une réaction immunitaire innée, c'est-à-dire une **réaction inflammatoire**.

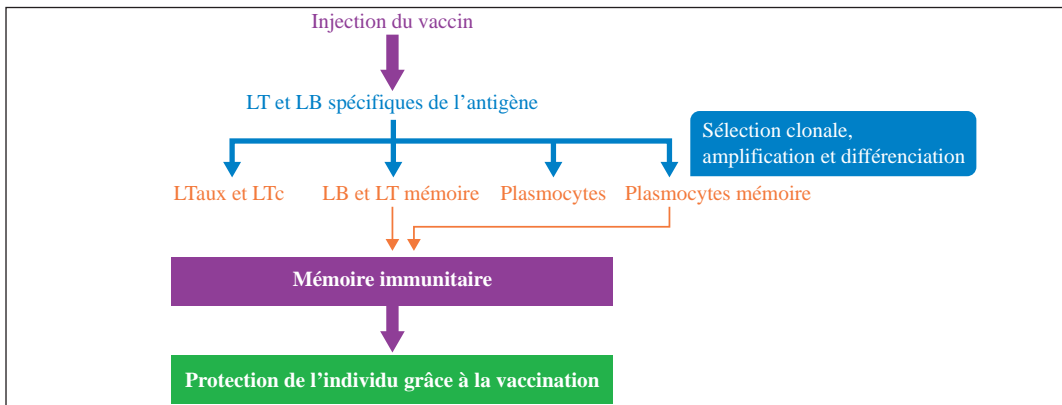
Cette réaction inflammatoire, due à la présence de l'adjuvant, stimule l'activation des cellules dendritiques, qui phagocytent l'agent vaccinant et le dégradent en antigène. Ces cellules dendritiques migrent vers les ganglions lymphatiques et présentent l'antigène exposé au sein de leur CMH aux lymphocytes T CD4. Ces LT CD4 activés par l'antigène deviennent des LT auxiliaires qui stimulent la différenciation des LB en plasmocytes sécréteurs d'anticorps et la différenciation des LT CD8 en LT cytotoxiques.

Ainsi l'adjuvant du vaccin déclenche la réaction innée indispensable à l'installation de la réaction immunitaire adaptative, dont l'intensité est accrue. Le rôle des adjuvants présents dans les vaccins souligne l'importance de la **coopération** entre l'immunité innée et l'immunité acquise.

La vaccination et la santé publique

La vaccination a pour objectif une **protection individuelle**, mais aussi une **protection collective**, et elle peut permettre une éradication du pathogène, à condition que l'homme soit le seul hôte de cet agent pathogène. C'est le cas en particulier de la variole, éradiquée sur tous les continents depuis 1979.

La **couverture vaccinale d'une population** représente le pourcentage de la population vaccinée. On considère qu'il faut environ une couverture vaccinale de 95 % pour qu'une maladie soit absente de la population. La vaccination constitue donc un véritable enjeu de santé publique. ■



Vaccin et mémoire immunitaire

DEUX ARTICLES DU MONDE À CONSULTER

- **Vaccin contre l'hépatite B** p. 81 (P. Be, 18 février 2012)
- **L'aluminium sur la sellette** p. 81-82 (Stéphane Foucart, 16 avril 2014)

ZOOM SUR...

VACCIN ANTI-VIH :
DES PISTES, MAIS
UN VACCIN EFFICACE
TOUJOURS ATTENDU

L'isolement du VIH en 1983 avait ouvert la perspective de l'obtention rapide d'un vaccin. Mais l'extrême variabilité du VIH a jusqu'à maintenant rendu difficile la mise au point d'un vaccin. Les traitements antirétroviraux (comme le Truvada) ont récemment montré qu'ils réduisaient le risque de transmission du VIH par voie sexuelle, mais à la condition d'être pris quotidiennement. En 2009, des essais cliniques d'un vaccin anti-VIH ont montré une efficacité partielle (31 %) mais intéressante. Les chercheurs progressent actuellement dans l'explication de ces résultats et espèrent pouvoir améliorer l'efficacité de ce vaccin. Actuellement, aux États-Unis, l'efficacité d'un autre vaccin ayant montré son innocuité est en cours d'étude chez l'homme.

CANCERS ET
IMMUNOTHÉRAPIE

L'immunothérapie passive consiste à administrer au malade des anticorps artificiels dits « monoclonaux », ayant une cible moléculaire précise à la surface des cellules cancéreuses dans l'objectif de détruire ces dernières. Des anticorps contre des facteurs qui interviennent dans la multiplication des cellules sont également utilisés pour bloquer la prolifération cellulaire. L'immunothérapie active vise à mobiliser ou à renforcer les ressources du système immunitaire pour accroître l'élimination des cellules cancéreuses. Elle consiste à stimuler l'activité globale du système immunitaire du malade en utilisant des cytokines (interféron α par exemple). Des cellules tumorales du patient peuvent être cultivées pour les rendre plus immunogènes avant de les réinjecter. Enfin les cellules immunitaires peuvent être modifiées pour les rendre plus efficaces contre les cellules tumorales.

Partie 2.1 : Diagnostic immunitaire chez un enfant

L'intitulé complet du sujet

Entre 3 et 18 mois, un enfant a été admis de très nombreuses fois à l'hôpital pour diverses infections bactériennes graves. Il a reçu tous les vaccins (tétanos, diphtérie, rougeole, etc.) prévus à l'âge de 2, 3 et 4 mois. Des analyses ont été réalisées et ont permis de déterminer qu'il était atteint d'une maladie héréditaire (la maladie de Bruton). Exploitez les informations saisies dans le document proposé afin d'expliquer pourquoi l'organisme de cet enfant est incapable de lutter contre les infections bactériennes.

Le document

Résultats des examens de laboratoire ayant permis le diagnostic

Vaccins reçus	Dosage des anticorps** spécifiques en réponse aux vaccinations	
Anatoxine* tétanique	Pas d'anticorps spécifiques détectés	
Anatoxine diphtérique	Pas d'anticorps spécifiques détectés	
Virus de la rougeole	Pas d'anticorps spécifiques détectés	
	Dosage des immunoglobulines** du sérum chez le patient	Valeurs normales pour l'âge de 18 mois
Immunoglobulines G	0,17 g.L ⁻¹	5,5 à 10,0 g.L ⁻¹
Immunoglobulines A	Non détectées	0,3 à 0,8 g.L ⁻¹
	Sous-population lymphocytaire du sang	Valeurs normales pour l'âge de 18 mois
Lymphocytes totaux	3,05.10 ⁷ L ⁻¹	2,5.10 ⁷ g.L ⁻¹ à 5,10 ⁷ g.L ⁻¹
Lymphocytes B	0,03.10 ⁷ L ⁻¹	0,1.10 ⁷ g.L ⁻¹ à 0,4.10 ⁷ g.L ⁻¹
Lymphocytes T	3,02.10 ⁷ L ⁻¹	1,5.10 ⁷ g.L ⁻¹ à 3,0.10 ⁷ g.L ⁻¹

D'après H. Chapel, M. Haeney, S. Misbah, N. Snowden, *Immunologie clinique*

*Les anatoxines sont des protéines bactériennes.

**Anticorps et immunoglobulines sont des synonymes ; ces molécules sont produites par les lymphocytes B.

Ce qu'il ne faut pas faire

- Se contenter de saisir les données du document sans les mettre en relation et sans expliquer l'origine des infections bactériennes répétées.

Proposition de corrigé

L'enfant a reçu tous les vaccins prévus à l'âge préconisé, mais les tests réalisés montrent l'absence d'anticorps

spécifiques dirigés soit contre l'anatoxine diphtérique (vaccination contre la diphtérie), soit contre l'anatoxine tétanique (vaccination contre le tétanos), soit contre le virus de la rougeole (vaccination contre la rougeole). La vaccination n'a pas entraîné l'apparition d'anticorps dirigés spécifiquement contre les antigènes contenus dans les vaccins comme cela aurait dû être le cas. La vaccination n'a donc pas été effective et elle n'a pas pu conférer de protection.

Le taux d'immunoglobulines G de l'enfant est très faible (0,17 g.L⁻¹ alors que le taux normal est de 5,5 à 10,0 g.L⁻¹) et les immunoglobulines A ne sont pas détectées (leur taux normal est de 0,3 à 0,8 g.L⁻¹). Cet enfant produit donc très peu d'immunoglobulines, ce qui explique ses graves infections microbiennes

répétées et l'inefficacité de la vaccination. Enfin, l'étude des populations lymphocytaires de l'enfant montre que le nombre de lymphocytes totaux est normal chez cet enfant (3,05.10⁷ L⁻¹ pour un taux normal de 2,5.10⁷ L⁻¹ à 5.10⁷ L⁻¹). Mais si le taux de LT est dans la norme (3,02.10⁷ L⁻¹ pour un taux normal de 1,5.10⁷ L⁻¹ à 3,0.10⁷ L⁻¹), le taux de LB de 0,03.10⁷ L⁻¹ est très faible, représentant environ un tiers de la valeur minimale. Ainsi cet enfant présente une anomalie importante du nombre de LB. Son très faible taux de LB ne lui permet pas de produire assez d'anticorps pour lutter efficacement contre des infections bactériennes. De plus, sa carence en LB rend inefficace toute vaccination : il est donc susceptible de contracter des maladies que les autres enfants vaccinés ne déclarent pas. Cette très faible quantité de LB dans son organisme a une origine héréditaire. ■

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Étude de documents

- Mise en évidence de la mémoire immunitaire.
- Justification du calendrier de vaccination.
- Étude de mise au point de vaccins (VIH, trypanosome, paludisme, vaccin anti-tumeur, etc.).
- Étude du rôle des adjuvants.

Vaccin contre l'hépatite B

Cette controverse fait de la France une exception : des réticences à la vaccination contre l'hépatite B persistent, bien que les études n'aient pas établi l'existence d'une association statistiquement significative avec la survenue d'une affection de type sclérose en plaques (SEP).

Lancée en 1994, la campagne de vaccination devait concerner les nourrissons et les enfants âgés de 10 à 11 ans. En raison d'un discours alarmiste, notamment des fabricants de vaccins, elle a massivement été étendue aux adultes et à la tranche d'âge la plus susceptible de développer une SEP.

Aucun dispositif spécifique de suivi prospectif n'ayant été prévu par les autorités sanitaires, la seule possibilité pour tenter d'en avoir le cœur net était de réaliser une étude rétrospective des cas-témoins.

« Lorsque nous avons présenté nos résultats à Bernard Kouchner, secrétaire d'État à la Santé en 1998, il nous a dit : "En quelque sorte, vous me mettez dans la merde." Nous avons en effet retrouvé un excès de risque de SEP chez les personnes vaccinées mais qui n'était pas statistiquement significatif et ne permettait pas de conclure », se

souvient Bernard Bégaud (université Bordeaux Segalen).

