

pourlascience.com

■ POUR LA SCIENCE

Août 2006

Édition française de Scientific American

L'art du verre à Rome



- Course, nage, vol : des lois identiques
- Comment combattre la maladie d'Alzheimer



La nouvelle génération
de télescopes géants

M 02687 - 346 - F: 5,95 €



FRANCE METRO : 5,95 €, DOM : 7,15 €, BEL : 7,10 €, CH : 11,2 FS,
CAN : 8,95 \$, LUX : 7,10 €, ESP : 7,90 €, PORT. CONT. : 6,90 €, AND :
5,95 €, MAY : 8,95 €, MAR : 55 MAD, REU : 8,95 €, All : 8,90 €

L'ivresse des profondeurs

Bétons: étonnez- vous !



Exposition 31 mai - 5 novembre 2006

60 rue Réaumur, Paris 3^{ème} • **M** Arts et Métiers • www.arts-et-metiers.net

*Nous voulons, tant ce feu nous brûle le cerveau,
Plonger au fond du gouffre, Enfer ou Ciel, qu'importe ?
Au fond de l'inconnu pour trouver du nouveau !
Le voyage, Les Fleurs du mal, Baudelaire*

NASA-Hubble Space Telescope STS08



La galaxie du Sombrero photographiée par Hubble.

La passion de savoir

Savoir, explorer, connaître. Sans cesse trouver du nouveau. Comprendre l'homme, comprendre le monde. Quête du philosophe, quête du scientifique. L'appétit de savoir ne met pas de limitation à son objet : les scientifiques découvrent l'incalculable diversité du réel. Parce que le désir de savoir peut devenir passion, ils explorent des mondes auxquels l'homme n'est pas naturellement adapté : les profondeurs sous-marines et l'espace.

L'observation est l'un des fondements de la connaissance scientifique et parce qu'elle est malaisée au fond des océans, Paul Bert (1833 – 1886) fut le premier à imaginer des dispositifs de laboratoire – les caissons hyperbares – lui permettant d'observer les modifications physiologiques et comportementales d'une personne soumise à des pressions élevées. Il fit ainsi notablement progresser les connaissances sur la physiologie de la plongée et de l'altitude, c'est-à-dire de l'homme exposé à des conditions extrêmes de pression (hyperpression en plongée, ou faibles pressions et manque d'oxygène en altitude).

Il a rendu la plongée plus sûre pour les professionnels et les amateurs (voir *Paul Bert, précurseur de la médecine des mers et des airs*, page 8). Ses résultats sont toujours d'actualité et servent de base aux neurobiologistes qui tentent de comprendre les causes biologiques des troubles du comportement dont souffrent les plongeurs amateurs (qui atteignent 60 mètres de profondeur) et professionnels descendant jusqu'à une

centaine de mètres (voir *Le mal des profondeurs*, page 30). Poussé par sa passion de savoir et de voir, l'homme s'ingénie à trouver des dispositifs lui permettant de respirer à 100 mètres sous l'eau ou l'autorisant à « observer » ce qu'il ne voit pas de la Terre : les astres lointains, quasars et autres galaxies. Pour ce faire, il a mis au point le satellite *Hubble*, qui a fourni d'impressionnantes vues de l'Univers masqué à nos yeux. Les missions de la navette spatiale américaine ayant redémarré, l'une d'elles sera peut-être consacrée au satellite vieillissant. Les astronautes « réparateurs de l'espace » réussiront-ils à prolonger sa durée de vie jusqu'à ce que son successeur soit mis sur orbite (voir *Les exploits de Hubble*, page 38) ? D'autres télescopes d'une puissance inégalée devraient ouvrir de nouvelles fenêtres sur l'espace, mais depuis la Terre (voir *Les télescopes géants du futur*, page 46).

Le savoir confère-t-il du pouvoir ? Oui, mais seuls quelques – rares – scientifiques jettent un pont entre science et politique. Paul Bert fut l'un de ceux-là. Professeur à la Faculté des sciences, il partagea son temps entre le Palais Bourbon et son laboratoire au début des années 1870. Il devint même ministre de l'Instruction publique, faisant adopter la plupart des projets de Jules Ferry sur l'enseignement « libre, gratuit et obligatoire ». Les années 1870 ont représenté pour Paul Bert sa période de plus intense activité tant politique que scientifique. Recherche et engagement politique ne seraient pas incompatibles...

Françoise PÉTRY

août 2006

POUR LA SCIENCE N° 346

Science & actualité

4 Science & gastronomie Éloge de la superficialité

Hervé This

5 Bloc-Notes

Didier Nordon

6 Science & économie Le gain en Bourse

Ivar Ekeland

7 Tranches de vie

Jean-Louis Hartenberger

8 Présence de l'histoire

Paul Bert : précurseur de la médecine des mers et des airs

William Rostène

Scientifique et politique, Paul Bert décrit les effets de la pression sur l'organisme en altitude et en profondeur, et évita bien des accidents aux aéronautes et aux plongeurs.

12 Point de vue À l'heure de la cybertaxonomie

Simon Tillier

14 Les limites de la science

Les limites de l'exploration de l'Univers

Roland Lehoucq

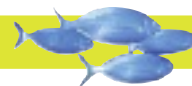
L'observation de l'Univers a beaucoup progressé, tant au sol que de l'espace. Mais des limites techniques et théoriques subsistent.

29 Tribune des lecteurs

18 Perspectives scientifiques

Les prémices de la pensée symbolique • Plusieurs souches de la grippe aviaire détectées au Nigeria • La confiance règne • Immuable lamproie • Un désert plus ancien • Régulation démographique chez les galaxies naines • Un nouveau stock de menhirs • Une gazelle économe • D'où vient le pétrole ? • La plus vieille tombe étrusque peinte • Sexe à rebondissement • Un alternateur à marée • Une aire cérébrale multi-usage • Le deuxième disque de *Bêta Pictoris* • Antigènes et acidité • Inutile de lutter contre... l'envie de sieste • Roches assurément biologiques •

NEUROSCIENCES



→ 30

Le mal des profondeurs

Jean-Claude Rostain

À mesure qu'il descend, un plongeur éprouve parfois d'étranges sensations. Soudain, à quelque 50 mètres de profondeur, il ne sait plus ce qu'il fait. C'est la narcose à l'azote.

ASTRONOMIE

→ 38

Les exploits de Hubble

Mario Livio

En espérant une dernière révision du télescope *Hubble*, les astronomes font le bilan de ses 16 années d'exploitation.



ASTRONOMIE

→ 46

Les télescopes géants du futur

Roberto Glimozzi

Des télescopes dont le miroir atteint 100 mètres de diamètre verront le jour d'ici une quinzaine d'années. Ils permettront notamment d'observer des planètes extrasolaires.



ARCHÉOLOGIE

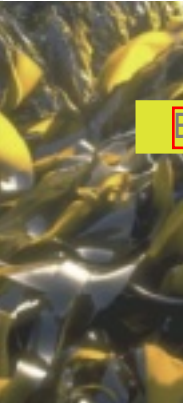
→ 54

Le verre dans l'Empire romain

Véronique Arveiller

Le verre fut d'abord une matière précieuse que l'on importait d'Orient, puis l'invention du soufflage en fit un matériau courant.





BIOLOGIE

→ 60

La vie d'une marée à l'autre

F. Lallier et A. Toulmond

Les organismes de la zone littorale soumise aux marées affrontent des variations considérables de leurs conditions de vie. Quelles stratégies déploient-ils pour survivre ?

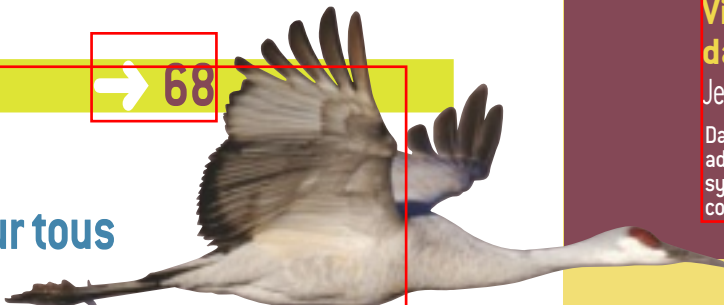
BIOPHYSIQUE

→ 68

Locomotion : une même loi pour tous

A. Bejan et J. Marden

La course, le vol et la nage correspondent à des mouvements et à des organismes très différents. Pourtant, certaines lois communes, explicables par un principe physique d'optimisation, les caractérisent.



GÉOPHYSIQUE

→ 74

Les ravages des supervolcans

Ilya Bindeman

Tous les 100 000 ans en moyenne, des éruptions colossales dévastent tout sur des milliers de kilomètres. Des indices minéralogiques aident à comprendre ces catastrophes.

MÉDECINE

→ 82

Pour oublier la maladie d'Alzheimer

Michael Wolfe

On comprend mieux les processus moléculaires menant à cette maladie qui détruit la mémoire. Et les biologistes retrouvent l'espoir de vaincre un jour ce fléau redouté.



Visions scientifiques

90

Logique & calcul

Vivre serein

dans un monde cruel

Jean-Paul Delahaye

Dans un univers où certains groupes adoptent une attitude agressive systématique, une communauté coopératrice peut-elle survivre et s'imposer ?

96

Art & science

La cougourdette se dévoile

H. Paris, M. Pitrat, M.-C. Daunay
et J. Janick

98

Idées de physique

Clac végétal et uppercut de crevette

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

100

Analyses de livres

Histoire des femmes scientifiques de l'Antiquité au XX^e siècle, Éric Sartori • *Le cerveau gourmand*, André Holley • *L'espace, les plus belles images*, Volker Kratzenberg-Annie • *Genèse et développement d'un fait scientifique*, Ludwik Fleck • *À la découverte des fresques du Tassili*, Henri Lhote • *De l'espèce*, Philippe Lherminier et Michel Solignac •

Retrouvez des compléments
d'information sur le site de *Pour la Science* :

www.pourlascience.com

Sur la totalité des numéros : deux encarts d'abonnement pages 16 et 17,
encarts commande de livres et abonnement pages 88 et 89.
En couverture : © Denis Sabo/Shutterstock

Éloge de la superficialité

Nous ne mangeons pas plus loin que notre langue.
Et l'impression superficielle est non seulement la plus profonde, c'est bien souvent la seule.



La différence entre une mayonnaise réussie et une mayonnaise ratée ? La disposition des mêmes molécules. Dans le cas raté, les molécules d'eau apportées par l'œuf et le vinaigre sont au fond du récipient, avec l'huile par-dessus ; dans l'autre, réussi, les molécules de l'huile sont réparties en gouttelettes dans la phase aqueuse. Cette organisation change tout : notre bouche vient au contact de l'eau, dans le cas réussi, au contact désagréable de l'huile, dans le cas raté.

D'autres exemples où la structure détermine le goût ? Comparons de l'eau chauffée où l'on fouette du beurre, et du beurre chauffé où l'on ajoute de l'eau en fouettant. Avec des compositions égales en beurre et en eau, le résultat, pourtant ramené à la même température ambiante, est bien différent. Avec la préparation beurre dans eau, on obtient une pommade, parce que les gouttelettes de matière grasse, si elles durcissent en refroidissant, restent séparées par un film d'eau : ce système est une suspension. En revanche, dans le traitement eau dans beurre, la consistance est plus ferme, parce que le beurre forme la phase continue où l'eau est dispersée. À température ambiante, la proportion de molécules de triglycérides du beurre à l'état solide est de 50 pour cent environ, suffisante pour constituer une architecture solide, tenue par les forces d'empilement des cristaux de triglycérides. Différentes cohésions, différentes consistances.