Les différentes études effectuées ne mettent pas en évidence de lien. Elles ne signifient pas pour autant qu'il soit exclu que le vaccin précipite l'apparition d'une SEP sous-jacente. « Cette affaire illustre bien que, même si l'on employait la meilleure méthodologie du monde,

l'épidémiologie ne peut pas rattraper le fait que l'on ne se soit pas organisé pour disposer de données de suivi beaucoup plus exhaustives », souligne Bernard Bégaud.

P. Be
(18 février 2012)

POURQUOI CET ARTICLE ?

L'hépatite B est une infection virale qui, dans environ un cas sur dix, est à l'origine d'un cancer du foie. Le virus de l'hépatite B se transmet par voie sexuelle ou sanguine. Le vaccin existe depuis 1982 et confère une protection efficace. Il est même obligatoire pour certains métiers, comme les

professionnels de la santé. Mais en France, des cas de sclérose en plaques, une maladie auto-immune dans laquelle le système immunitaire détruit les propres cellules de l'organisme, semblent être apparus après vaccination contre l'hépatite B. Cette suspicion de corrélation n'est observée qu'en France. **Cet article fait le point de manière synthétique sur la vaccination contre l'hépatite B.**

La causalité entre la sclérose en plaques et la vaccination contre l'hépatite B n'a pas été démontrée, car les études épidémiologiques ne permettent pas de conclure avec certitude. Le sujet demeure controversé, de par l'absence de résultats scientifiques clairs, et s'est traduit par une baisse importante de la couverture vaccinale contre l'hépatite B ces dernières années en France.

L'aluminium sur la sellette

La polémique en cours sur le Gardasil s'inscrit, partiellement, dans une controverse plus large sur l'utilisation de l'aluminium comme adjuvant vaccinal. L'aluminium est utilisé depuis plus de quatre-vingts ans dans des vaccins pour augmenter la réponse immunitaire, mais il est soupçonné, depuis quelques années, d'être à l'origine de la myofasciite à macrophages (MFM), une maladie rare identifiée et décrite pour la première fois à la fin des années 1990 et dont les spécialistes tenaient congrès, vendredi 11 avril à Paris.

Cette maladie est caractérisée par des douleurs musculaires diffuses, des troubles

cognitifs (en particulier une atteinte de la mémoire de travail) et une fatigue invalidante que le sommeil ne répare pas. Selon les spécialistes de cette pathologie, le diagnostic est posé lorsqu'en plus de ce tableau clinique, une biopsie pratiquée sur le site de l'injection vaccinale révèle la présence de nanocristaux d'hydroxyde d'aluminium piégés dans les macrophages – ces « éboueurs » du système immunitaire qui phagocytent les corps étrangers ou les débris de cellules mortes. Chez la grande majorité des sujets, ces lésions spécifiques disparaissent quelques semaines après la vaccination, mais chez une

petite minorité, elles persistent plusieurs mois ou années.

Intenses discussions

Cependant, le lien de causalité entre cette présence d'aluminium et l'émergence de la maladie est controversé. L'affaire a été discutée en janvier à l'Académie de médecine. Le professeur Romain Gherardi (hôpital Henri-Mondor, Inserm, université Paris-Est), codécouvreur de la MFM, a été invité à présenter devant ses pairs le résultat de ses travaux sur le sujet. Selon lui, les macrophages agissent – chez certaines personnes – comme des chevaux de Troie. Lorsqu'elles

s'avèrent incapables d'éliminer l'hydroxyde d'aluminium qu'elles ont phagocyté, ces cellules immunitaires sont mises en circulation dans l'organisme et contribuent à transporter le métal vers des organes distants – notamment le cerveau –, où elles peuvent causer des réactions inflammatoires.

L'une des principales objections faites à ce modèle est celle de la dose. « Il y a très peu d'aluminium dans un vaccin, typiquement moins d'un milligramme, rappelle Jean-Pierre Goullé, professeur de toxicologie à l'université de Rouen, alors que nous en ingérons plus de dix fois plus chaque jour dans

notre alimentation. » Pour M. Gherardi, les mécanismes en jeu diffèrent – selon que l'aluminium est ingéré ou qu'il est injecté directement dans le muscle. En outre, précise M. Gherardi, la forme chimique prise par le métal

(ionique dans l'alimentation et cristalline dans les adjuvants vaccinaux) change la réponse de l'organisme. Manque cependant une donnée importante pour emporter l'adhésion de l'ensemble de la communauté

POURQUOI CET ARTICLE ?

La faible participation à la campagne de vaccination contre le virus H1N1 en 2009 a montré les réticences d'une partie de la population française à se faire vacciner. Un des arguments souvent utilisé contre la vaccination fut la dangerosité associée à l'adjuvant utilisé : les sels d'aluminium. Ces sels sont accusés d'être responsables d'une pathologie appelée « myofasciite à macrophages ». Lors de la vaccination, les sels d'aluminium déclenchent la réponse immunitaire innée,

ce qui potentialise l'effet du vaccin. Cependant, les particules d'aluminium, phagocytées par les macrophages, resteraient longtemps dans ces cellules immunitaires et seraient à l'origine de troubles affectant différents tissus, dont le tissu nerveux. **L'article fait le point sur l'état des recherches sur le devenir de l'aluminium dans l'organisme suite à une vaccination et met également en lumière la difficulté d'établir un lien de causalité – ou d'absence de causalité – entre l'aluminium et les troubles associés par les études épidémiologiques.**

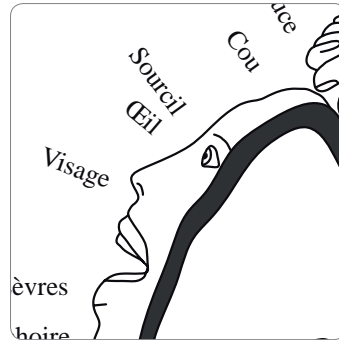
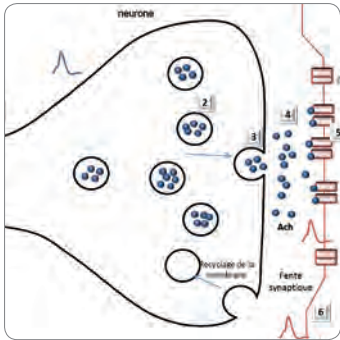
scientifique et médicale, ajoute M. Goullé : le dosage d'aluminium dans les tissus cérébraux de personnes décédées atteintes de MFM.

« Nous avons connu des controverses semblables il y a quelques années avec le mercure, autre métal connu pour être neurotoxique et utilisé comme adjuvant vaccinal, assure M. Goullé. Il lui a notamment été reproché d'augmenter les risques d'autisme chez les très jeunes enfants. Or le mercure a depuis été interdit pour cet usage aux Etats-Unis, ce qui n'a pas empêché l'augmentation de l'incidence de l'autisme de se poursuivre. » Reste que la question des adjuvants vaccinaux aluminiques et de leurs effets – sur certaines populations seulement – est au centre d'intenses discussions. En 2011, le

professeur Yehuda Shoenfeld (université de Tel-Aviv, Israël), l'un des papes de l'auto-immunité, a proposé de réunir un certain nombre de pathologies, dont la MFM, sous le terme ASIA (syndrome auto-immun-inflammatoire induit par les adjuvants). Très controversée, cette notion connaît néanmoins un certain succès dans la littérature scientifique. Le risque étant que ces débats soient récupérés par les mouvements anti-vaccins. A chaque intervention publique, le professeur Shoenfeld le rappelle : « La vaccination est ce que la médecine a donné de meilleur à l'humanité au cours des trois derniers siècles ». ■

Stéphane Foucart
(16 avril 2014)

NEURONE ET FIBRE MUSCULAIRE : LA COMMUNICATION NERVEUSE



NOTIONS CLÉS

NEUROMÉDIATEUR,
NEUROTRANSMETTEUR

Molécule libérée par un neurone au niveau d'une synapse et capable de transmettre le message nerveux à la cellule post-synaptique.

SYNAPSE
NEUROMUSCULAIRE

Également appelée « jonction neuromusculaire » ou « plaque motrice », la synapse neuromusculaire est la zone de contact entre la terminaison synaptique d'un motoneurone et une cellule musculaire. L'arrivée d'un message nerveux à l'extrémité du motoneurone peut déclencher la contraction de la cellule musculaire.

ZOOM SUR...

LE SYSTÈME NERVEUX

Ensemble de cellules, les neurones, qui transmettent l'information nerveuse dans l'organisme. Chez les vertébrés, on distingue :

– le système nerveux central comprend deux centres nerveux : le cerveau et la moelle épinière. Ces centres nerveux sont reliés entre eux par des faisceaux de fibres. Il contrôle l'ensemble du système nerveux ;

– le système nerveux périphérique, qui est formé de nerfs reliant la périphérie de l'organisme et le système nerveux central.

LA MOELLE ÉPINIÈRE

Centre nerveux situé sous l'encéphale appartenant au système nerveux central. Dans la moelle épinière, la substance blanche, périphérique, correspond aux axones des neurones, tandis que la substance grise, centrale, contient les corps cellulaires des neurones. Elle est recouverte par des membranes, les « méninges », et abrite en son centre le canal de l'épendyme. Au niveau des racines dorsales (ou postérieures) de la moelle épinière arrivent les fibres nerveuses sensorielles, dont les corps cellulaires des neurones sont contenus dans les ganglions rachidiens. Au niveau des racines ventrales (ou antérieures) sortent les fibres nerveuses motrices.

Le réflexe myotatique, un exemple de commande réflexe du muscle

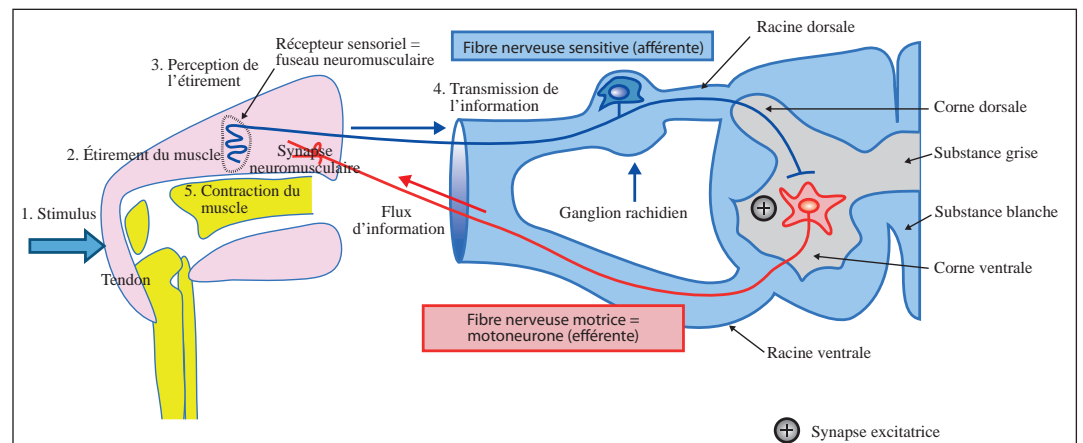
Rester debout, ne pas perdre l'équilibre, maintenir notre posture malgré la pesanteur nécessitent un fonctionnement permanent et adapté de nos muscles extenseurs et fléchisseurs. Les muscles impliqués dans la posture comme dans le mouvement sont des muscles striés squelettiques, attachés au squelette par des tendons. Le mouvement des muscles se répercute sur le mouvement du squelette au niveau des articulations. Dans le cas de la posture, ces mouvements ne sont pas commandés consciemment, ce sont des réflexes musculaires. Comment les réflexes myotatiques commandent-ils la contraction de certains muscles ?