Poursuivons notre analyse avec un rôti de bœuf. À quoi sert de le cuire ? Évidemment la chaleur tue les micro-organismes pathogènes qui colonisent la surface de la viande, mais la cuisson semble plutôt un handicap gustatif parce qu'elle durcit la viande, coagulant les protéines qui sont dans les « fibres musculaires » composant la viande. Cette analyse est insuffisante : la viande rôtie ou grillée prend du goût... en surface, et en surface seulement. Des réactions nommées réactions de Maillard et bien d'autres (oxydations, etc.) donnent à la croûte un goût puissant de rôti. En bouche, nous percevons d'abord ce goût, et ignorons que l'intérieur de la viande a le même goût qu'une viande crue (ce qu'elle est... quand la viande est cuite « saignante »).

Cette observation explique la différence gastronomique entre la découpe du gigot d'agneau à la française et à l'anglaise.

La première se fait perpendiculairement à l'os, et la seconde parallèlement. Les morceaux de viande, d'une part, n'offrent pas des fibres musculaires arrangées de la même façon : dans un cas, c'est le type « entrecôte », avec les fibres perpendiculaires, et dans l'autre, c'est le cas « onglet », avec des fibres parallèles à la surface. D'autre part, la découpe à l'anglaise offre des tranches homogènes, toutefois plus ou moins cuites et grillées, alors que la découpe à la française donne à chaque convive un peu de surface brune, bien cuite, goûteuse, et un peu d'intérieur moins cuit, plus saignant, avec davantage de goût d'agneau *sui generis*.

Comment utiliser en cuisine l'idée selon laquelle la surface est importante ? Partons d'un cube de viande, et découpons-le en trois tranches, la tranche centrale étant deux fois plus épaisse que chacune des tranches supérieure et inférieure. D'une part, cuisons la tranche centrale à basse température (vers 60 degrés), très longuement, dans un bouillon, afin de dissoudre le tissu collagénique qui fait la viande dure : après plusieurs heures de cuisson, la viande peut devenir tendre comme du beurre. D'autre part, chauffons les deux autres tranches de viande afin d'en évaporer l'eau et de les durcir. Puis remettons les trois parties en place : nous avons ainsi obtenu, par assemblage, ce que le rôtissage fait indistinctement, d'un coup, et sommes certains d'avoir du croquant en surface, et du tendre à l'intérieur. À titre de comparaison, testons un assemblage fait, de bas en haut, d'une demi-couche tendre, des deux couches dures, et d'une demi-couche tendre à nouveau.

Nous obtenons le même effet, en sucré, en comparant deux lames de chocolat entre lesquelles une mousse a été disposée, ou bien deux lames de chocolat superposées, prises dans une mousse : dans le premier cas, les dents tombent sur les lames dures, et nous sentons leur dureté, malgré la mousse ; dans le second, les dents s'enfoncent dans la mousse, jusqu'à atteindre les lames dures. Chaque fois, les ingrédients sont les mêmes, mais ils sont disposés différemment... et, en plus de l'apparence plus ou moins appétissante, nous percevons d'abord le goût des parties superficielles, qui déterminent notre perception. « Seuls les gens superficiels ne jugent pas en fonction des apparences » pressentait le prémoniteur Oscar Wilde.

Spécialisation : à consommer avec modération

Grâce au fait qu'ils sont spécialisés, les hommes réalisent des prouesses. Chacun mène son art infiniment plus loin qu'il ne saurait le faire s'il était interchangeable avec n'importe quel autre homme.

Mais la spécialisation a une conséquence funeste. Pour se réaliser, un homme doit choisir une voie, c'est-à-dire renoncer à toutes les autres.

Maîtres dans l'art de tout retourner à leur avantage, les hommes tirent fierté de ce qui devrait les affliger. Ainsi font les spécialistes. Au lieu de s'attrister de l'obligation où ils sont de se spécialiser, due à la faiblesse des moyens humains, ils se flattent de leur état. La spécialisation extrême

devrait être réservée aux esprits puissants, capables d'aller loin dans une direction sans pour autant perdre de vue l'ensemble de leur discipline. En fait, ce sont des esprits étroits qui se spécialisent le plus. Chacun règne sur un royaume infinitésimal que nul ne lui dispute puisque nul autre que lui ne le juge intéressant. On prétend priser la communication, de nos jours, et on admire des spécialistes incapables de communiquer, sinon avec leurs collègues immédiats!

Dès la Préhistoire, j'imagine, il a fallu choisir : se faire chasseur, cueilleur ou agriculteur. La spécialisation est, sans doute, inhérente à l'homme. Mais cela ne justifie pas qu'on la porte au-delà de toute limite,

comme c'est le cas actuel. « Plus » n'est pas synonyme de « mieux ». Au contraire. Les excès de spécialisation font des dégâts. Les savants se sont emmurés dans une absence d'intercompréhension à côté de laquelle la tour de Babel paraît un enfantillage. Dans les domaines techniques, le gain de spécialisation ne s'accompagne pas toujours d'un gain d'efficacité.

Déterminer, selon les domaines, le point à partir duquel se spécialiser davantage devient néfaste est une grave question de fond, aujourd'hui. Et pas de mauvaise blague : elle est beaucoup trop sérieuse pour qu'on confie à des spécialistes le soin d'y réfléchir!

Cherchez l'erreur

Question : les affirmations suivantes sont-elles compatibles ?

1. Nous nous plaignons tous d'être submergés par l'excès d'information. Même s'il se restreint à sa spécialité, nul ne peut absorber tout ce qui se publie, ni faire le tri entre le bon et le moins bon.

2. Chaque fois que nous pouvons, nous contribuons à accroître l'information offerte : nous nous efforçons de donner une large diffusion aux résultats de nos recherches.

3. Dans la mesure de nos moyens, nous recourons aux outils les plus puissants qui soient disponibles pour nous procurer de l'information.

4. Plus nous sommes informés, mieux nous sommes éclairés, donc mieux nous maîtrisons les situations et sommes à même d'y réagir de façon adaptée.



À ne pas manquer ! L'enseignement express !

Actuellement, stocker les marchandises coûte plus cher que les acheminer au fur et à mesure. La pratique du flux tendu s'est donc généralisée dans la distribution. Mais elle s'est imposée aussi là où on ne l'aurait pas attendue.

Ainsi, à l'université. Beaucoup de cours n'y durent plus un an, mais un semestre, étant entendu qu'un « semestre » universitaire s'étend sur trois mois à peine. Cela signifie que, en trois mois, les étudiants doivent assimiler un cours, être interrogés à l'examen, puis passer à autre chose. Pareille organisation ne présente que des inconvénients.

L'enseignant, pressé, n'ose plus la moindre digression : il n'aurait pas de temps pour la rattraper. Les étudiants sont privés du délai de

maturation, bien supérieur à trois mois, nécessaire pour se familiariser avec un savoir neuf. Perversité supplémentaire, la première occasion qui leur est donnée d'appliquer ce qu'ils ont appris, donc de se tromper puisqu'on ne réussit presque jamais du premier coup à appliquer correctement des notions fraîchement acquises, cette première occasion est, dans bien des cas, celle de l'examen.

Bref, rien ne justifie la « semestrialisation » des cours. Mais le principe économique du flux tendu s'est mué en une norme adoptée par l'ensemble de la société. Chacun le pratique à sa façon. Pour le meilleur, peut-être, dans certaines branches. Mais, à l'université, certainement pour le pire.

Méfiez-vous du faux vrai !

Depuis quelque temps, les avertissements se multiplient contre les inepties qu'héberge Internet : non seulement des propos choquants, mais aussi des renseignements factuels irrévocablement faux. Du coup, une tâche ingrate s'impose aux professeurs : mettre à mal l'innocente confiance manifestée par les élèves persuadés de la validité infaillible de ce qui s'affiche sur leurs écrans.

Quelle leçon tirer de cette mésaventure ? Aucune, et c'est cela qui est triste. Ou plutôt, une leçon vieille comme le monde : il n'y a rien de nouveau sous le soleil. Quand les hommes se sont mis à parler, ce n'est pas parce qu'ils disaient quelque chose que c'était vrai. Quand ils ont inventé l'écriture, ce n'est pas parce qu'ils écrivaient quelque chose que c'était vrai. Quand ils ont fabriqué la presse, ce n'est pas parce qu'ils imprimaient quelque chose que c'était vrai. Maintenant qu'ils ont mis au point l'écriture électronique, ce n'est pas parce qu'ils diffusent quelque chose dans le monde entier en un clin d'œil que c'est vrai.

Chaque fois que naît un moyen inédit, on veut croire que celui-là s'évadera des travers ancestraux. Il n'en va jamais ainsi. Le côté affligeant des nouveautés techniques ne réside pas dans ce qu'elles ont de neuf. Il réside dans ce qu'elles ont d'immémorial.



Le gain en Bourse

Selon que vous serez puissant ou misérable, vous aurez plus ou moins d'information pour gagner sans risque en bourse. La théorie de l'information quantifie cette analyse.



En finance, rien ne vaut une bonne information au bon moment. L'affaire EADS vient à propos nous le rappeler. Si vous détenez des actions, ou des options sur ces actions, et que vous apprenez que le titre va chuter, vendez vos actions ou exercez vos options. C'est facile, c'est sûr, et cela peut rapporter gros.

Reste à obtenir cette information. Les mathématiques sont muettes à ce sujet, mais il existe des moyens plus expéditifs. Si par exemple vous dirigez la société qui a émis les actions, vous serez le premier informé des mauvaises (ou des bonnes) nouvelles, et la tentation est grande de convertir cet avantage en espèces sonnantes et trébuchantes. Cela s'appelle un délit d'initié, et c'est réprimé par la loi : cela revient à plumer les pigeons quand les affaires vont bien, et à les plumer encore quand les affaires vont mal, mais c'est très difficile à prouver. S'il est interdit d'être malhonnête, il n'est pas illégal d'être incompetent : aussi entendons-nous les plus hauts responsables d'EADS affirmer qu'ils n'étaient pas au courant de ce qui se passait dans leurs usines. Ce n'est pas cela qui va rassurer les investisseurs et faire remonter le titre.

Même si vous n'avez pas une information de première main, vous pouvez avoir un tuyau, dans lequel vous avez plus ou moins confiance, et la question est alors de savoir l'exploiter. Elle a été posée et résolue par J.-L. Kelly en 1956, voici 50 ans, bien avant l'explosion des mathématiques financières. C'était l'époque où Shannon et son école développaient la théorie de l'information et c'est à cette ligne de pensée que se rattache Kelly.

Kelly imagine que tous les jours a lieu une course de chevaux, et que chaque soir quelqu'un vous téléphone pour vous annoncer le résultat des courses du lendemain. Vous avez une confiance totale dans votre source, et vous pouvez donc parier à coup sûr. Pour simplifier, disons qu'il n'y a que deux chevaux en lice, et qu'il s'agit à chaque fois d'un quitte ou double : si vous gagnez, vous doublez votre mise, et si vous perdez il ne vous reste rien. Il est bien évident que dans ces conditions, avec une mise initiale d'un euro, vous pouvez vous retrouver avec 2^n euros le n -ième jour : il suffit de remettre en jeu à chaque fois la totalité de sa fortune. Si vous dénommez S_n la somme dont vous disposez après n jours, votre fortune croît exponentiellement au rythme $(\log S_n)/n = \log 2$, et c'est le mieux que vous puissiez faire.

Mais il y a un hic. Si votre source est sûre, la transmission, elle, ne l'est pas : la ligne téléphonique n'est pas bonne, votre correspondant parle bas et ne veut pas s'attarder, et il se pourrait que vous « entendiez » le mauvais cheval. En d'autres termes, le tuyau n'a qu'une probabilité p inférieure à 1 d'être vrai. Remarquons ici la puissance et la généralité du modèle de Kelly, qui va s'appliquer à toutes les situations où nous avons une source d'informations répétées, que nous voulons exploiter sur le long terme, mais qui n'est pas totalement fiable.

Cela étant, qu'allons-nous faire ? Une première idée est de se comporter comme si l'information reçue était certaine, c'est-à-dire de remettre en jeu la totalité de ses gains à chaque fois. Grave erreur ! Cela peut bien commencer, avec une fortune qui double régulièrement, mais comme p est inférieur à 1, il est certain qu'un jour nous jouerons le mauvais cheval, et ce jour-là nous perdrons tout, puisque nous avons tout misé. En fait, cette stratégie n'est qu'une manière particulièrement frustrante de se ruiner.

Ce que Kelly propose, c'est de ne remettre en jeu à chaque fois qu'une fraction a de sa fortune : si on dispose d'une somme S à l'instant n , on misera aS à l'instant $n+1$. Si l'on gagne, on dispose le jour suivant de $(1+a)S$, dont on misera une fraction a , soit $a(1+a)S$. Si l'on perd, on disposera de $(1-a)S$, et on misera $a(1-a)S$. En procédant de cette manière, Kelly montre que le rendement moyen est maximum pour $a=2p-1$. Plus précisément, en appelant de nouveau S_n la somme dont le joueur disposera après n coups (et qui est donc aléatoire, puisqu'elle dépend du nombre de fois où il a entendu le mauvais signal, et donc joué le mauvais cheval), le rendement moyen $(\log S_n)/n$ tend vers $(1-p)\log(1-a) + p\log(1+a)$ avec la probabilité un, et cette dernière expression est maximale pour $a=2p-1$.

C'est ce que l'on appelle un pari à la Kelly : on mise à chaque fois une fraction $2p-1$ de sa fortune. La mise est proportionnelle au crédit que l'on accorde à l'information. Si $p=1$, alors $2p-1=1$: si l'information est sûre, il faut miser toute sa fortune. En revanche, si $p=1/2$, l'information est sans valeur : ce que nous dit la source, c'est de tirer le vainqueur à pile ou face. On trouve alors $2p-1=0$, ce qui veut dire qu'il vaut mieux s'abstenir de jouer. En d'autres termes, ceux qui ont de l'information privilégiée investissent beaucoup et gagnent beaucoup, tandis que le tout-venant ferait mieux de garder son argent.

Plusieurs vagues de migrants ont participé à la colonisation des Amériques voici plus de 12 000 ans. Et la morphologie crânienne des populations les plus anciennes est proche de celle des peuples actuels de Mélanésie, d'Afrique subsaharienne et d'Australie, alors que les actuels Amérindiens sont de type mongoloïde (asiatique). Telle est la conclusion qu'avancent des chercheurs brésiliens après avoir étudié les restes de 81 individus mis au jour dans une série de sites archéologiques de la zone de Lagoa Santa dans l'État de Minas Gerais, au Sud-Est du Brésil. Les premières découvertes dans la région remontent au milieu du XIX^e siècle, et, depuis, plus d'une centaine de sites a été repérée. Voici une trentaine d'années, une mission franco-brésilienne conduite par Annette Laming-Emperaire avait entrepris plusieurs chantiers de fouilles. Mais ces travaux furent interrompus à la suite de la mort tragique de l'archéologue dans un accident d'automobile. Plus récemment le Brésil a entrepris de réaliser l'inventaire de son patrimoine préhistorique, et les autorités ont pris conscience de la richesse de la région de Lagoa Santa. Au point que vient d'être créé un parc national afin de protéger du pillage les gisements, en particulier les grottes ornées, et d'impliquer les populations locales dans les nouvelles recherches. Les restes humains étudiés par Walter Neves et Mark Hubbe, de l'Université de São Paulo, proviennent de 15 gisements, dont le plus récent daté de -5000, alors

Les premiers Américains...

que les plus anciens sont de -9500 à -10000. Ces crânes sont étroits et allongés, ont des orbites vastes alors que les mandibules sont prognathes, et sont donc bien différents de ceux des habitants du Nord de l'Asie et des actuels Amérindiens, qu'ils soient du Nord ou du Sud. De telles caractéristiques négroïdes ont été déjà signalées chez d'autres spécimens sud-américains primitifs, en Colombie, dans le Sud du Chili, mais aussi chez les premiers occupants de Basse-Californie et de Floride. Pour expliquer ces disparités anatomiques entre populations anciennes et récentes d'Amérique du Sud, W. Neves et M. Hubbe privilégient l'hypothèse de migrations multiples. Ils considèrent qu'il y a peu de chances qu'un processus évolutif local ait débouché sur des transformations anatomiques aussi importantes, et surtout observées de la pointe du Chili jusqu'en Floride. Il est plus plausible d'envisager que, depuis au moins 20 000 ans, au travers du détroit de Béring, plusieurs vagues de migration ont atteint les Amériques. Ce qui veut dire que l'on doit trouver trace de différentes cultures. Or effectivement, dans les plus anciens sites archéologiques, il existe une grande diversité de projectiles laissés par les chasseurs : des pointes de flèches qui étaient projetées à l'aide d'un arc, et d'autres à l'aide de propulseurs. Et ce sont là deux traditions culturelles bien différentes. Qu'avaient-ils d'autres dans leurs bagages ces premiers Amérindiens qui pourraient nous renseigner plus en détail sur leur passé ?

... et leurs bagages

Ces migrants ne vinrent pas sans compagnons et les mains vides : on a retrouvé chiens et Calebasses à leurs côtés. Et si *Canis familiaris* dérive de loups d'Asie, la Calebasse est issue de la domestication d'une cucurbitacée africaine, *Lagenaria siceraria*. Quelles furent les voies de diffusion et de migration de ces deux précieux auxiliaires des hommes ? Les nouveautés anthropologiques du Brésil ne nous éclairent-elles pas sur ces énigmes ? Si l'histoire des chiens semble bien débrouillée, celle de la Calebasse est loin de l'être. En premier lieu, on peut se demander quel usage en était fait : gourde de berger ? Récipient ? Flottilleur pour soutenir des filets de pêche ? Instrument de musique ? Est-elle arrivée dans le Nouveau Monde au travers de l'Asie ou directement d'Afrique avec ces peuples négroïdes évoqués plus haut ? N'a-t-elle pas pu être transportée accidentellement par des courants océaniques ? On a repéré récemment au Zimbabwe la présence d'une population sauvage de *Lagenaria siceraria*. Quant à la forme domestique utilisée comme gourde, elle a été identifiée en Asie dans des dépôts archéologiques de -7000. En Amérique centrale et du Sud, les Calebasses qui ont été trouvées dans les sites amérindiens de même âge appartiennent à la

même souche, et ont donc même origine. Il est peu probable que des Calebasses aient pu venir des côtes d'Asie et franchir le Pacifique, portées par les courants océaniques, tout en conservant des graines encore viables. Aussi pense-t-on que, dans un premier temps, la Calebasse est venue d'Afrique en Asie comme plante cultivée, non pour ses qualités nutritives, mais à cause de sa forme et de la résistance de son écorce, ce qui permet de multiples usages. Puis elle a accompagné les vagues de migrants qui ont franchi Béring et colonisé les Amériques, et on en trouve des traces datant

de 8000 ans au Mexique, en Floride et au Pérou. Ces variétés seront cultivées dans le Nouveau Monde jusqu'à la conquête coloniale.

Les chiens faisaient aussi partie du voyage. C'est au Moyen-Orient qu'existent les restes fossiles les plus anciens, datés de 13 000 ans, dans des conditions de proximité avec les restes humains qui témoignent qu'ils sont alors compagnons de l'homme. D'après les études génétiques, le loup et le chien auraient divergé il y a quelque 15 000 ans, dans l'Est de l'Asie, leur territoire d'origine, car c'est là que le chien domestique présente la plus grande diversité génétique. Ces mêmes chiens asiatiques sont présents sur les sites archéologiques d'Amérique du Nord et du Sud vieux de 10 000 ans. Mais qu'il s'agisse du chien ou de la Calebasse, l'arrivée des Européens au XV^e siècle marque un tournant. Ces derniers vont introduire de nouvelles races de chiens « européennes » qui supplanteront rapidement le stock initial d'origine asiatique ; et pour la Calebasse, ils apportent avec eux une variété africaine domestique plus récente (4000 ans), et dans ce cas aussi ces souches vont relayer les sous-espèces qu'avaient apportées d'Asie les premiers migrants. Comment s'en étonner : le colonialisme ne vise-t-il pas avant tout à remplacer ?



Présence de l'histoire

Paul Bert : précurseur de la médecine des mers et des airs

Paul Bert, scientifique et politique, décrit les effets de la pression sur l'organisme en altitude et en profondeur, et évita bien des accidents aux aéronautes et aux plongeurs. Il lutta pour l'accès de tous à l'éducation et rédigea les premiers manuels scolaires.

Paul Bert est le « père des plongeurs ». Né à Auxerre en 1833, il est mort à Hanoï il y a 120 ans. Dans de nombreuses villes, une rue, une place, une école ou un groupe scolaire portent son nom. Il a fondé la médecine aéronautique et, pour les plongeurs, il est la référence en matière de physiologie hyperbare, c'est-à-dire qu'il a décrit les effets des fortes pressions sur l'organisme. Dans l'introduction de son ouvrage *La pression barométrique*, il a décrit les symptômes obser-

vés chez les habitants des hautes montagnes, les alpinistes ou les premiers plongeurs, avant d'en étudier les causes physiologiques.

Paul Bert a accompli son œuvre scientifique au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle, au moment de la « République des savants ». À cette époque, les découvertes des physiciens et des chimistes permettent le développement de nouvelles sources d'énergie (la machine à vapeur, la distillation du pétrole, l'électricité), de nouveaux matériaux (les matières plastiques) et d'inventions qui transformeront la vie quotidienne (le télégraphe, le téléphone, la photographie, les transports, etc.). Les sciences de la vie ne sont pas en reste. Charles Darwin propose sa théorie de l'évolution, Gregor Mendel mène ses travaux sur l'hérédité, et les disciplines médicales, telles la pharmacologie et la radiographie, voient le jour. Les techniques chirurgicales s'améliorent grâce aux nouvelles méthodes d'anesthésie, domaine dans lequel Paul Bert est très impliqué. Les idées et les innovations se propagent dans le monde entier grâce au développement des communications. Les guerres successives, et notamment celle de 1870 entre la France et la Prusse, exacerbent les nationalismes, aboutissant à une compétition entre les pays en voie d'industrialisation. Les hommes de science sont convaincus que leurs découvertes amélioreront la société et le bien-être de chacun.