Le réflexe myotatique : un outil diagnostique

Afin de vérifier l'état de tension qui s'exerce sur les muscles pour s'opposer à l'action de la gravité sur le corps humain, c'est-à-dire pour tester le **tonus musculaire**, le médecin peut frapper avec un marteau approprié soit au niveau du tendon d'Achille (au-dessus du talon), soit au niveau de la rotule (sous le genou) et observer le résultat. Le réflexe myotatique est une **réaction rapide et involontaire du corps**. En réaction à son propre étirement, le muscle se contracte automatiquement.

Diverses expériences historiques ont permis de comprendre le mécanisme du **réflexe myotatique**. Chez un chat dont la moelle épinière est sectionnée en-dessous de l'encéphale, le pincement de

la plante du pied déclenche un réflexe de retrait, impliquant une contraction du muscle. Mais le chat ne peut pas commander volontairement le mouvement de sa patte. Ainsi le réflexe myotatique ne fait pas intervenir le cerveau. Des expériences de sections des nerfs reliant les muscles à la moelle épinière et de stimulations après sections montrent que la **moelle épinière** est le **centre nerveux** des réflexes myotatiques. Ainsi, en tapant avec le marteau sur le tendon, le médecin étire artificiellement ce dernier : ce stimulus va être perçu par des récepteurs à l'étirement : les fuseaux neuromusculaires. Le message nerveux remonte via un **neurone sensoriel** du nerf rachidien qui rejoint, au niveau de sa racine dorsale (ou postérieure), la moelle épinière. Les corps cellulaires des neurones sensoriels



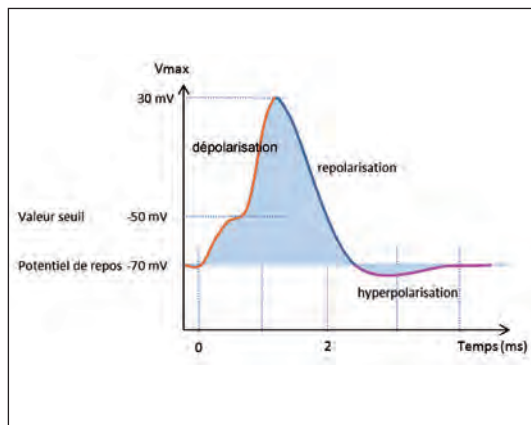
Circuit nerveux du réflexe myotatique

sont situés dans les ganglions rachidiens et leurs extrémités sont en contact, au niveau de la corne ventrale de la substance grise de la moelle épinière, avec le corps cellulaire d'un **motoneurone ou neurone moteur**. Cette zone de contact entre les deux neurones est appelée **synapse**. Le message nerveux est alors transmis du neurone sensoriel au motoneurone. Les motoneurones cheminent par les racines ventrales (ou antérieures) des nerfs rachidiens jusqu'aux organes effecteurs que sont les muscles. La zone de contact entre le motoneurone et le muscle est appelée **synapse neuromusculaire** ou **plaque motrice**. La stimulation du motoneurone entraîne la contraction du muscle.

Le trajet du message nerveux du récepteur sensoriel jusqu'à l'organe effecteur constitue un **arc réflexe**, qualifié de **monosynaptique**. En effet, durant tout le trajet nerveux, il n'existe qu'une seule synapse, située dans la substance grise de la moelle épinière, entre le neurone sensoriel et le motoneurone.

Le message nerveux

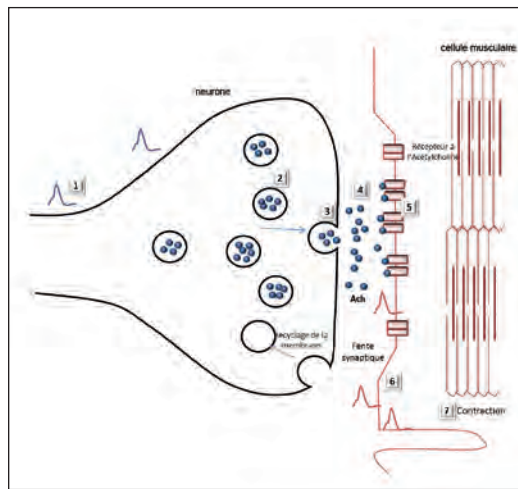
Toute cellule est caractérisée par un potentiel membranaire de repos, dont la valeur est de -70 mV. Dans certaines cellules dites « excitables » comme les **neurones**, cette valeur du potentiel membranaire peut être modifiée. Si la stimulation du neurone est suffisante, elle entraîne la modification transitoire de ce potentiel membranaire, qui constitue un potentiel d'action membranaire. Un **potentiel d'action** correspond à une inversion transitoire du potentiel du neurone. Le potentiel d'action est toujours identique : il a toujours la même durée et la même amplitude (loi du « tout ou rien »). Il se propage le long de l'axone du neurone de proche en proche sans s'atténuer. Un **message nerveux** consiste en une succession de potentiels d'action transmis le long de l'axone d'un neurone. Le message nerveux est donc un message de **nature électrique** dont l'intensité est codée en fréquence de potentiels d'action.



Le potentiel d'action : un message nerveux élémentaire

Du motoneurone à la cellule musculaire : la synapse neuromusculaire

Au niveau de la **synapse neuromusculaire**, zone de contact entre le motoneurone et le muscle, le message nerveux de nature électrique propagé dans le motoneurone est traduit au niveau de la fente synaptique en un message nerveux de **nature chimique**. Des **neuromédiateurs**, ici l'acétylcholine, sécrétés par le motoneurone se fixent sur des récepteurs spécifiques présents à la surface de la cellule musculaire. Cette fixation déclenche des potentiels d'action musculaires à l'origine de la **contraction du muscle**.



Fonctionnement de la synapse neuromusculaire

Le message nerveux se propage sous forme de potentiels d'action le long du motoneurone (1) jusqu'à la terminaison synaptique. Des vésicules chargées d'acétylcholine (2) libèrent, par exocytose (3), leur contenu en neuromédiateurs dans la fente synaptique (4). La fixation de l'acétylcholine sur ses récepteurs localisés sur la membrane de la cellule musculaire (5) génère un potentiel d'action musculaire (6). Ce potentiel d'action musculaire déclenche la contraction du muscle (7). L'acétylcholine est ensuite dégradée dans la fente synaptique et des molécules sont réinternalisées par la terminaison synaptique du motoneurone tandis que la membrane est recyclée par endocytose.

Ainsi, alors qu'au niveau d'un neurone, l'intensité du message nerveux, de nature électrique, est codée en fréquence de potentiel d'actions, au niveau de la synapse neuromusculaire, le message nerveux est de nature chimique et son intensité est codée en concentration de neuromédiateurs présents dans la fente synaptique. ■

UN ARTICLE DU MONDE À CONSULTER

• **Paralysés : des progrès à petits pas** p. 87
(Florence Rosier, 9 avril 2014)

NOTIONS CLÉS

MESSAGE NERVEUX

Succession de potentiels d'action qui se propagent le long des neurones. L'intensité du message nerveux est codée en fréquence de potentiels d'action.

SYNAPSE

Zone de contact entre un neurone et une autre cellule excitable (nerveuse ou musculaire) au niveau de laquelle le message nerveux est transmis par l'intermédiaire des neuromédiateurs.

NEURONE

Ou « cellule nerveuse », il est constitué d'un corps cellulaire contenant le noyau et de prolongements, l'axone et les dendrites. Les dendrites sont les prolongements qui reçoivent des messages nerveux tandis que l'axone conduit le message nerveux vers les terminaisons synaptiques. Un neurone est une cellule excitable (capable de répondre à un stimulus) et constitue l'unité de structure et de fonction du système nerveux.

POTENTIEL D'ACTION

Séquence stéréotypée de la modification du potentiel de membrane d'une cellule excitable. Le potentiel d'action est constitué d'une dépolarisation (le potentiel d'action atteint $+30$ mV), suivie d'une repolarisation puis d'une hyperpolarisation transitoire avant de revenir à la valeur du potentiel de repos (-70 mV). La durée du potentiel d'action est de quelques millisecondes. Le potentiel d'action constitue le signal élémentaire du message nerveux.

POTENTIEL DE MEMBRANE

Différence de potentiel électrique entre l'intérieur et l'extérieur de la membrane plasmique de toute cellule. Le potentiel membranaire dit « de repos » est le potentiel de membrane d'une cellule excitable en l'absence de stimulation et sa valeur est de -70 mV (l'intérieur de la cellule est plus électronégatif que l'extérieur de la cellule).

ZOOM SUR...

Les molécules agissant sur les synapses

De nombreuses substances naturelles ou de synthèse peuvent agir sur les synapses neuromusculaires et avoir une action biologique sur les muscles. Le mode d'action de ces molécules sur ces synapses est variable, comme l'illustrent les exemples suivants.

- Le curare est un poison végétal obtenu à partir de lianes d'Amérique du Sud, où il est utilisé, comme poison pour chasser par certaines tribus. Les pointes de flèches enduites de curare entraînent la paralysie de l'animal atteint. Comment le curare déclenche-t-il de graves paralysies musculaires ? Le curare se fixe à la place de l'acétylcholine sur les récepteurs de la synapse neuromusculaire et empêche le message nerveux de parvenir aux muscles. Le curare est donc un antagoniste de l'acétylcholine. Il est utilisé en médecine pour ses effets anesthésiants permettant le relâchement des muscles.

- La nicotine se fixe sur les récepteurs à acétylcholine et mime l'action de l'acétylcholine. Elle est qualifiée d'« agoniste » de l'acétylcholine.

- Le sarin est un gaz mortel, qualifié de « neurotoxique », qui déclenche une puissante contraction des muscles, c'est-à-dire une paralysie totale. Au niveau de la synapse neuromusculaire, l'acétylcholine fixée sur les récepteurs de la cellule musculaire est normalement éliminée par une enzyme appelée « acétylcholine estérase ». Or, le sarin inhibe cette enzyme : l'acétylcholine reste constamment fixée sur son récepteur, provoquant la contraction permanente des muscles. Le gaz sarin fut découvert en Allemagne en 1939 ; sa production et sa possession sont interdits par l'ONU depuis 1991. Depuis 2007, plus aucun pays ne devrait détenir ce gaz neurotoxique.

Partie 2.1 : La myasthénie

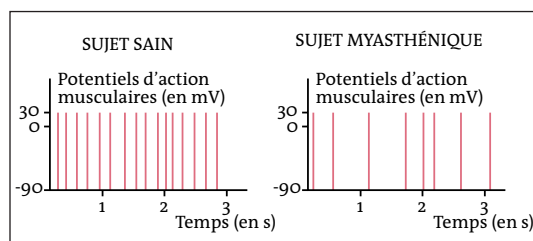
L'intitulé complet du sujet

La myasthénie est une maladie caractérisée par une faiblesse musculaire : les patients n'arrivent pas à contracter efficacement leurs muscles. Exploitez l'ensemble des résultats expérimentaux pour proposer une hypothèse expliquant la myasthénie.

Le document

Expérience 1

Sur un muscle d'un sujet sain et sur celui d'un sujet myasthénique, des électrodes réceptrices sont placées à proximité des synapses neuromusculaires. On enregistre alors les potentiels d'actions des cellules musculaires suite à une stimulation du motoneurone.



Expérience 2

L' α -bungarotoxine est une molécule toxique de venin de serpent, capable de se fixer sur des récepteurs à acétylcholine. L'injection d' α -bungarotoxine à une souris la rend incapable de contracter ses muscles.

Expérience 3

On étudie par autoradiographie la fixation de l' α -bungarotoxine radioactive sur les cellules musculaires d'un sujet sain et d'un sujet myasthénique ; le résultat est présenté dans le tableau suivant :

	sujet sain	sujet myasthénique
densité de α -bungarotoxine radioactive fixée sur les cellules musculaires	+++	+

Proposition de corrigé

Dans l'expérience 1, la stimulation du motoneurone déclenche un message nerveux transmis le long du motoneurone jusqu'à la synapse neuromusculaire, zone de jonction entre le motoneurone et le muscle. Chez le sujet sain, la stimulation du motoneurone entraîne un train soutenu de potentiels d'action musculaires (environ 6/9). Chez le sujet myasthénique, cette stimulation provoque un train de potentiels d'action musculaires de la fréquence plus faible (2/s). Chez le sujet malade, le message nerveux ne parvient donc pas correctement jusqu'au muscle.

L' α -bungarotoxine injectée à la souris l'empêche de contracter ses muscles. Cette toxine déclenche des symptômes similaires à ceux de la myasthénie. Or, l' α -bungarotoxine se fixe sur les récepteurs à acétylcholine de la synapse neuromusculaire. On émet donc l'hypothèse que l' α -bungarotoxine en se fixant sur les récepteurs à acétylcholine empêche celle-ci de s'y fixer : le message nerveux ne franchit pas la synapse, d'où l'absence de contraction des muscles de la souris. La myasthénie serait donc due à un dysfonctionnement de la transmission du message nerveux au niveau de la synapse neuromusculaire. D'après l'expérience 3, la densité de l' α -bungarotoxine fixée sur la cellule musculaire est moins importante chez le sujet myasthénique que chez le sujet sain. On en déduit que la quantité de récepteurs capables de fixer des molécules comme l' α -bungarotoxine et l'acétylcholine est plus faible chez le sujet myasthénique que chez le sujet sain. Ainsi la myasthénie serait due à un nombre insuffisant de récepteurs pouvant fixer leur neuromédiateur : le message nerveux du motoneurone n'entraîne pas alors une contraction efficace du muscle. ■

Ce qu'il ne faut pas faire

- Proposer une hypothèse sans justification s'appuyant sur les résultats expérimentaux.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Maîtrise des connaissances avec question de synthèse

– Montrer comment le test d'un réflexe musculaire est un outil de diagnostic des anomalies du fonctionnement du système neuromusculaire. La synthèse sera accompagnée d'un schéma présentant le réflexe myotatique.

Paralysés : des progrès à petits pas

Une équipe américaine est parvenue à faire exécuter des mouvements intentionnels des jambes à des patients paralysés des membres inférieurs.

Mardi 8 avril, la revue *Brain* a publié les saisissants résultats, chez l'homme, d'une stratégie de stimulation électrique de la moelle épinière. Quatre patients présentant une paralysie complète des membres inférieurs, après un accident survenu deux à quatre ans plus tôt, ont été capables d'exécuter de nouveau des mouvements intentionnels assez précis des jambes. Chaque année en France, de 1 000 à 1 500 personnes sont victimes de tels accidents — le plus souvent des adultes jeunes. A la suite d'une lésion plus ou moins complète de la moelle épinière, elles se retrouvent paralysées à des degrés variables.

Chez les quatre hommes suivis dans l'étude de *Brain*, une équipe américaine (université de Louisville et université de Californie à Los Angeles) a implanté un module de stimulation électrique dans « l'espace épidual » (entre la dure-mère et le canal vertébral) de la région lombo-sacrée. Là, précisément, où aboutissent les fibres des neurones qui contrôlent les muscles des jambes.

La stimulation continue de ces neurones a permis aux quatre patients de bouger de façon volontaire leur hanche, leur cheville, leursorteils... « Il faut abandonner l'idée qu'aucune récupération n'est possible après une paralysie complète », estime Susan Harkema, qui a conduit ce travail, financé par la Fondation Reeve et les NIH américains. Pour autant, « on ne peut imaginer qu'avec cette seule intervention, ces patients remarquent un jour dans la rue, tempère le professeur Grégoire Courtine, de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Mais c'est un résultat extrêmement prometteur : avec cette seule stimulation électrique, les quatre patients testés ont été capables de transformer une entrée auditive, par exemple la demande d'un médecin de bouger leur cheville, en une réponse motrice spécifique. »

Grégoire Courtine est un spécialiste de « neuro-réhabilitation », une stratégie combinant trois

approches : une stimulation chimique et une stimulation électrique de la moelle épinière, associées à un entraînement physique. En 2012, son équipe publiait dans *Science* une étude qui a fait grand bruit. Les chercheurs parvenaient à rétablir une marche volontaire chez des rats rendus paraplégiques par une lésion médullaire de la moelle épinière. Ils injectaient dans la moelle, sous la lésion, un « cocktail » de molécules actives (adrénaline, noradrénaline, dopamine...). Puis ils appliquaient une stimulation électrique sur la moelle épinière. Les rats paraplégiques ainsi stimulés étaient placés sur un tapis roulant, soutenus par un harnais robotisé. Après deux mois d'entraînement, ils avaient réappris à marcher volontairement — quand la lésion n'était pas complète. « Depuis 2012, nous avons progressé dans l'optimisation des technologies de stimulation électrique et d'entraînement robotique. Nous envisageons de prochains essais chez l'homme, indique Grégoire Courtine. Notre approche ne guérira pas les patients. Mais elle ambitionne d'améliorer leur qualité de vie. »

Plusieurs approches complémentaires se consacrent à la régénération des neurones. « Pourquoi, chez l'homme ou la souris, les fibres du système nerveux périphérique parviennent-elles à repousser, tandis que celles du système nerveux central [cerveau et moelle épinière] en sont incapables ? », s'interroge le professeur Bernard Zalc, qui a dirigé

le Centre de recherche de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM, UPMC, Inserm, CNRS), à Paris. Une des réponses vient de la « myéline », cette gaine qui entoure certaines fibres nerveuses. « Martin Schwab, de l'université de Zurich, a isolé les protéines de la myéline du système nerveux central. Et montré que l'une d'elles, *NOGO*, inhibe la repousse de l'axone », ce prolongement du neurone qui transporte le message nerveux, souligne Bernard Zalc. Ce qui a conduit à la mise au point d'un anticorps anti-*NOGO*, inhibant cette inhibition. « Cette approche s'inscrit dans une voie qui vise à rendre l'environnement neuronal plus favorable à la repousse des axones », note Geneviève Rougon (CNRS-université Aix-Marseille). Outre la piste de la myéline, est explorée la voie des astrocytes, des cellules au rôle ambigu. Tantôt elles semblent entraver la repousse axonale en formant une cicatrice autour de la lésion. Mais selon un travail publié dans *Science* le 1er novembre 2013, certains astrocytes bénéfiques se différencient à partir de cellules souches présentes dans la moelle épinière lésée. « Si l'on perturbe cette barrière d'astrocytes, il y a moins de récupération fonctionnelle », souligne Grégoire Courtine.

Une stratégie de thérapie génique a été publiée le 2 avril dans *The Journal of Neurosciences*. Une équipe du King's College, à Londres, a injecté un vecteur viral dans la lésion médullaire de rats adultes. Ce vecteur contenait le gène d'une enzyme :

une « chondroitinase », qui digère des molécules s'accumulant autour de la lésion. Résultats : la repousse axonale a augmenté, favorisant la récupération des pattes arrière des rats traités.

Une autre approche consiste à modifier génétiquement les neurones lésés pour faire repousser leurs axones. « De nombreux laboratoires cherchent à identifier, dans le système nerveux périphérique, les molécules favorisant la croissance et la régénération axonales. Il s'agit ensuite de promouvoir leur fabrication par les neurones lésés du système nerveux central », dit Florence Bareyre, de l'université Ludwig-Maximilians à Munich (Allemagne). A cet égard, le rôle bénéfique d'une protéine, *PCAF*, vient d'être montré (*Nature Communications*, 1er avril).

Toutes ces approches restent très en amont d'une application chez l'homme. D'autant que plusieurs essais ont été abandonnés. L'intérêt de l'anticorps anti-*NOGO* a ainsi été évalué chez l'homme. Mais cet essai, promu par le laboratoire Novartis, semble avoir été stoppé — en toute discrétion... De même, des start-up américaines avaient lancé de petits essais pour évaluer des greffes de cellules souches dans la moelle épinière de patients paralysés. Ces essais ont été interrompus. « Une étape d'évaluation chez le primate est indispensable », note Grégoire Courtine.

Florence Rosier
(9 avril 2014)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article montre l'importance de la moelle épinière, non pas dans le contrôle des réflexes, mais dans la locomotion chez les mammifères. En effet, l'article relate que chez des petits mammifères, suite à la lésion de la moelle épinière, des circuits neuronaux de la moelle épinière restent fonctionnels et peuvent être à l'origine de mouvements

volontaires lorsque la section n'est pas totale. Cette locomotion nécessite une stimulation chimique et une stimulation électrique et s'accroît avec l'entraînement. Ces observations ouvrent des perspectives intéressantes pour la récupération de la locomotion chez l'homme après section de la moelle épinière. L'article fait également le point sur les études réalisées à l'heure actuelle sur la régéné-

ration des neurones. Certaines molécules et cellules ont été identifiées comme intervenant dans le contrôle de la repousse des neurones et font l'objet de recherches. Des essais de thérapie génique sont également à l'étude. Bien que l'application de ses recherches chez l'homme soit encore loin, cela ouvre des perspectives quant à l'amélioration de la qualité de vie des personnes paralysées.

ZOOM SUR...