Paul Bert est l'un de ces savants. Titulaire d'un doctorat en droit en 1857, il passe un jour devant la Sorbonne, y entre et assiste à un cours de biologie sur l'évolution de l'homme et du singe. Fasciné, il décide de devenir biologiste. Il travaille avec le physiologiste Louis Pierre Gratiolet (1812-1865) à la Sorbonne, puis devient préparateur du médecin et physiologiste Claude Bernard (1813-1878) au Collège de France. Au sein de ce laboratoire renommé, il participe à de nombreuses découvertes de physiologie

1. Paul Bert (1833-1886) étudia les effets de la pression sur l'organisme, détailla les symptômes liés à un manque ou à un excès d'oxygène. Homme politique, il mit en place le certificat d'études pour que chacun atteigne un même niveau d'éducation.



Toutes les illustrations sont de la ville d'Auxerre



2. Le scaphandre autonome a été mis au point par Auguste Denayrouze et Paul Bert qui développèrent le premier régulateur de gaz. La plongée de loisir apparaîtra un siècle plus tard quand des détendeurs de mélanges respiratoires plus maniables, fondés sur ce premier modèle, seront fabriqués.



3. La nacelle du Zénith emporta les aéronautes Sivel, Croce-Spinelli et Tissandier à plus de 7 300 mètres d'altitude. Mais les explorateurs ne reçurent pas à temps la lettre de Paul Bert qui avait calculé qu'ils n'emportaient pas assez d'oxygène à bord. Ils s'écrasèrent après avoir perdu connaissance en vol.

expérimentale. Son maître lui enseigne les règles des sciences expérimentales : poser des hypothèses et les valider par l'expérience. Il passe son doctorat de médecine en 1864 sur un sujet saugrenu à l'époque, la greffe animale, démontrant la possibilité de réaliser des transplants d'un animal à l'autre. En 1865, il obtient le prix de physiologie de l'Académie des sciences pour ses travaux. En 1866, sa thèse de science traite de la vitalité des tissus : ses travaux sur les gaz du sang – il s'intéresse à la respiration tissulaire et au transport de l'oxygène et du dioxyde de carbone par le sang – et sur la pression barométrique commencent.

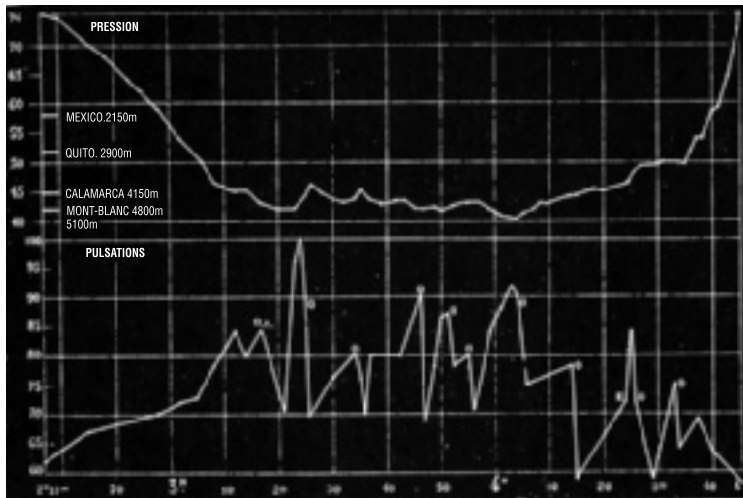
Physiologiste et médecin

À 34 ans, muni de trois doctorats, il est le plus jeune professeur nommé par une Faculté des sciences – celle de Bordeaux. En 1867, il succède au physiologiste Jean-Pierre Flourens (1794-1867) au Muséum national d'histoire naturelle puis, en 1869, Claude Bernard obtient qu'il le remplace à la chaire de physiologie de la Sorbonne. Paul Bert se consacre alors à la physiologie de la respiration. Toute sa vie, il manifestera une admiration sans faille pour ses maîtres, et en particulier pour Claude Bernard.

Qui plus est, grâce à Paul Bert, Claude Bernard sera le premier homme de science à recevoir des funérailles nationales en 1878.

Dans son ouvrage *La pression barométrique*, publié en 1878, Paul Bert rassemble toutes les données connues à cette époque sur les grimpeurs, les habitants de régions situées en altitude et sur les plongeurs – ceux qui, participant à la construction de ponts, doivent plonger pour installer des piliers de soutènement. Il décrit, dans les moindres détails, 670 expériences concernant l'étude des variations de la pression sur la respiration. Il y expose des conclusions prémonitoires pour l'époque et qui, pour la plupart, seront confirmées ultérieurement.

Quels ont été ses travaux sur la pression barométrique ? Il a d'abord travaillé sur l'animal grâce à un dispositif de cloches en verre où il modifiait à volonté la pression, afin d'examiner les conséquences sur l'animal. L'air est formé de 79 pour cent d'azote (N_2) et de 21 pour cent d'oxygène (O_2). Souvent, on dit que l'oxygène se raréfie en altitude, mais c'est une erreur de langage. Paul Bert montre que ce n'est pas la quantité, mais la pression partielle d'oxygène qui diminue avec l'altitude, en raison d'une diminution de la pression barométrique. Plus la pression est faible, plus



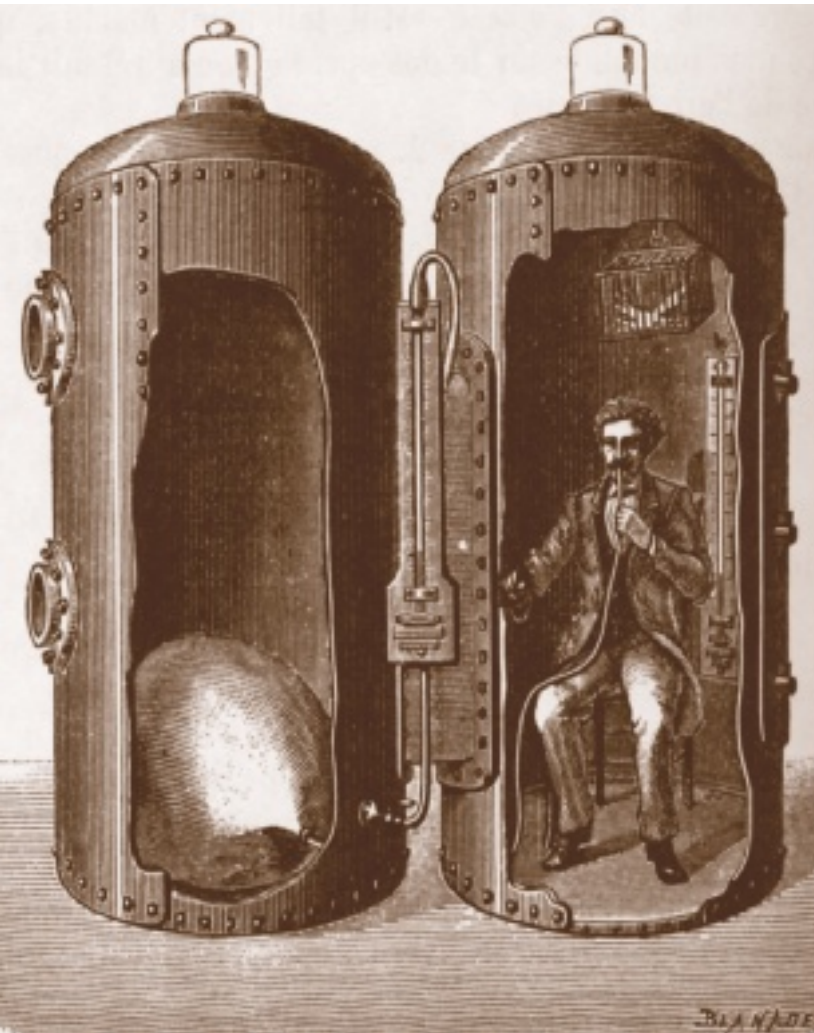
4. Les modifications du nombre de pulsations cardiaques (*tracé du bas*) en fonction de la pression en oxygène (*tracé du haut*) ont été estimées par Paul Bert. Quand la pression diminue, la quantité d'oxygène dissous dans le sang baisse également : la respiration et l'activité cardiaque sont perturbées.

la quantité d'oxygène qui arrive dans les poumons et dans les organes diminue. Il remarque que des modifications de la pression d'oxygène se manifestent notamment par des troubles de l'activité cérébrale, et en déduit que le cerveau n'a pas de réserves d'oxygène. En outre, quand l'apport d'oxygène diminue, la proportion de dioxyde de carbone dans le sang – produit par les cellules et rejeté au niveau des poumons – augmente, provoquant l'hyperventilation imposée par l'altitude. À l'inverse, en plongeant, la pression d'oxygène augmente : c'est l'effet hyperbare. L'air entrant dans les poumons se dissout d'autant plus dans le sang que la pression augmente. Il propose la première explication des accidents de décompression : quand un plongeur remonte trop vite à la surface, des bulles d'air (notamment d'azote) se forment dans les vaisseaux à mesure que la pression diminue. Quand des bulles de gaz bouchent les capillaires et bloquent la circulation du sang, une embolie pulmonaire survient (voire une embolie cérébrale grave quand le vaisseau bouché est dans le cerveau). Il faut donc remonter doucement pour limiter l'apparition des bulles de gaz dans le sang. Ces hypothèses de Paul Bert sont aujourd'hui confirmées.

Quelques heures sous les mers et dans les airs

Avec l'aide du médecin Denis Jourdanet, Paul Bert passe de l'expérimentation animale à l'application clinique. Il installe, dans son laboratoire à la Sorbonne, deux cylindres de tôle boulonnée où une pompe à vapeur modifie la pression et la composition des gaz et où un homme peut tenir debout. Il teste sur lui-même et sur ses collègues les effets de l'augmentation ou de la diminution de la pression d'oxygène, et évalue les limites de ces paramètres compatibles avec la vie. Ainsi, il décrit les effets de l'hypoxie (un manque d'oxygène responsable d'une augmentation du rythme cardiaque, de maux de tête, de nausées, de troubles visuels, psychiques et moteurs), de l'hyperoxie – l'effet toxique de l'oxygène sous pression sur le métabolisme cellulaire – et de l'hypercapnie – l'intoxication par le dioxyde de carbone.

En outre, en 1874, il prépare les aéronautes Joseph Croce-Spinelli et Théodore Sivel à une ascension de leur ballon à plus de 7 300 mètres. L'année suivante, accompagnés de Gaston Tissandier, les aéronautes tentent de monter plus haut à bord du *Zénith*... Mais ils ne reçoivent pas à temps la lettre de Paul Bert qui, grâce à ses calculs, les informe qu'ils emportent des réserves d'oxygène insuffisantes pour trois personnes. Pour économiser l'oxygène, les aéronautes choisissent de ne l'utiliser qu'en cas d'extrême nécessité. Paralysés par les différents symptômes de l'hypoxie, les aéronautes ne peuvent saisir les tubes à oxygène et perdent connaissance. Parti de Paris, le *Zénith* s'écrase dans le Cher quelques heures plus tard. Croce-Spinelli et Sivel meurent en altitude. Seul Tissandier reprend conscience à la descente. Simultanément, avec le fabricant Auguste Denayrouze, Paul Bert développe un nouveau scaphandre muni d'un régulateur de pression : les scaphandriers des grands fonds et les ouvriers travaillant



5. Paul Bert dans un caisson en tôle où il expérimenta, sur lui-même, les effets des variations de pression des gaz. Il décrit tous les symptômes liés à un manque ou à un excès d'oxygène ou de gaz carbonique.

à la construction des ponts restent désormais sous l'eau sans danger pendant plusieurs heures.