LES ACCIDENTS VASCULAIRES CÉRÉBRAUX (AVC)

Les accidents vasculaires cérébraux touchent environ 150 000 personnes en France chaque année : dans 80 % des cas, l'AVC est dû à une diminution de l'apport sanguin (suite à un caillot par exemple) et dans 20 % des cas, l'AVC est causé par une hémorragie cérébrale. L'AVC ne concerne pas uniquement les personnes âgées : plus de 10 000 personnes de moins de 45 ans sont victimes d'un AVC chaque année.

Un des principaux facteurs de risque est l'hypertension artérielle. L'AVC présente des signaux d'alerte qu'il est parfois possible de reconnaître (troubles brutaux de la vision, de la parole, de la marche, paralysie d'une partie du corps, etc.).

L'AVC est une véritable urgence médicale : plus la victime est prise en charge rapidement et de manière adaptée dès les tous premiers signes, plus les chances de survie et de limiter les séquelles sont élevées.

LES HÉMIPLÉGIES

Un accident (AVC, traumatisme) affectant le cortex moteur d'un seul hémisphère cérébral entraîne une paralysie du seul côté du corps situé à l'opposé de l'hémisphère cérébral touché : il s'agit d'une hémiparésie. En effet, la commande des mouvements volontaires est contralatérale (le cortex moteur droit commande les mouvements de la partie gauche du corps) car les voies motrices se croisent sous le bulbe rachidien.

LES PARAPLÉGIES

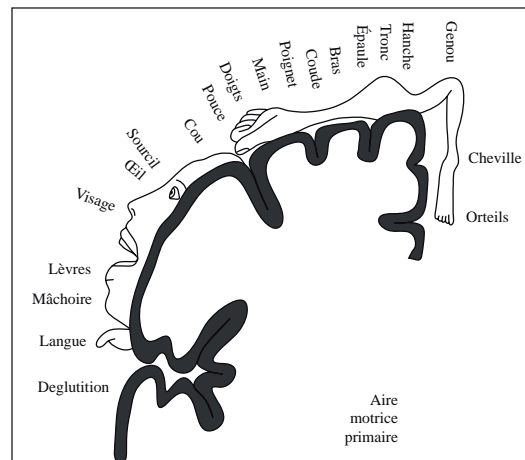
Une lésion de la moelle épinière peut être à l'origine de paralysie qui affecte les parties gauche et droite du corps. L'étendue de la partie du corps paralysée dépend de la hauteur à laquelle se situe la lésion. La paraplégie consiste en la paralysie du bassin et des jambes.

Motricité volontaire et plasticité cérébrale

A lors que les réflexes sont des mouvements inconscients, nous réalisons des mouvements volontaires : saisir un objet, marcher, courir, etc. Chez un tout jeune enfant, les premiers gestes semblent très maladroits : il ne sait pas attraper une balle ni faire quelques pas. Mais, à force de s'entraîner, de faire des erreurs et de recommencer, il apprend à maîtriser ses gestes. Comment les mouvements volontaires sont-ils contrôlés et comment expliquer l'évolution des capacités motrices ?

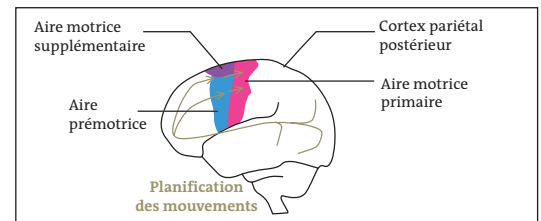
De la volonté au mouvement

L'enregistrement des **potentiels d'action** au niveau d'un motoneurone montre que les circuits nerveux impliqués dans le mouvement peuvent appartenir à l'arc réflexe myotatique ou provenir de l'encéphale. Les mouvements volontaires sont donc contrôlés par l'**encéphale**. L'exploration du cortex cérébral par les techniques d'**imagerie médicale** permet d'identifier les zones du cortex activées lors des mouvements musculaires volontaires. L'étude de cas cliniques, comme des lésions au niveau du cerveau entraînant des paralysies, ont également participé à la connaissance du cortex moteur. Les mouvements volontaires sont directement commandés par l'**aire motrice primaire** située dans chaque hémisphère cérébral. La cartographie précise de cette aire motrice primaire montre que chacune de ses régions correspond à l'innervation d'une région précise du corps. Plus la motricité de cette région corporelle est complexe, plus la région de l'aire motrice primaire qui lui est dédiée est importante.



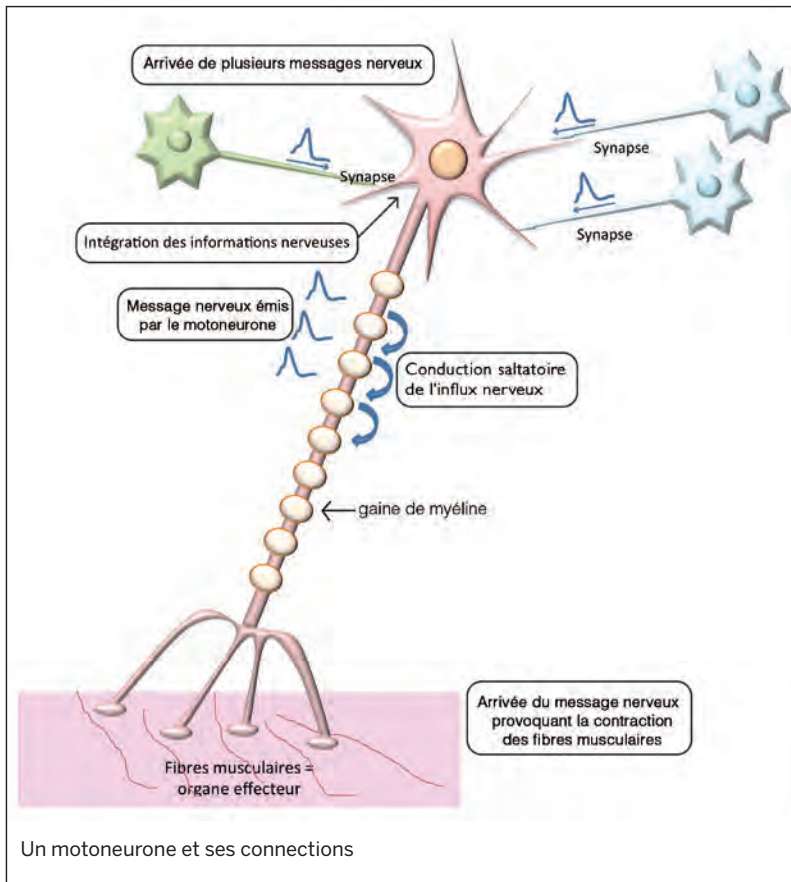
Cartographie de l'aire motrice primaire (Homunculus de Penfield). Hémisphère gauche vue en coupe. Les parties du corps les plus mobiles, comme les mains, les lèvres ou la langue sont représentées hypertrophiées.

Les informations issues du cortex visuel situé à l'arrière du cerveau sont transmises à l'**aire prémotrice** et à l'**aire motrice supplémentaire**. L'aire prémotrice, impliquée plutôt dans la régulation de la posture, dicte à l'aire motrice la position optimale pour un mouvement donné, tandis que l'aire motrice supplémentaire influe sur la planification et l'initiation des mouvements en fonction des expériences passées. Le **cortex pariétal** postérieur joue également un rôle dans l'exécution du mouvement volontaire, en prenant en compte la position du corps, le geste à effectuer, etc., en intégrant les informations neuro-sensorielles reçues.



Organisation du cortex moteur

Les **neurones pyramidaux** de l'aire motrice primaire projettent leurs axones vers le bulbe rachidien puis vers la moelle épinière. Les voies motrices sont **croisées** : l'aire motrice primaire de l'hémisphère gauche contrôle les mouvements de la partie droite du corps et inversement. Les terminaisons synaptiques des neurones pyramidaux entrent en contact au niveau de synapses avec les motoneurones. Au niveau de la synapse, est libérée une quantité de neuromédiateurs en adéquation avec le train de potentiels d'action du neurone pré-synaptique. Le motoneurone est ainsi en relation avec un grand nombre de **synapses** certaines étant **excitatrices**, d'autres **inhibitrices**. Le motoneurone intègre alors l'ensemble des informations nerveuses qu'il reçoit par un **phénomène de sommation** qui est **spatiotemporelle**. Le message nerveux résultant au niveau du motoneurone est véhiculé jusqu'au muscle. Un même motoneurone peut innervier plusieurs fibres ou cellules musculaires,



mais une fibre musculaire n'est toujours innervée que par un seul motoneurone.

Plasticité et motricité cérébrale

La comparaison des **cartes motrices** chez plusieurs individus montre l'existence de différences importantes. Pendant des périodes critiques (principalement pendant l'enfance), sous l'action de stimuli externes, des réorganisations des réseaux neuronaux se produisent. Par exemple, lors de l'apprentissage d'un instrument comme le violon, les violonistes droitiers utilisent les doigts de la main gauche (notamment l'annulaire et l'auriculaire) plus fréquemment que les non-violonistes. Lors de l'activation de l'auriculaire gauche, le nombre de dendrites activées au niveau du cortex est plus élevé chez les violonistes (40 000 à 80 000 dendrites activées) que chez les non-violonistes (1 000 à 35 000 dendrites activées). L'utilisation préférentielle d'un doigt augmente la représentation corticale de la zone contrôlant les mouvements du doigt stimulé, ainsi que l'activité des neurones des zones concernées. Ainsi, le cortex moteur présente une **plasticité cérébrale**, c'est-à-dire la capacité à établir de nouvelles connexions entre les neurones. De nouvelles synapses se mettent en place : certaines vont disparaître, d'autres vont être maintenues et renforcées. De cette façon, les différences dans le cortex moteur s'acquièrent au cours

cette partie cesse de fonctionner. Un AVC affectant une aire motrice peut ainsi entraîner une paralysie. Une récupération du déficit moteur est parfois observée. La zone affectée reste détruite, mais des remaniements affectant des zones voisines, permettent la récupération de la fonction motrice. Cette récupération est d'autant plus rapide qu'une rééducation est faite précocement.

De manière générale, le nombre de neurones diminue avec l'âge (10 % environ de perte au cours de la vie). Les apprentissages sont souvent plus aisés chez les jeunes enfants que chez les adultes : il semblerait que les possibilités de plasticité cérébrale diminuent avec l'âge, sans pour autant disparaître totalement. Les neurones que nous possédons constituent donc un véritable **capital à conserver et à entretenir**. ■

DEUX ARTICLES DU MONDE À CONSULTER

• **Traiter plus tôt Parkinson en stimulant le cerveau** p. 91

(Florence Rosier, 23 juin 2012)

• **Vers une police du cerveau** p. 92

(Laurent Alexandre, 19 mai 2012)

du développement, lors de l'apprentissage des gestes et de l'entraînement. **L'architecture du cerveau** de chaque individu résultant de son développement est donc **unique**. Cette plasticité cérébrale, que l'on retrouve dans d'autres parties du cerveau, comme dans le cortex visuel, est une propriété générale du système nerveux central.

La plasticité cérébrale est aussi à l'origine de la **capacité de récupération du cerveau** après un accident affectant une petite partie du cortex moteur et entraînant une perte fonctionnelle. Par exemple, un **accident vasculaire cérébral (AVC)** est un trouble de l'irrigation sanguine du cerveau. Si une partie du cerveau cesse d'être irriguée à cause d'un AVC, alors les neurones meurent et

NOTIONS CLÉS

CORTEX MOTEUR, AIRE MOTRICE

Partie du cortex cérébral spécialisée dans la commande des mouvements volontaires et qui contient une aire motrice primaire, une aire motrice supplémentaire et une aire prémotrice.

CORTEX

Zone de faible épaisseur, recouvrant la totalité du cerveau et formée par la substance grise (correspondant aux corps cellulaires des neurones). L'épaisseur du cortex est d'environ de 2 à 4 mm, sa superficie représente 2 200 m², soit plus de 80 % de la masse totale du cerveau. Le cortex contient différentes aires, spécialisées dans des fonctions spécifiques.

INTÉGRATION NERVEUSE

Capacité des neurones à élaborer un message nerveux résultant de la réception de plusieurs messages nerveux. On distingue la sommation « spatiale » (prise en compte des messages nerveux issus de différentes synapses) et la sommation « temporelle » (prise en compte des différents messages provenant d'une même synapse sur un laps de temps de quelques millisecondes). La plupart du temps, la sommation réalisée est spatio-temporelle.

PLASTICITÉ CÉRÉBRALE

Capacité du cerveau à évoluer d'un point de vue anatomique et fonctionnel sous l'effet de l'environnement, lors d'un apprentissage ou d'une rééducation. Cette plasticité cérébrale s'explique par la réorganisation de circuits neuronaux dus aux modifications des synapses.

SOMMATION

Le corps cellulaire du motoneurone reçoit de nombreuses informations qu'il doit intégrer, c'est-à-dire faire le bilan « algébrique » (ou sommation) des messages inhibiteurs et excitateurs reçus, pour créer un message moteur unique en direction des fibres musculaires.

ZOOM SUR...

LA MALADIE DE PARKINSON

La maladie de Parkinson est une maladie neurodégénérative à évolution lente. Les principaux symptômes sont les tremblements de la main ou du pied, la lenteur des mouvements et la raideur du corps. La maladie de Parkinson se caractérise par une dégénérescence de neurones situés à la base du cerveau, contrôlant les mouvements automatiques et sécrétant un neurotransmetteur appelé la « dopamine ». Un traitement à base de L-dopa, un précurseur de la dopamine, améliore les symptômes pendant plusieurs années puis perd de son efficacité. La maladie de Parkinson concerne principalement les personnes de plus de 60 ans. Elle affecte 0,3 % de la population générale. C'est la deuxième maladie neurodégénérative la plus courante après la maladie d'Alzheimer.

L'IRM

L'IRM, ou « imagerie par résonance magnétique », est une technique d'imagerie médicale permettant d'obtenir des images du cerveau, mais aussi d'autres organes. Sa résolution est assez élevée : elle permet de voir des structures dont la taille est inférieure à un millimètre. Grâce à l'IRM, des coupes virtuelles du cerveau peuvent être réalisées pour caractériser des pathologies. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) permet de caractériser l'activité des différentes parties du cerveau. Elle est donc particulièrement utilisée en recherche pour étudier le fonctionnement cérébral.

D'autres techniques d'imageries médicales comme la TEP (tomographie par émission de positons) ou encore le scanner (appelé aussi « tomodensitométrie » ou « scanographie ») ont permis ces trente dernières années de progresser dans les diagnostics des atteintes cérébrales et dans les recherches en neurosciences.

Partie 1 : Motricité volontaire et plasticité cérébrale

1. Le neurone moteur conduit un message nerveux :

- a) codé en fréquence de potentiel d'action vers les centres nerveux.
- b) codé en amplitude de potentiel d'action vers le muscle effecteur.
- c) présentant toujours la même fréquence et la même amplitude de potentiel d'action.
- d) codé en fréquence de potentiel d'action vers le muscle effecteur.

2. Une fibre musculaire :

- a) reçoit un message nerveux issu de plusieurs motoneurones.
- b) reçoit un message nerveux issu d'un seul motoneurone.
- c) est capable de réaliser une intégration des messages nerveux.
- d) se relâche lorsqu'elle reçoit un message nerveux d'un motoneurone.

3. Au niveau du cerveau, les cartes motrices :

- a) sont innées, présentes dès la naissance.
- b) restent identiques tout au long de la vie de l'individu.
- c) sont identiques chez tous les individus d'une même espèce.
- d) peuvent évoluer en fonction de l'apprentissage.

4. Le cortex moteur :

- a) contient l'aire motrice primaire.
- b) contient plusieurs aires qui communiquent entre elles.
- c) est situé en profondeur dans le cerveau.
- d) est situé à l'arrière du cerveau.

5. La partie du corps la plus représentée au niveau de l'aire motrice primaire est :

- a) le visage.
- b) l'épaule.
- c) le genou.
- d) l'avant-bras.

6. Un accident vasculaire cérébral dans le cortex moteur de l'hémisphère droit peut entraîner :

- a) une paralysie de la partie droite du corps.
- b) une paralysie des deux membres supérieurs.
- c) une paralysie des deux membres inférieurs.
- d) une paralysie de la partie gauche du corps.

7. Une lésion de la moelle épinière entraîne :

- a) une paralysie d'un seul côté du corps.
- b) une paralysie de tout le corps.
- c) une paralysie de la partie du corps située au-dessus de la lésion.
- d) une paralysie de la partie du corps située en dessous de la lésion.

8. La plasticité cérébrale :

- a) est due à une augmentation du nombre de neurones.
- b) est due à un remaniement des réseaux neuronaux.
- c) s'intensifie avec l'âge.
- d) est indépendante de l'environnement.

Le corrigé

1. d), 2. b), 3. d), 4. b), 5. a), 6. d), 7. d), 8. b) ■



AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Étude de documents

- Cartographie du cortex moteur à partir de données de l'imagerie cérébrale.
- Fonctionnement des synapses, intégration nerveuse.
- Contrôle du muscle par les motoneurones.
- Conséquences des AVC et des lésions de la moelle épinière sur la motricité.
- Mise en évidence de la plasticité cérébrale et évolution avec l'âge.

Ce qu'il ne faut pas faire

- Cocher deux réponses ou ne cocher aucune réponse
- Ne pas mobiliser les notions du cours.

Traiter plus tôt Parkinson en stimulant le cerveau

Une intervention précoce pourrait faire gagner plusieurs années de vie de qualité aux patients.

Très attendus des neurologues, les résultats de l'étude Earlystim ont été révélés cette semaine à Dublin (Irlande), lors du 16^e congrès international sur la maladie de Parkinson et les troubles du mouvement. Présentés par le professeur Günther Deuschl, de l'université de Kiel (Allemagne), ils montrent l'intérêt de traiter plus tôt certains malades parkinsoniens par la technique de stimulation cérébrale profonde.

Cette intervention neurochirurgicale consiste à implanter au sein même du cerveau de fines électrodes qui délivrent un courant électrique continu jusque dans des structures cérébrales profondes, les noyaux gris centraux. L'objectif : moduler, grâce à ce courant de haute fréquence, l'activité des circuits neuronaux altérés par la maladie. Le tout premier patient a été opéré en 1993 par le professeur Alim-Louis Benabid au CHU de Grenoble. Aujourd'hui, quelque 400 parkinsoniens en bénéficient chaque année en France.

« Jusqu'ici, ce traitement était réservé aux patients dont la maladie était très évoluée, un peu en "dernier recours" après une longue souffrance, témoigne le docteur Michael Schüpbach, coordinateur du volet français de cette étude à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM, hôpital de la Pitié-Salpêtrière, Paris). D'où notre interrogation : ne pourrait-on pas opérer les malades plus tôt, quand ils ont encore une vie sociale et professionnelle ? »

Pour y répondre, l'étude Earlystim a inclus 251 malades en France et en Allemagne.

En France, on compte 100 000 à 150 000 parkinsoniens. La stimulation cérébrale ne concerne qu'une petite fraction, « environ 5 %, qui doivent répondre à des critères d'indication très stricts », précise le professeur Yves Agid, investigateur principal du volet français de l'étude à l'ICM. Rappelons que la maladie de Parkinson touche les cellules dopaminergiques, celles qui produisent un neurotransmetteur, la dopamine. « On les trouve dans la substance noire du tronc cérébral, une structure très primitive présente chez tous les animaux. Ces cellules forment "l'interrupteur" du comportement moteur », explique-t-il.

Ne peuvent être opérés que les patients qui n'ont que des lésions dopaminergiques, responsables des symptômes typiques de la maladie – lenteur, rigidité et tremblement de repos. Ils ne doivent avoir ni troubles de la marche ou de l'équilibre ni troubles cognitifs liés à des lésions non dopaminergiques. Ces patients sont améliorés de façon spectaculaire par la L-dopa, le traitement substitutif qui pallie le déficit de sécrétion de la dopamine.

Mais cette efficacité n'a qu'un temps : après plusieurs années, des complications se manifestent sous forme de mouvements involontaires et de fluctuations motrices. « Habituellement, les patients sont opérés treize ans en moyenne

après le début de la maladie, quand ces complications sont déjà sévères », rapporte Michael Schüpbach. « Dans Earlystim, ce délai a été réduit à sept ans en moyenne (parfois quatre ans), avant que les effets indésirables soient invalidants. »

Très bonne réponse

Les 251 patients de l'étude ont été répartis par tirage au sort en deux groupes : un groupe sous traitement optimal par la L-dopa seule et un groupe opéré par stimulation cérébrale, suivie ou non d'un traitement par la L-dopa. Deux ans plus tard, les deux groupes ont été comparés. Résultat : alors que la qualité de vie – évaluée par les patients – est maintenue dans le groupe sous traitement médical seul, elle est améliorée de 26 % dans le groupe opéré. « Pour la première fois, les patients opérés témoignent d'une amélioration de leur insertion

psychosociale », relève Michael Schüpbach.

L'évaluation médicale montre une très bonne réponse à la stimulation précoce sur les symptômes parkinsoniens comme sur les complications de la L-DOPA. « Même à un stade précoce de la maladie, il peut être bénéfique de prendre le risque opératoire », estime Michael Schüpbach. « Les patients concernés pourraient gagner plusieurs années de vie de qualité », ajoute Yves Agid. Pas question cependant d'élargir à tout va les indications de cette opération invasive. Son succès reste conditionné à deux impératifs : le respect très rigoureux des critères d'indication et la prise en charge par une équipe multidisciplinaire très expérimentée. ■

Florence Rosier
(23 juin 2012)

POURQUOI CET ARTICLE ?