Dans les années 1870, parce qu'il est médecin et que la France est en guerre, Paul Bert s'intéresse aux anesthésiques et en particulier au protoxyde d'azote, le gaz dit hilarant. Comme l'oxygène, ce gaz est dangereux quand il est respiré longtemps à forte dose. Au Muséum, Flourens découvre les propriétés anesthésiques du chloroforme, mais son utilisation chirurgicale « à la compresse » n'est pas aisée. Après quelques expérimentations chez l'animal, Paul Bert met au point un gaz anesthésique comprenant du protoxyde d'azote et de l'oxygène ; ce gaz est l'« ancêtre » des gaz anesthésiques que l'on utilise encore aujourd'hui en chirurgie. En outre, sa curiosité l'amène à étudier différents aspects de la zoologie et de la botanique ; il montre, par exemple, que la chlorophylle capte préférentiellement certains rayonnements lumineux.

Scientifique... mais aussi politique

Paul Bert a mené une autre carrière qui lui vaut d'avoir son nom sur de nombreux édifices publics. L'humiliation de la défaite de 1870 le conduit en effet vers la politique, ce qui ne l'empêche pas de poursuivre ses activités scientifiques. La République des savants entreprend diverses réformes de l'enseignement scientifique et médical, et tente de mettre en place des instituts de recherche capables de rivaliser avec ceux de l'Angleterre et de l'Allemagne.

Il mène, en tant que député de l'Yonne, une campagne très agressive contre l'enseignement dispensé par l'Église qui réfute les sciences. On lui doit les textes de lois sur la laïcité (lois Jules Ferry), ainsi que l'accession des jeunes filles à l'éducation supérieure (lois Camille Sée). Luttant pour que tous les Français aient un même niveau d'éducation, il crée le certificat d'études. Sous Gambetta, il est nommé ministre de l'Instruction publique et des cultes (novembre 1881 – janvier 1882). Avec Jules Ferry, il est le père fondateur de l'école gratuite, laïque et obligatoire. Ami du chimiste Marcelin Berthelot (1827-1907) et du microbiologiste Louis Pasteur (1822-1895) et enseignant lui-même, il rédige les premiers manuels scolaires destinés à l'enseignement scientifique. En 1886, il est nommé résident général dans deux colonies françaises, l'Annam et le Tonkin. Travailleur infatigable, il souhaite y instaurer une société nouvelle, fondée sur les acquis scientifiques de la fin de ce siècle. Mais il meurt de dysenterie à Hanoi le 11 novembre 1886, huit mois seulement après son arrivée. Ses funérailles nationales seront célébrées à Auxerre le 15 janvier 1887.

Le tribun, l'homme politique engagé, parfois détesté pour son arrogance et sa fougue, soulevant tant de passions politico-religieuses pour son combat anticlérical, a sans doute masqué l'homme de science. L'enthousiasme et la haine conjugués ont effacé la gloire de ce savant singulier. Pourtant, c'est pendant les heures les plus noires de notre pays, en 1942, que le commandant Jacques-Yves Cousteau (1910-1997) et les Américains exhument l'œuvre



6. Une des premières anesthésies au masque avec un mélange gazeux composé de protoxyde d'azote et d'oxygène.

scientifique de Paul Bert ; pour construire des avions volant à haute altitude et des sous-marins performants, il faut faire face aux problèmes de la vie dans des conditions anormales de pression et de l'immersion. Aujourd'hui, l'effet Paul Bert (ou crise hyperoxique, l'oxygène en trop forte concentration étant mortel) est connu par tous les adeptes de la plongée sous-marine ; l'Agence spatiale américaine et la Société américaine de physiologie et de médecine hyperbares décernent chaque année un prix Paul Bert pour des recherches en physiologie dans l'espace. Enseignants, scientifiques, politiques, plongeurs, aviateurs, cosmonautes, tunneliers, médecins réanimateurs et anesthésistes, sportifs des airs et des mers, tous se réfèrent – en le sachant ou non – à Paul Bert.

William ROSTÈNE est directeur de recherche en neuroendocrinologie dans l'unité INSERM 732, à l'Hôpital Saint-Antoine à Paris.

J.C. LE PÉCHON, *Risques liés à la respiration des mélanges gazeux hyperoxiques*, in INRS Hygiène et sécurité du travail, pp. 89-94, 2004.

S. KOTOVTCHIKHINE, *Paul Bert et l'instruction publique*, Éditions Universitaires de Dijon, 2002.

P.L. SERVETTAZ, *Paul Bert, un génie de caractère*, in Océans, vol. 156, pp. 98-99, 1986.

M. CHABEUF, *La vie ardente de Paul Bert*, Éditions Barre-Dayez, Paris, 1982.

J. COLIN, *Paul Bert*, in *Pour la Science*, n° 12, octobre 1978.

Intervention de Paul Bert à la Chambre des députés, le 4 décembre 1880, en qualité de rapporteur du projet de loi sur le principe de laïcité appliqué à l'enseignement primaire obligatoire : <http://www.assemblee-nationale.fr/histoire/7eb.asp>

À l'heure de la cybertaxonomie

Pour répondre au défi de la gestion de la biodiversité, l'accès aux collections, aux bibliothèques et aux données doit être modernisé et généralisé.



La biodiversité traverse actuellement une crise sans précédent depuis 65 millions d'années. Que l'on se fonde sur le nombre d'espèces de vertébrés éteintes depuis le XVII^e siècle ou sur la réduction de superficie des forêts tropicales, on estime le taux d'extinction entre 2 000 et 30 000 espèces par an. L'extinction de la moitié des espèces vivantes d'ici la fin du siècle est probable. Il est difficile de percevoir ce changement. Cataclysmique à l'échelle géologique, il est relativement lent à l'échelle d'une génération humaine. De plus, la majorité des organismes vivants sont très petits et nous avons tendance à les inclure dans des catégories – « microbes », « plancton », « insectes », etc. – qui ne rendent pas du tout compte de leur diversité.

Plus grave, nous ne mesurons que depuis moins de 20 ans l'étendue de notre ignorance : c'est seulement en 1984 qu'une projection simple, mais que nul n'avait faite auparavant, a montré que nous sous-estimons le nombre d'espèces vivantes d'au moins un ordre de grandeur. Suivant les estimations les plus récentes et les plus fiables, ce nombre se situe entre 6 et 60 millions, alors que moins de deux millions d'espèces sont connues et décrites.

Face à ces chiffres, on peut s'interroger. Cette ignorance est-elle si grave ? Est-il vraiment nécessaire d'en savoir plus sur la diversité des espèces ? À la première question, on ne sait pas vraiment répondre : on ignore aujourd'hui combien d'espèces, et lesquelles, sont nécessaires pour que l'humanité continue à se nourrir, à se reproduire et même à respirer – puisque la composition de notre atmosphère est déterminée par l'ensemble de la biosphère. Cependant, le simple fait que nous ignorons le nombre d'espèces nécessaires à notre survie devrait nous inciter à porter plus d'attention à la biodiversité.

Certes, afin de préserver autant que possible la biodiversité, des actions concrètes et immédiates (protection de certains sites ou de certaines espèces par exemple) sont nécessaires. Mais lesquelles ? Une bonne connaissance de la biodiversité est indispensable pour faire des choix pertinents.

Autrement dit, afin de gérer les écosystèmes dans une perspective de développement durable, nous devons chercher à en savoir le plus possible sur les espèces – leur nombre, leurs propriétés biologiques, leur classification qui permet de prédire ces propriétés. Tel est le rôle dévolu à la taxonomie depuis le XVIII^e siècle. Or cette science n'est aujourd'hui pas en état de répondre au défi posé.

Dans le monde entier, les taxonomistes décrivent et nomment moins de 20 000 espèces en tout chaque année. Si l'on table sur un nombre total d'espèces vivantes de l'ordre de 20 millions (une estimation moyenne), il faudrait alors un millénaire pour tout décrire. Cela ne servirait pas à grand-chose dans l'urgence de la situation actuelle, et de toute façon la plupart des espèces auront disparu sans laisser de trace avant même d'être récoltées.

Une première réaction face à ce problème est de réclamer plus de moyens. Incontestablement, le désintérêt de la communauté scientifique a mis la taxonomie dans une misère dont il faut d'abord la sortir. Mais cela ne suffit pas. Il ne faut pas seulement faire plus, il faut aussi faire mieux : améliorer les méthodes, les techniques et les infrastructures de la taxonomie. Le filet à papillons n'est pas le seul outil des naturalistes. La taxonomie a en particulier besoin des collections des grands muséums d'histoire naturelle et jardins botaniques.

Les collections de spécimens et les bibliothèques qui les accompagnent ont été constituées depuis deux siècles, à un coût cumulé qui dépasse probablement celui de la conquête spatiale. Indispensables, elles stockent et rassemblent pour les chercheurs non seulement les échantillons dont ils ont besoin, mais aussi les connaissances de leurs prédécesseurs.

Or seuls ceux en mesure de visiter physiquement les collections et bibliothèques ont pleinement accès à ces connaissances. C'est un premier goulot d'étranglement. Supprimons-le par deux moyens : d'abord en soutenant les visites de chercheurs d'autres institutions, à l'instar de ce que fait la Commission européenne avec le programme *Synthesys* d'accès aux très grandes infrastructures de recherche ; mais aussi et surtout, pour l'avenir, par l'informatisation et la

mise à disposition sur le Web des catalogues, des images des spécimens et des textes, en développant le système dont le portail de données du GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*, <http://www.gbif.org>) est le prototype. Seulement ainsi les scientifiques des pays en développement, où se situe la plus grande partie de la biodiversité, mais dont les experts et la connaissance se trouvent en Europe et en Amérique du Nord, pourront-ils disposer des données indispensables à leur développement durable.

L'accès à la science existante serait une bonne chose, mais il s'agit également de produire de nouvelles connaissances. Pour ce faire, il serait vain de vouloir multiplier par 1 000 le nombre de chercheurs taxonomistes, qu'en tout état de cause nous ne saurions pas former dans un délai utile. En revanche, les technologies de l'information et les techniques liées à l'ADN permettraient d'accélérer la création et l'acquisition de nouvelles connaissances.

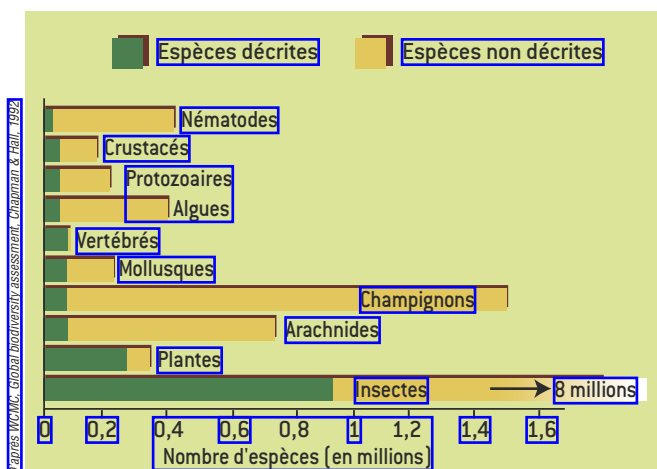
Ainsi, le programme *Barcode of Life* (le code-barres de la vie) ouvre une nouvelle perspective. En associant à chaque description, à chaque spécimen de référence conservé dans les collections, une courte séquence d'ADN placée dans un système d'information en ligne, nous pourrions à la fois accélérer le traitement des inventaires de faune et de flore, et permettre aux non-spécialistes d'accéder directement, par le Web, à l'identification des organismes vivants et, par là-même, à l'ensemble des connaissances disponibles.

Accéder aux connaissances, moderniser les méthodes

Outre la mise en œuvre de tels outils, le Web doit également permettre un accroissement qualitatif et quantitatif des connaissances grâce à une plate-forme informatique, dite de cyber-taxonomie, qui permettra aux chercheurs de s'associer et de collaborer en temps réel pour décrire et réviser les espèces. On espère ainsi réduire notablement le temps qui sépare la récolte des spécimens sur le terrain de l'intégration des nouvelles connaissances au corpus de savoir disponible.

Les méthodes d'inventaires elles-mêmes peuvent et doivent être améliorées. Pour mieux connaître le patrimoine naturel et ainsi aider à le préserver et à le gérer, l'organisation collective du travail doit changer d'échelle. Il faut passer d'un système de récoltes individuelles et non standardisées à des opérations collectives massives, organisées selon des protocoles permettant à la fois d'évaluer la représentativité des échantillons récoltés et de comparer les inventaires, que ce soit dans l'espace ou dans le temps.

Ainsi, il s'agit aujourd'hui de changer la taxonomie collectivement et à grande échelle : développer les inventaires tous taxons, développer l'identification moléculaire, intégrer les données des inventaires, des collections et des bibliothèques dans un système d'information distribué, mettre au



La connaissance de la biodiversité est très insuffisante, comme le montrent ces estimations relatives aux groupes d'organismes les plus importants.

point la plate-forme informatique pour la cyber-taxonomie. Sans oublier la formation des jeunes chercheurs qui assureront l'acquisition et la mise à disposition des connaissances.

Ces enjeux ne sont pas à l'échelle des chercheurs, mais à celle des grandes institutions mondiales qui se sont associées, avec le soutien de la Commission européenne, dans le Réseau d'excellence EDIT (*European Distributed Institute of Taxonomy*, institut européen distribué de taxonomie). Celui-ci réunit les plus grands muséums et jardins botaniques européens (18 institutions), nord-américains et russes. EDIT, qui vient d'être lancé et dont le budget est de 11,9 millions d'euros pour cinq ans, constitue le plus grand effort concerté jamais consenti pour la taxonomie.

Il est frappant de constater que l'initiative, qui trouve son origine dans la pression internationale (la Convention de Rio par exemple), vient de la Commission européenne. On attend toujours que la France, dont le Muséum national est l'une des trois plus importantes institutions taxonomiques de référence du monde, assume sa responsabilité vis-à-vis de la biodiversité, et que la politique de son gouvernement aille au-delà des bonnes intentions exprimées. En janvier 2005, à Paris, lors de la Conférence internationale sur la biodiversité qu'il avait lui-même suscitée, le président de la République déclarait notamment : « Parallèlement à l'action immédiate, nous devons donc approfondir la connaissance de la biodiversité [...] afin de permettre à la communauté internationale d'exercer ses responsabilités. » Reste à s'en donner les moyens.

Simon TILLIER est professeur au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et directeur du Réseau d'excellence EDIT (*European Distributed Institute of Taxonomy*).

Les limites de la science



Les limites de l'exploration de l'Univers

L'observation de l'Univers a notablement progressé, tant au sol que de l'espace. Le bestiaire des objets célestes ne cesse de s'étoffer. En revanche des limites techniques et théoriques subsistent. Seront-elles levées ? En partie seulement, selon l'astrophysicien Roland Lehoucq.

Pour la Science : L'observation du ciel depuis la Terre révèle des objets de plus en plus éloignés grâce à des télescopes toujours plus puissants. Que peut-on observer de la Terre ?

Roland Lehoucq : Même si l'observation depuis la Terre a ses limites, on peut facilement voir de nombreux objets célestes : la Lune, le Soleil, quelques planètes, les étoiles. Mais aussi d'autres objets qui ont été plus difficiles à découvrir parce qu'ils sont très peu lumineux. Les premières observations ont eu lieu à l'œil nu, puis vinrent les premiers instruments astronomiques – lunette ou télescope – permettant de récupérer davantage de lumière. On a fabriqué des télescopes et des lunettes toujours plus puissants non pas tant pour grossir les objets observés, mais surtout pour collecter toujours plus de lumière, ce qui a autorisé l'observation d'objets peu lumineux. Un télescope qui a un diamètre 100 fois supérieur à celui de notre pupille collecte 10 000 fois plus de lumière, et les grands télescopes modernes captent beaucoup plus de lumière que les anciens. La première limite franchie par de tels instruments a été celle de la luminosité. Petit à petit, on a observé des objets qui étaient trop faibles pour être vus à l'œil nu. L'accroissement de la taille des instruments a aussi amélioré la résolution des images observées, c'est-à-dire la capacité à distinguer deux détails proches.

Pour la Science : Même si les progrès ont été remarquables, les observations réalisées depuis la Terre ne dépendent-elles pas trop des conditions météorologiques ?

Roland Lehoucq : Si, bien sûr. Les perturbations de l'atmosphère, les nuages, les mouvements de convection perturbent les observations et, qui plus est, les astronomes ne peuvent rien faire durant la journée, ni les nuits où la Lune

est trop brillante ! Une façon d'éviter les nuages, c'est de faire les observations le plus haut possible, par exemple au sommet des montagnes. De plus, quand l'observateur est en altitude, l'épaisseur de l'atmosphère qui le surplombe diminue. L'atmosphère est une sorte de filtre qui s'interpose entre la source de lumière – les astres – et les détecteurs – les yeux ou les télescopes. Or l'atmosphère est parcourue de vents, de turbulences, de poussières diffusant la lumière, déformant les images et entravant l'observation. Qui plus est, une observation au sommet d'une montagne permet de s'affranchir de la pollution lumineuse intense due aux grandes villes. Enfin, en montagne, en altitude, l'air est froid et sec, la vapeur d'eau y est rare ; or c'est un gaz qui absorbe considérablement certains rayonnements, notamment dans le domaine infrarouge.

Pour la Science : Une technique récente, l'optique adaptative, ne permet-elle pas de s'affranchir des fluctuations de l'atmosphère ?

Roland Lehoucq : Les performances des télescopes se sont améliorées à mesure que l'on a su fabriquer des miroirs de grande taille. On a ainsi obtenu des miroirs d'un seul bloc de cinq à six mètres de diamètre et de 60 centimètres d'épaisseur. Ils pesaient des tonnes et étaient évidemment très difficiles à fabriquer. Avec l'optique active, il est possible d'élaborer des miroirs de grande taille, minces et donc légers. Le miroir doit alors être soutenu par un jeu de vérins pilotés, dotés de capteurs et qu'un ordinateur réactualise toutes les 30 secondes : ces capteurs peuvent détecter des différences de pression équivalant au poids d'une mouche déposée sur le miroir. Ce dispositif déforme le miroir en temps réel pour qu'il conserve sa forme parabolique. En même temps, ces vérins supportent le miroir,

qui ne risque plus de se rompre sous son propre poids. Mais, paradoxalement, on ne cherche pas à obtenir une forme parfaite ; au contraire, en jouant sur la souplesse du miroir, ces vérins permettent de compenser les déformations de l'image dues aux turbulences atmosphériques. Ce n'est plus de l'optique active, mais de l'optique adaptative, c'est-à-dire que les déformations doivent être appliquées en temps réel pour compenser l'effet des turbulences atmosphériques (le temps de réaction est de l'ordre du dixième de seconde, au plus de la seconde). L'électronique doit être suffisamment rapide pour analyser l'image et calculer les perturbations qu'elle a subies ; une petite partie de la lumière recueillie est déviée à cet effet, et permet de suivre comment évolue cette image. Le logiciel de contrôle évalue comment agir sur les vérins pour restaurer une image stable et de qualité. Grâce à cette technique, des miroirs de plus de six mètres ont été construits dès les années 1990.

Aujourd'hui, des miroirs de plusieurs dizaines de mètres de diamètre sont envisagés. Ces télescopes capteront beaucoup plus de lumière, de sorte que l'on détectera la lumière d'objets très faibles avec une résolution notablement améliorée. Le *Very Large Telescope* européen, VLT, installé au Chili, est constitué de quatre télescopes de 8,20 mètres de diamètre. La résolution des images obtenues par le VLT est meilleure que celle du télescope spatial *Hubble*, qui n'est certes pas soumis aux perturbations atmosphériques, mais dont le miroir mesure seulement 2,40 mètre de diamètre, de sorte que la résolution est plusieurs fois inférieure à celle d'un télescope terrestre. Le VLT est capable de distinguer un détail qui correspondrait à une pièce de 1 euro vue à 320 kilomètres !

Pour la Science : Ces télescopes détectent-ils seulement la lumière visible ?

Roland Lehoucq : Certains d'entre eux détectent, en plus de la lumière visible, une partie du rayonnement infrarouge qui parvient jusqu'au sol, l'essentiel de ce rayonnement étant piégé par l'atmosphère et le reste réémis vers l'espace. Une grande partie de la lumière infrarouge est absorbée par l'atmosphère terrestre. Mais les rayonnements ultraviolet, visible et infrarouge ne représentent qu'une toute petite partie du spectre électromagnétique. Imaginons que les sept octaves d'un piano représentent le spectre électromagnétique, de l'ultraviolet à l'infrarouge. La lumière visible ne représenterait qu'une seule de ces sept octaves. Cela donne une idée de la pauvreté de l'observation du ciel quand on se contente d'observer dans le visible. C'est pourquoi les astrophysiciens étudient tout le spectre, du rayonnement gamma jusqu'aux ondes radio. Quittant le domaine des ondes électromagnétiques, ils étudient aussi les particules de haute

énergie, détectées au début du XX^e siècle par le physicien allemand Victor Hess. Ces particules sont essentiellement des protons de très haute énergie : quand ils arrivent sur la haute atmosphère, ils interagissent avec les molécules de l'air, et produisent des gerbes de particules secondaires. C'est pour cette raison que les pilotes d'avions qui voyagent à des altitudes élevées sur les vols transatlantiques portent, depuis quelques années, un badge qui enregistre la dose de rayonnement accumulée au fil des vols. On commence à détecter les particules cosmiques de très haute énergie à l'Observa-



L'observation de l'Univers se fait soit de la Terre, par exemple grâce au VLT, qui scrute le ciel en lumière visible (a), à l'Observatoire Auger qui traque les rayons cosmiques de très haute énergie (b), soit de l'espace avec *Integral*, qui détecte le rayonnement gamma (c) ou encore avec WMAP (d), qui enregistre les données du fond diffus cosmologique.

toire Auger en cours de construction en Argentine. L'Observatoire couvrira 3 000 kilomètres carrés de surface et des détecteurs régulièrement espacés scruteront sans cesse le ciel. On a déjà détecté des particules d'ultra haute énergie, 100 milliards de fois plus énergétiques que les plus énergétiques observées jusque dans les années 1970-1980, qui créent des gerbes de particules très rapides. Ces particules secondaires sont détectées par des télescopes qui observent la fluorescence ultraviolette qu'elles induisent dans l'atmosphère, mais aussi par des cuves d'eau qui observent l'effet Cerenkov des pluies de particules (l'effet Cerenkov est une sorte d'onde de choc lumineuse, accompagnée d'un rayonnement bleu caractéristique, qui se produit quand une particule se déplace dans un milieu plus vite que la lumière dans ce milieu). D'après les caractéristiques des gerbes de particules, les physiciens sont capables d'évaluer l'énergie et la direction de la particule qui leur a donné naissance. L'Observatoire Auger est immense parce que la fréquence de ces particules de très haute énergie est de l'ordre de une par kilomètre carré et par siècle : elles sont extrêmement rares.