La maladie de Parkinson est une maladie qui se révèle vite handicapante pour le patient, et la prise de L-dopa, si elle améliore les symptômes pendant un certain temps, ne les guérit pas et cesse d'agir après quelques années. Depuis une dizaine d'années, il existe une thérapie basée sur la stimulation électrique cérébrale des structures profondes du cerveau, fortement impliquées dans le contrôle de la locomotion. L'activité des neurones dopaminergiques impliqués est contrôlée par des

électrodes implantées dans le cerveau, permettant ainsi la régression des symptômes parkinsoniens. Mais cette thérapie est pour l'instant réservée à des patients fortement atteints par la maladie et ne présentant que des troubles liés aux atteintes des circuits dopaminergiques. **Cet article présente les résultats d'une étude clinique visant à étendre la stimulation cérébrale à des patients présentant un stage plus précoce de la maladie.** Les résultats obtenus montrent qu'élargir le champ d'application de cette thérapie pourrait être bénéfique à ces patients.

Vers une police du cerveau

Constitué de cent milliards de neurones, le cerveau était un continent mystérieux. L'origine de la pensée et de la conscience est restée une énigme pour des générations de scientifiques. Ce n'est qu'à partir des années 1980 que Jean-Pierre Changeux et Gerald Edelman ont conceptualisé une biologie de la conscience. Les enjeux sont immenses. D'une part, comprendre comment sont stockées nos émotions et notre mémoire est fondamental pour lutter contre les maladies neuropsychiatriques. D'autre part, la technologie va permettre des manipulations de nos cerveaux. La compréhension du fonctionnement cérébral et la cartographie de l'esprit humain progressent au rythme de l'augmentation des capacités informatiques. La stimulation cérébrale par implants – qui sont des puces électroniques implantées dans le cerveau – pour traiter les dépressions ou les troubles névrotiques graves donne des résultats très encourageants. Les tétraplégiques peuvent commander un ordinateur ou une machine par la pensée, via un casque qui analyse les ondes cérébrales. Récemment, on a pu reconstruire la pensée grâce au décodage des ondes enregistrées

par des électrodes crâniennes. La technologie ira au-delà du décryptage des cerveaux : leur manipulation semble sans limite. Sa régulation ne sera pas consensuelle : on peut aussi bien soutenir que le cerveau doit rester un sanctuaire inviolable que promouvoir des techniques de neuro-renforcement pour aider les enfants moins favorisés. Dernièrement, l'éditorialiste de la prestigieuse revue médicale *The Lancet* s'inquiétait non des dérives des technologies de renforcement cérébral, mais des conditions pour accorder aux étudiants pauvres des bourses leur permettant d'y avoir accès ! Les neurotechnologies pourraient devenir une arme fatale au service d'une ambition totalitaire. C'est une menace inédite contre la liberté : la police de la pensée sera technologique-

ment bientôt prête. L'ultime frontière de la domination des dictatures – l'esprit humain – serait pulvérisée : on n'ose imaginer ce que Staline, Mao, Pol Pot ou Hitler auraient fait des neurotechnologies. La protection de l'intégrité cérébrale va devenir essentielle. Il faudra encadrer les modifications mnésiques, même lorsqu'elles sont proposées au nom de l'intérêt des malades. Les militaires travaillent aujourd'hui sur les techniques permettant de supprimer les souvenirs de guerre traumatisants. Par ailleurs, la société ne se serait pas opposée à l'effacement des souvenirs des petites filles rescapées de l'affaire Dutroux.

Et puis après ?

Aurait-il fallu – si cela avait été possible – supprimer en 1945 les souvenirs atroces des rescapés

de la Shoah ? Pour le bien des rares déportés ayant survécu peut-être, mais pas pour l'humanité, dont l'histoire aurait été falsifiée. Transformations biologiques et électroniques du cerveau, réalité virtuelle, manipulation des souvenirs forment un cocktail détonant. La vérité va devenir de plus en plus fragile, et les erreurs que l'on trouve sur Wikipédia paraissent anodines au regard des perspectives des neurotechnologies. Notre neuro-sécurité, c'est-à-dire notre liberté, deviendra le cœur des droits de l'homme de la civilisation biotechnologique. Mais pourra-t-on faire confiance à l'État pour bâtir la neuro-éthique ? Autorisera-t-on, par exemple, la justice à lire dans nos cerveaux ? ■

Laurent Alexandre
(19 mai 2012)

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article clôt le thème des neurosciences par une réflexion personnelle. Il présente la vision éthique d'un scientifique face au progrès spectaculaire de l'imagerie cérébrale de ces dernières années. Il est maintenant possible d'avoir accès aux

structures du cerveau, de connaître son fonctionnement, de stimuler certaines régions précises. L'auteur anticipe les possibilités techniques à venir et s'inquiète du pouvoir que confère la maîtrise de ces techniques et les risques liés à leur utilisation. Il appelle à la création d'une nouvelle branche de la bioéthique : la neuro-

éthique. Dans quelle mesure a-t-on le droit d'avoir accès à l'esprit d'un être humain ? de le modifier ? Ce questionnement est fondamental et rappelle avec justesse que toute innovation technologique doit s'accompagner d'une réflexion éthique sur son utilisation et ses conséquences pour l'individu et la société.

LE GUIDE PRATIQUE



LES SVT AU BAC

Coefficient : 6 ou 8 pour les candidats ayant choisi la SVT comme enseignement de spécialité. Épreuve pratique (évaluation des compétences expérimentales) : sur 4 points ; durée : 1 h.

Épreuve écrite : sur 16 points ; durée : 3 h 30.

PARTIE 1
DE L'ÉCRIT

Notée sur 8 points, elle évalue la maîtrise des connaissances acquises dans le cadre du programme spécifique de SVT. Le questionnement se présente sous forme d'un QCM ou d'une question de synthèse ou d'un QCM et une question de synthèse qui peuvent éventuellement s'appuyer sur un ou plusieurs documents. Cette partie peut porter sur une, plusieurs ou toutes les parties du programme.

PARTIE 2
DE L'ÉCRIT

Notée sur 8 points, elle évalue la pratique du raisonnement scientifique et de l'argumentation. Elle comporte deux exercices :

- le premier exercice, noté sur 3 points, évalue la capacité du candidat à raisonner dans le cadre d'un problème scientifique proposé par le sujet, en s'appuyant sur l'exploitation d'un nombre réduit de documents. Le questionnement se présente sous forme d'un QCM ou d'une question ouverte ;
- le second exercice, noté sur 5 points, évalue la capacité du candidat à pratiquer une démarche scientifique dans le cadre d'un problème scientifique à partir de l'exploitation d'un ensemble de documents et en utilisant ses connaissances.

Pour les candidats qui n'ont suivi que l'enseignement spécifique de SVT, les deux exercices de la partie 2 peuvent porter sur la même partie ou non du programme spécifique. Pour les candidats ayant choisi la spécialité SVT, le second exercice de la partie 2 porte sur l'un des thèmes de spécialité.

Épreuve écrite de SVT



Partie 1 : Maîtriser ses connaissances

Cette partie, qui porte sur une ou plusieurs parties du programme spécifique, a pour objectif d'évaluer les connaissances du candidat selon l'une des modalités variables :

- une **question de synthèse** portant sur une ou plusieurs parties du programme spécifique ;
- un **QCM** portant sur une partie ou plusieurs parties du programme spécifique, voire tout le programme. Ce QCM peut prendre appui sur des **documents** ;
- l'**association d'un QCM (avec ou sans documents) et d'une question de synthèse**.

Dans la question de synthèse sont évaluées la **maîtrise des connaissances** du candidat et sa capacité à les mobiliser et à les présenter de manière cohérente pour **répondre à la question posée**. La **qualité de la rédaction** est un critère important de l'évaluation. Il est donc essentiel d'identifier précisément la **problématique** à partir de l'énoncé pour délimiter le sujet et ainsi éviter tout hors-sujet ou tout oubli d'une partie du sujet. La réponse attendue doit contenir une **introduction** (qui définit les termes du sujet, pose clairement la problématique et annonce le plan), un **développement cohérent** et une **conclusion** (qui propose un bilan répondant à la problématique puis une ouverture vers un thème voisin du sujet étudié). Le développement est structuré en différents paragraphes dont chacun développe un aspect du sujet de manière cohérente et argumentée. Des titres numérotés mis en valeur peuvent être présents mais ne sont pas exigibles. Le **travail au brouillon** est impératif pour construire le plan de la synthèse : lisez bien l'énoncé, qui peut indiquer le plan à suivre, et mobilisez les notions vues en cours

se rapportant au sujet. Prévoyez alors les **schémas** nécessaires pour illustrer les notions choisies. Dans tous les cas, suivez bien les consignes de l'énoncé (par exemple un schéma-bilan est souvent exigé). Les schémas doivent être assez grands, clairs, en couleurs et accompagnés de légendes et d'un titre. Dans le cas d'un QCM, pour chaque question, quatre propositions sont faites. Une seule proposition est exacte, les autres sont fausses. Il ne faut **jamais cocher deux propositions** car cela invalide automatiquement la réponse. En général, seules les bonnes réponses rapportent des points et l'absence de réponse ou une réponse erronée n'enlève pas de point. Les candidats ont donc toujours intérêt à cocher une proposition, même s'ils ne sont pas sûrs de leur réponse.

Partie 2 – Exercice 1 : Reasonner dans le cadre d'un problème scientifique

Cet exercice de la partie 2 porte sur le programme spécifique et vise à évaluer la capacité du candidat à **raisonner dans le cadre d'un problème scientifique** proposé par le sujet, en s'appuyant sur l'exploitation d'un nombre réduit de **documents**. La réponse peut se présenter sous forme d'un QCM ou d'une réponse rédigée.

Dans le cas d'une réponse rédigée, il s'agit de construire un raisonnement répondant au problème posé en exploitant les informations contenues dans les documents. Il peut s'agir par exemple de comparer des éléments, d'argumenter, d'extraire et d'organiser des informations, de relier des informations entre elles à partir des documents fournis, etc.

La **qualité** et la **rigueur du raisonnement** sont les principaux critères de l'évaluation de cet exercice. Aucune restitution de connaissances n'est exigée mais les connaissances du candidat peuvent être utiles pour **analyser les documents**. La réponse attendue comporte, en général, une courte **introduction** posant la problématique et un **développement structuré** en différents paragraphes (sans titres apparents) qui présentent le raisonnement.

Dans le cas d'un QCM, il faut choisir à partir de l'exploitation des documents la **bonne réponse parmi les quatre propositions** présentées pour chaque question. Comme pour la partie 1, aucune justification écrite n'est attendue, mais la lecture attentive des documents et leur compréhension sont indispensables pour sélectionner les bonnes réponses du QCM.

Partie 2 – Exercice 2 : Pratiquer une démarche scientifique

Cet exercice porte soit sur le programme spécifique pour les candidats n'ayant pas choisi la spécialité SVT, soit sur un des thèmes de spécialité pour les candidats ayant choisi la spécialité SVT.