Les limites techniques sont innombrables : la masse en orbite est nécessairement limitée, les détecteurs doivent être refroidis à l'hélium liquide, les matériaux résister à de fortes contraintes thermiques ou mécaniques...

Pour la Science : Après ces exemples des possibilités et des limites de l'observation depuis la Terre, abordons l'observation depuis l'espace : on évite ainsi toutes les contraintes évoquées dues à l'atmosphère. Quels sont les rayonnements étudiés grâce aux satellites ?

Roland Lehoucq : Effectivement, dans l'espace, on s'affranchit des turbulences atmosphériques. Il n'est plus nécessaire de corriger leurs effets. Le télescope *Hubble* fonctionne depuis une quinzaine d'années. Il a produit une myriade de magnifiques images et de résultats scientifiques stupéfiants. Dans l'espace, il n'y a pas d'atmosphère qui diffuse la lumière du Soleil, de sorte qu'il fait nuit tout le temps et que l'observation des étoiles peut se faire en continu, à condition bien sûr d'observer à l'opposé du Soleil. *Hubble* fait ses observations quasiment 24 heures sur 24, 365 jours par an. Les difficultés sont essentiellement techniques : il faut mettre sur orbite des centaines de kilogrammes de matériel et, en cas de problème technique, il faut aller réparer sur place. L'espace présente des contraintes, mais la qualité d'observation est remarquable. On dispose de plusieurs télescopes dédiés à l'observation des différents rayonnements. *Hubble* observe dans l'infrarouge et en lumière visible. Bien qu'il ne soit pas obsolète, il va être mis hors service pour des raisons d'argent, semble-t-il. Aujourd'hui, il est devenu un instrument banal au regard

des instruments terrestres. Un autre télescope spatial dont le miroir devrait mesurer huit mètres de diamètre, c'est-à-dire captant beaucoup plus de lumière, est à l'étude. Mais on ne placera pas un tel miroir dans une fusée, et il faudra donc le « plier » sur Terre et le « déplier » dans l'espace ! Beaucoup des difficultés techniques semblent d'ores et déjà résolues, et il devrait y avoir sur orbite, d'ici quelques années, des télescopes de huit à dix mètres observant dans le visible et l'infrarouge. D'autres longueurs d'onde sont observées, notamment les rayons X et les rayons gamma. Pour les rayons X, il s'agit des télescopes XMM et *Chandra*, pour le rayonnement gamma c'est le satellite *Integral*, pour l'infrarouge, c'est *Spitzer*. Voici un autre exemple de contraintes : la caméra qui détecte les infrarouges émet elle-même des infrarouges. Pour ne pas confondre ces infrarouges avec ceux de la source, il faut refroidir la caméra... jusqu'à -269 °C ! Pour ce faire, il faut embarquer d'énormes quantités d'hélium liquide. Quand l'hélium est épuisé, le satellite cesse d'être fonctionnel.

SOHO est un observatoire spécifiquement dédié à l'étude du Soleil. Il observe la couronne et les oscillations solaires ; ces mouvements de la surface du Soleil, très faibles et lents, résultent des ondes de pression qui se propagent à l'intérieur du Soleil. Un autre satellite, WMAP, livre des informations sur le fond diffus cosmologique, un rayonnement capté dans la gamme des micro-ondes correspondant à la plus vieille lumière émise par l'Univers, au moment où il est passé de l'état de plasma à celui de matière neutre. SOHO et WMAP ont une particularité : ils ne sont pas en orbite proche autour de la Terre, mais sont situés à des points d'équi-attraction entre la Terre et le Soleil, les points de Lagrange. Pour observer le Soleil en permanence, SOHO est placé entre la Terre et le Soleil, à 1,5 million de kilomètres. WMAP est, quant à lui, situé à l'opposé de SOHO par rapport à la Terre afin d'explorer le fond diffus cosmologique sans être gêné par le Soleil.

Pour la Science : À côté des limites techniques évoquées (l'hélium ou les masses limitées que l'on peut envoyer dans l'espace), une autre difficulté n'est-elle pas aussi celle du traitement des données ?

Roland Lehoucq : Il y eut une difficulté liée aux mémoires embarquées dont la capacité de stockage était trop limitée. Après les temps héroïques des premiers satellites, les progrès en électronique ont permis de stocker l'information à bord. Il faut toutefois prendre des précautions car, à basse altitude, les particules de haute énergie du Soleil endommagent les mémoires, risquant de détruire des données précieuses. Une autre difficulté est liée aux différences de température auxquelles un satellite est soumis : du côté de la partie exposée au soleil, il peut régner une température de l'ordre de 100 à 120 °C, tandis que sur le côté à l'ombre, la température peut être négative. Les matériaux utilisés doivent supporter des gradients de température supérieurs à 100 degrés sur quelques mètres de longueur : les contraintes thermiques sont gigantesques. Soumises à de tels écarts de température, les soudures, par exemple, sont extrêmement fragiles, toute bulle d'air étant un site

de rupture possible. Enfin, évoquons la question de l'énergie. *Chandra*, par exemple, pèse cinq tonnes. C'est le plus gros satellite jamais envoyé par la navette spatiale. Pourtant, il ne consomme pas plus de puissance qu'une plaque électrique ! Les instruments embarqués doivent être conçus pour consommer peu et utiliser efficacement le peu d'énergie disponible. C'est une contrainte importante.

Pour la Science : À ces limites techniques, ne doit-on pas ajouter les contraintes théoriques ? Comment évaluer la distance des objets célestes sans repère absolu ? Comment tenir compte de l'expansion de l'Univers ?

Roland Lehoucq : Commençons par un problème très important, celui de l'évaluation de la distance. En astrophysique, tous les objets semblent disposés sur une sphère, la sphère céleste, et l'on n'a, *a priori*, aucune information sur leur distance. Quand on observe un point brillant, cela peut être une bougie toute proche ou une supernova extrêmement éloignée. Déterminer la distance permet de se faire une idée de la luminosité intrinsèque de l'objet observé, car une luminosité apparente faible n'est pas nécessairement synonyme d'éloignement. Les mesures effectuées par le satellite *Hipparcos* ont révolutionné la connaissance de notre univers proche. Ce satellite a directement mesuré la distance de près de 100 000 étoiles. Ces mesures ont révélé que 80 pour cent des distances d'étoiles que l'on avait évaluées auparavant présentaient des erreurs comprises entre 10 et 20 pour cent. Comme toutes les autres méthodes d'estimation des distances sont fondées sur la connaissance de celles des étoiles les plus proches, on comprend l'intérêt des mesures astrométriques d'*Hipparcos*, et de son successeur *Gaïa*, qui devrait observer 10 000 fois plus d'étoiles !

Parle-t-on d'éloignement spatial ou d'éloignement temporel ? En fait, les deux sont liés. Quand on reçoit un rayonnement lumineux, il a voyagé dans l'espace et conjointement dans le temps. De plus, comme l'Univers est en expansion, la lumière qui, au départ, était dans la gamme visible, arrive avec une longueur d'onde différente de celle qu'elle avait à l'émission : elle est décalée vers le rouge. Plus ce décalage (en anglais, *redshift*) est important, plus l'objet observé est éloigné. Ce paramètre nous permet d'ordonner les objets célestes dans le temps et dans l'espace. Pour en déduire une distance ou un temps de parcours de la lumière, il faut un modèle cosmologique décrivant l'évolution dynamique de l'Univers. Disposant d'un tel modèle et du décalage vers le rouge d'un objet particulier, on peut calculer séparément sa distance et le temps que sa lumière a mis pour nous parvenir. Selon le taux d'expansion de l'Univers, la lumière n'aura pas mis le même temps pour arriver et la distance de l'objet s'en trouvera modifiée : ainsi les distances calculées reposent sur le choix du modèle cosmologique, ce qui impose une limite théorique.

Pour la Science : La mesure des distances des étoiles est donc une limite qu'on devrait franchir. Mais comment évalue-t-on les distances des objets situés aux confins de l'Univers ?

Roland Lehoucq : Aujourd'hui, les objets les plus lointains observés ont un décalage vers le rouge voisin de dix. En fait, le décalage le plus lointain que l'on puisse observer, c'est celui du fond diffus cosmologique : il vaut 1 100. Nous l'avons évoqué, le fond diffus cosmologique est une lumière émise au moment où la matière de l'Univers est passée d'un état

Si certaines contraintes techniques seront levées, certaines limites théoriques persisteront, notamment le fait que l'astrophysicien observe l'Univers de l'intérieur et d'une position particulière.

de plasma à celui où les électrons et les noyaux se sont combinés pour former des atomes neutres. Dans un plasma, la lumière diffuse très facilement sur les électrons, qui sont séparés des noyaux. En revanche, dès que les électrons et les atomes ionisés se combinent, la lumière cesse quasiment d'interagir avec les électrons de la matière (à l'exception de quelques longueurs d'onde particulières). Le plasma, opaque à la lumière visible, devient matière neutre : elle est transparente. Toute la lumière émise au moment de la recombinaison (des électrons avec les atomes ionisés) a commencé à se propager dans toutes les directions de l'Univers, et nous parvient aujourd'hui après 13,7 milliards d'années d'expansion. À cause du décalage vers le rouge, on la reçoit sous forme d'un rayonnement micro-ondes, qui porte la trace de l'état de la matière au moment où l'Univers est devenu transparent. Le fond diffus cosmologique est une frontière absolue, au-delà de laquelle l'Univers est opaque. C'est une limite intrinsèque à l'observation de l'Univers dans le domaine des ondes électromagnétiques.

Ainsi, l'exploration de l'Univers est soumise à des contraintes techniques que l'on repousse progressivement. Elle est aussi soumise à des contraintes théoriques intrinsèques au modèle cosmologique, et l'on ne pourra jamais observer le rayonnement initial, au-delà du fond diffus cosmologique, du moins si l'on reste dans le domaine des ondes électromagnétiques. Une des solutions consistera sans doute à explorer l'Univers plus jeune avec des signaux différents des ondes électromagnétiques (mais cela ne sera guère facile). Enfin, contrairement au physicien qui observe de l'extérieur le système sur lequel il expérimente, l'astrophysicien observe de l'intérieur l'Univers qu'il étudie : situé au milieu d'une clairière, il ignore si les arbres qu'il observe ne représentent qu'un mince rideau d'arbres ou une épaisse forêt ! C'est une limite incontournable, inhérente à la position de l'homme dans l'Univers.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien dans le Service d'astrophysique du Commissariat à l'énergie atomique, CEA, de Saclay.

Ce texte est un résumé d'une conférence que Roland Lehoucq a donnée au Palais de la Découverte. Le texte intégral de la conférence sera en ligne sur le site de France Culture (<http://www.radiofrance.fr/chaines/france-culture/sommaire/>) durant le mois d'août 2006.

Les prémices de la pensée symbolique

Des coquillages percés, découverts sur des sites algériens et israéliens, font remonter la parure – et la pensée symbolique – à plus de 100 000 ans.