L'objectif est d'évaluer la capacité du candidat à **pratiquer une démarche scientifique** dans le cadre de la **résolution d'un problème scientifique** en exploitant différents **documents mis en relation** et en **mobilisant ses connaissances**. Le candidat doit exposer sa démarche personnelle de résolution du problème en élaborant une véritable **argumentation** qui conduit à une résolution possible du problème posé et en proposant une **conclusion** répondant à ce problème. L'énoncé précise souvent qu'aucune étude exhaustive des documents n'est attendue : il ne s'agit pas d'analyser les documents dans leur intégralité mais d'en **extraire les informations** utiles à la résolution du problème posé, de les relier entre elles et aux connaissances du candidat.

Dans cet exercice sont principalement évaluées la **cohérence de la démarche** proposée par le candidat, sa capacité à **justifier ses choix** dans la résolution du problème et à **faire preuve d'esprit critique**. Plusieurs démarches de résolution du problème peuvent être possibles : le candidat choisit celle qui lui paraît la plus appropriée en la justifiant rigoureusement à l'aide des informations extraites des documents.

La réponse attendue comporte, en général, une **introduction** présentant la problématique, un **développement structuré** en différents paragraphes (sans titres apparents) présentant la démarche de résolution, puis une **conclusion** résumant la résolution du problème. Le candidat doit veiller à bien **respecter la forme de la réponse exigée** par l'énoncé : compte-rendu d'une sortie sur le terrain, analyse d'un projet technique, etc. Les documents ne sont pas à analyser dans l'ordre donné par l'énoncé mais selon l'**ordre logique** pour résoudre le problème. Un **travail au brouillon** est nécessaire pour analyser les documents, sélectionner les



informations issues des documents permettant de traiter la problématique, puis construire le plan de la réponse à l'aide des éléments issus des documents, mis en relation entre eux et avec les éléments de connaissances nécessaires.

Préparer l'épreuve du bac

Au cours de l'année, au fur et à mesure des chapitres, réalisez des **fiches** où figurent le plan du cours, les notions essentielles, les définitions des mots clés ainsi que les schémas importants à connaître. Ce travail permet de sélectionner les **notions essentielles**, de les mémoriser et les revoir rapidement lors des révisions avant les épreuves. Retravailliez bien les corrections des évaluations faites en classe et entraînez-vous sur des sujets de type bac.

Développer votre culture générale

Les sujets font de plus en plus appel à votre culture générale. Celle-ci vous sera également utile pour la suite de vos études, pour des concours ou des entretiens. Suivez les **grandes lignes de l'actualité** régulièrement (radio, télévision, presse écrite papier ou numérique) et approfondissez, par des **lectures**, les sujets qui peuvent se référer au programme. Les articles du *Monde* proposés ici visent à vous faciliter cette ouverture sur l'actualité et la mise relation entre avec les recherches scientifiques et le cours enseigné. ■

GÉRER SON TEMPS

Consacrez 10 minutes en début d'épreuve à la lecture de l'ensemble du sujet et au choix de l'ordre dans lequel vous allez traiter les exercices. Fixez alors une durée de travail pour chaque exercice et veillez à la respecter au mieux en contrôlant régulièrement l'heure. Traitez l'ensemble du sujet même si vous maîtrisez moins bien une partie du programme. Avant la fin de l'épreuve, prévoyez 5 à 10 minutes pour relire votre copie et corriger les fautes de sens et d'orthographe.

GÉRER SON STRESS

La veille de l'épreuve, évitez les révisions intensives tardives et essayez d'arriver en forme, détendu mais motivé, le jour des épreuves. Préparez votre matériel pour composer (y compris une boisson et un petit en-cas). Avant le début de l'épreuve, prenez quelques minutes pour vous détendre en respirant calmement. Essayez de faire de votre mieux quelles que soient les difficultés rencontrées et profitez du temps imparti à l'épreuve pour améliorer votre copie.

ÉPREUVE ORALE DE RATTRAPAGE

Préparation : 20 minutes.

Présentation : 20 minutes.

Le candidat tire au sort un sujet de deux questions. Pour les candidats qui n'ont pas choisi la spécialité SVT, elles portent sur deux parties différentes du programme spécifique de SVT. Pour les candidats ayant choisi la spécialité SVT, une question porte sur le programme spécifique et l'autre sur l'un des thèmes de spécialité. Les sujets comportent des documents semblables à ceux étudiés en cours durant l'année. Comme l'épreuve a lieu dans une salle comportant du matériel de SVT, le candidat peut être interrogé sur le matériel expérimental et son utilisation, sans être amené à le manipuler.

Crédits

COUVERTURE

Volcan : © Digital Vision/ Thinkstock - ADN: © cybrain/iStock/ Thinkstock

GÉNÉTIQUE ET ÉVOLUTION

Le brassage génétique et sa contribution à la diversité génétique

p. 6 gauche, DR, droite © Lézarts Création ; p. 7, DR ; p. 8, DR ; p. 9, © RDE.

Diversification génétique et diversification des êtres vivants

p. 12 © RDE ; p. 13 haut © RDE, bas, DR, chimpanzé © Marcel Schauer/ Fotolia ;

p. 14 colonne © Istockphoto/ Thinkstock, partie centrale © Lézarts Création ; p. 15 DR.

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

p. 18 colonne haut © RDE, colonne bas © Istockphoto/ Thinkstock, partie centrale © Lézarts Création ;

p. 19 partie centrale © RDE, colonne © Istockphoto/ Thinkstock p. 20 DR ;

p. 21 partie centrale DR, colonne © Istockphoto/ Thinkstock.

Un regard sur l'évolution de l'homme

p. 24 © RDE ; p. 25, DR ; p. 26 © RDE ;

Les relations entre organisation et mode de vie, résultat de l'évolution :

l'exemple de la vie fixée chez les plantes

p. 30 DR ; p. 31 DR ; p. 32 DR ; p. 33 DR ;

LE DOMAINE CONTINENTAL ET SA DYNAMIQUE

La caractérisation du domaine continental :

lithosphère continentale, reliefs et épaisseur crustale

p. 38 colonne et partie centrale droite © Lézarts Création, partie centrale gauche DR ; p. 39 partie centrale haut DR, partie centrale bas et colonne © RDE ; p.40 DR.

Contexte de la formation des chaînes de montagnes et disparition des reliefs

p. 44 © Lézarts Création ; p. 45 partie centrale gauche © Lézarts Création, partie centrale droite DR, colonne © RDE ; p.46 carte

© Lézarts Création, autres visuels DR ; p.47 © RDE

Le magmatisme en zone de subduction : uneproduction de nouveaux matériaux continentaux

p.50 partie centrale gauche DR, partie centrale droite © RDE ; p.51 © Lézarts Création ;

p. 52 en haut © Lézarts Création, en bas © RDE

ENJEUX PLANÉTAIRES CONTEMPORAINS

Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

p. 56 DR ; p. 57 DR ; p. 58 gauche DR, droite © RDE

La plante domestiquée

p. 60 © Lézarts Création ; p.61 gauche DR, droite © RDE ; p. 62 © RDE

LE MAINTIEN DE L'INTÉGRITÉ DE L'ORGANISME : QUELQUES ASPECTS DE LA RÉACTION IMMUNITAIRE

La réaction inflammatoire, un exemple de réponse innée

p. 66 haut et bas © Hemera/ Thinkstock ; p. 67 © RDE ; p. 69 DR

L'immunité adaptative, prolongement de l'immunité innée

p. 72 DR ; p. 73 haut DR, bas © Lézarts Création ; p. 74 © Istockphoto/ Thinkstock

Le phénotype immunitaire au cours de la vie

p. 79 haut DR, bas droite © Lézarts Création ; p. 80 © RDE

NEURONE ET FIBRE MUSCULAIRE : LA COMMUNICATION NERVEUSE

Le réflexe myotatique, un exemple de commande réflexe du muscle

p. 84 © Lézarts Création ; p. 85 haut © Lézarts Création, bas DR ; p. 86 © RDE

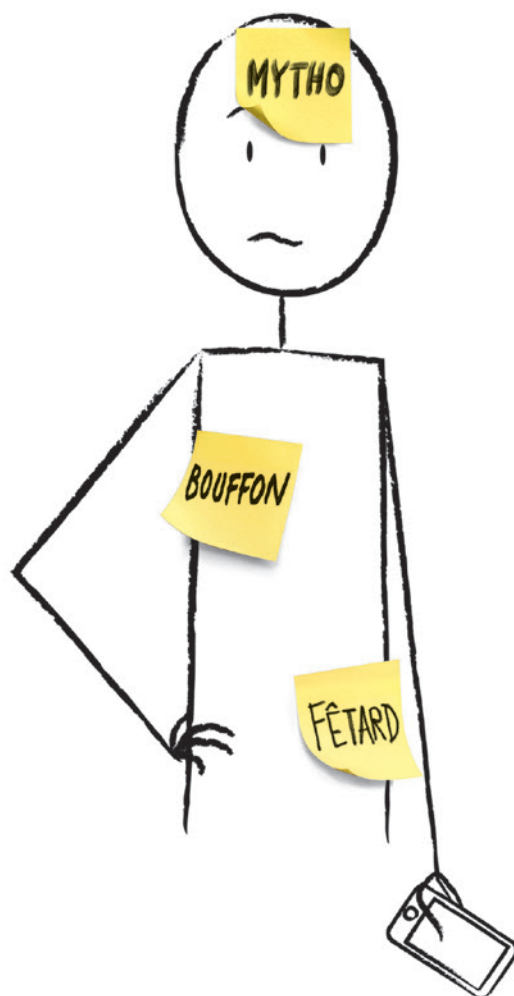
Motricité volontaire et plasticité cérébrale

p. 88 © RDE ; p. 89 © RDE ; p. 90 © Hemera/ Thinkstock

LE GUIDE PRATIQUE

p. 93 © iStockphoto ; p. 94 © Istockphoto/ Thinkstock ; p. 95 © Purestock/ Thinkstock

DANS LA VIE, C'EST BIEN DE
TOUT PARTAGER. SUR LES RÉSEAUX SOCIAUX,
ÇA PEUT VITE MAL TOURNER.



MAIF-NETSURLENET.FR

Photos, vidéos, statuts... Aujourd'hui, c'est fabuleux, on peut tout partager en quelques secondes ! Pour que le plaisir reste intact, il faut aussi prévenir les risques liés à l'utilisation des nouveaux médias et au partage d'informations. C'est pour cela que la MAIF et la mairie de Paris coéditent maif-netsurlenet.fr, avec Reputation Squad. Grâce à ce site, tout un chacun peut tester de façon

simple et ludique sa propre e-réputation, puis disposer de conseils pratiques pour garder le contrôle de ses publications sur la toile.

Et pour s'engager davantage, la MAIF a créé le Fonds MAIF pour

l'Éducation. Car favoriser l'accès à l'éducation pour tous aujourd'hui, c'est aider à construire demain une société plus juste et plus responsable.



ASSUREUR MILITANT.