En 2004, Francesco d'Errico et Marian Vanhaeren du CNRS et deux collègues sud-africains avaient analysé 41 petits coquillages de l'espèce *Nassarius kraussianus* découverts

dans la grotte de Blombos, en Afrique du Sud. Ils avaient déduit de leur nature (non alimentaire), des trous (pratiqués par l'homme) et de l'usure due à leur port qu'il s'agissait de parures. Selon eux, ces ornements étaient destinés à modifier l'image de la personne qui les portait en symbolisant son sexe, son âge, son appartenance à un groupe ou encore son rôle au sein de ce groupe. Or les coquillages percés de Blombos datent de 75 000 ans. La pensée symbolique aurait donc au moins cet âge...

Toutefois, M. Vanhaeren et F. d'Errico ont considéré que les perles de Blombos ne suffisaient pas à établir sans contestation possible l'ancienneté de l'ornementation personnelle. Ils ont retrouvé d'autres coquillages percés dans les musées et en ont fait l'analyse avec des confrères anglais et israéliens. Ainsi, au musée de l'Homme à Paris, ils ont découvert une boîte contenant un coquillage percé du genre *Nassarius gibbosulus* entreposé avec d'autres collections au Laboratoire de Préhistoire par Jean Morel. Dans les années 1940, ce préhistorien fouilla dans l'Est de l'Algérie le site de l'oued Djebbana, situé à 200 kilomètres

Dans cette boîte (a), le préhistorien Jean Morel a soigneusement entreposé le coquillage percé qu'il a trouvé sur le site de l'oued Djebbana dans les années 1940. D'autres perles de ce type avaient déjà été mises au jour : ce sont des coquillages du genre *Nassarius* percés par l'homme, il y a quelque 75 000 ans (b).

à l'intérieur des terres, un site de la culture atérienne. Cette culture nord-africaine serait issue, pense-t-on, de la culture moustérienne (~300 000 à ~30 000). En Europe, on associe généralement la culture moustérienne aux Néandertaliens, mais, du moins au Proche-Orient, elle l'est aussi avec l'homme moderne, *Homo sapiens sapiens*. Malheureusement, on ne dispose que d'une datation ancienne au carbone 14 du site de l'oued Djebbana, qui établit seulement que son âge est supérieur à 35 000 ans. De nouvelles datations suggèrent aujourd'hui que les âges de plusieurs sites atériens seraient compris entre 60 000 et 90 000 ans.

Les chercheurs ont aussi retrouvé d'anciens coquillages percés au Muséum d'histoire naturelle de Londres, dont deux exemplaires appartiennent à l'espèce du coquillage algérien. Ils proviennent du site moustérien de Skhul, fouillé dans les années 1930 en Palestine par des préhistoriens anglais. L'analyse des concrétions attachées à l'un des deux spécimens révèle que ces coquillages proviennent de la couche qui a livré plusieurs sépultures d'humains modernes. Or les datations récentes des restes trouvés à Skhul indiquent un âge compris entre 100 000 et 135 000 ans!

Ainsi, deux nouveaux indices, dont l'un est incontestable, attestent que l'ornementation personnelle remonte à 100 000 ans au moins. En outre, ils suggèrent qu'elle est venue d'Afrique avec les hommes modernes. Une version différente de la vision classique qui faisait remonter l'apparition de la pensée symbolique à l'arrivée d'*Homo sapiens sapiens* en Europe, il y a 40 000 ans.

François Savatier

Science, vol. 312, pp. 1785-1788, 23 juin 2006

PLUSIEURS SOUCHES DE LA GRIPPE AVIAIRE DÉTECTÉES AU NIGERIA

Le 7 février dernier, l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) publie le premier rapport officiel de la présence du virus hautement pathogène de la grippe aviaire H5N1 en Afrique. Le Nigeria – premier producteur de volailles sur le continent – est touché, avec un premier foyer d'infection dans l'État de Kaduna, au Nord du pays.

L'Institut d'immunologie du Laboratoire de santé (LNS) du Luxembourg collabore depuis cinq ans déjà avec le Département de médecine vétérinaire de l'Université d'Ibadan (Sud-Ouest du Nigeria) sur différents projets de recherche en virologie aviaire. Dès l'annonce du premier foyer de grippe aviaire, un appel à l'aide nous parvient : il faut détecter et contrôler au plus vite H5N1. Trois experts du Luxembourg se rendent sur place, avec des réactifs et des équipements pour le diagnostic et la biosécurité. Très vite, malgré les fréquentes coupures d'électricité et malgré la chaleur, une équipe nigériane est formée à la détection moléculaire du virus. Grâce à une collaboration efficace entre éleveurs, vétérinaires et chercheurs, des dizaines d'échantillons aviaires arrivent chaque jour de tout le Sud-Ouest nigérian au laboratoire d'Ibadan et sont testés.

Des virus de deux élevages de l'État de Lagos (sur la côte Sud-Ouest du Nigeria) sont isolés, en collaboration avec le Dépar-



tement de virologie du Centre médical universitaire Erasmus de Rotterdam, aux Pays-Bas, puis sont séquencés. Les résultats montrent que ces virus viennent de la zone Asie de l'Ouest/Russie/Europe/Afrique et sont différents des souches présentes en Asie du Sud-Est. Qui plus est, les souches des deux élevages du Sud-Ouest et la souche du premier foyer dans le Nord nigérian sont très différentes, aussi éloignées l'une de l'autre qu'elles le sont des souches russes, par exemple. Cela indique que plusieurs souches d'H5N1 ont été introduites au Nigeria.

Pour le moment, on ignore comment elles l'ont été : par des oiseaux migrateurs ? Par des volailles vivantes contaminées importées de pays où sévit la grippe aviaire ? Quoi qu'il en soit, les mesures prises (élevages contaminés abattus, zones de sécurité de trois kilomètres autour des fermes concernées) semblent avoir limité la multiplication des foyers d'infection, et les souches des foyers déclarés étant différentes, cela signifie que l'épidémie ne s'est pas propagée de ferme à ferme. Aucun cas de contamination humaine n'a été rapporté pour le moment.

Mariette Ducatez, Institut d'immunologie, LNS, Luxembourg

Nature, vol. 442, p. 37, 6 juillet 2006

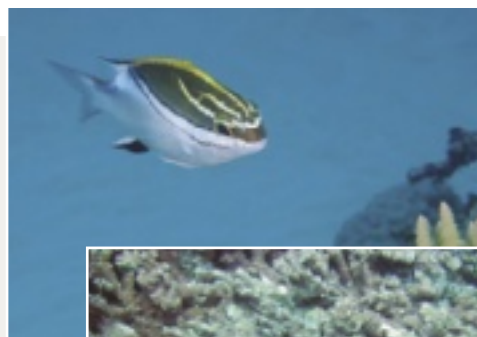
La confiance règne

L'idéal pour choisir un dentiste serait d'en voir plusieurs à l'œuvre et d'opter pour celui qui prodigue les meilleurs soins, surtout les moins douloureux. Hélas, peu de praticiens s'offrent ainsi en démonstration et nous en sommes réduits à faire confiance au bouche à oreille. D'autres sont mieux lotis : Redouan Bshary, de l'Université de Neuchâtel, en Suisse, et Alexandra Grutterqui, de l'Université du Queensland, en Australie, ont montré que certains poissons qui souhaitent se débarrasser de leurs parasites cutanés observent le comportement des poissons nettoyeurs avant d'en choisir un. Ce faisant, ils s'assurent du meilleur traitement et... nous le verrons, refrenent la gourmandise du nettoyeur.

Un nettoyeur peut éliminer chaque jour les parasites de 100 à 200 poissons (de 30 à 50 espèces différentes), au cours de 2000 séances. Cependant, la tentation est grande de se nourrir du mucus visqueux sécrété par la

peau des clients, qui est autrement plus nourrissant et à leur goût. Pourquoi les nettoyeurs-tricheurs ne sont-ils pas aussi nombreux qu'on pourrait l'attendre dans de telles conditions ? C'est là que l'observation prend tout son sens.

Les éthologistes ont étudié un client (*Scolopsis bilineatus*, ci-contre en haut) dans un aquarium où il pouvait suivre l'activité de deux nettoyeurs (*Labroides dimidiatus*, ci-contre en bas) : l'un était coopératif et s'occupait avec zèle d'un poisson factice (recouvert d'une nourriture qui convenait au nettoyeur) ; l'autre se désintéressait du modèle (dépourvu de toute friandise). Le client passa beaucoup plus de temps avec le premier, en apparence coopératif ! Une deuxième expérience a montré que les nettoyeurs dédaignent souvent leur nourriture favorite et lui préfèrent une nourriture moins à leur goût, si celle-ci leur est fournie avec plus de régularité. Ainsi, dans une forme de mutualisme que l'on croyait réservée aux



humains, les nettoyeurs se contentent des parasites et se « défendent » de la tentation pour s'assurer une nourriture abondante, le client privilégiant les nettoyeurs respectueux. Même les poissons (nettoyeurs) se mettent à la place de l'autre (le client) pour espérer le meilleur gain.

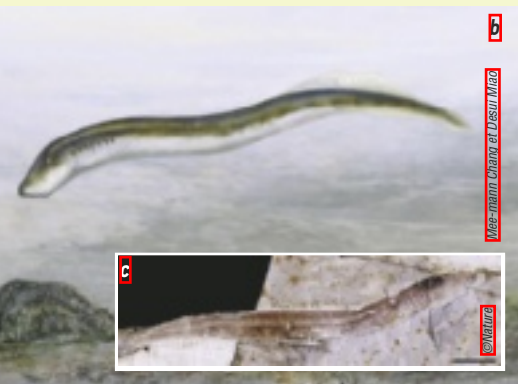
Loïc Mangin

Nature, vol. 441, pp. 975-978, 2006

Immuables lamproies



Dave Bennett, Michigan Sea Grant



Mee-mann Chang et Desui Miao



Science

La lamproie *Mesomyzon mengae*, découverte en Chine et datée du Crétacé inférieur (il y a 125 millions d'années) ressemblait à s'y méprendre à ses cousines actuelles (a, la bouche). Ici, une reconstitution de l'animal (b) à partir du fossile (c, la barre noire représente un centimètre).

Malgré leur intérêt supposé pour les cailloux, les lamproies, ou « suceuses de pierres » selon l'étymologie du nom, sont rarement découvertes à l'état fossile, car leur squelette est constitué de cartilage facilement dégradé. Les lamproies sont, avec les myxines, les seuls vertébrés vivants dépourvus de mâchoire articulée. Toutefois, les poissons sans mâchoire, les agnathes, étaient plus diversifiés au Paléozoïque. Par exemple, certains étaient recouverts d'une armure ossifiée à l'inverse des formes actuelles. Dans la lignée des lamproies, seules deux ou trois espèces fossiles ont été découvertes, dans des roches d'origine marine du Carbo-nifère (il y a entre 325 et 360 millions d'années) d'Amérique du Nord. C'est un maigre registre pour connaître l'histoire de ce groupe ! L'équipe de Mee-mann Chang, de l'Institut de paléontologie des vertébrés et de paléoanthropologie de Pékin, et de Desui Miao, de l'Université du Kansas, a récemment mis au jour une nouvelle lamproie qui en dit un peu plus sur l'évolution de ces poissons.

La trouvaille a été faite en Chine dans le « biotope de Jehol », des gisements fossilifères du Crétacé inférieur (il y a environ 125 millions d'années). Ces gisements sont exceptionnels tant les parties molles des organismes y sont bien préservées : on y a déjà découvert de nombreux oiseaux avec leurs plumes, des mammifères poilus... C'est au tour d'un poisson cartilagineux.

Les lamproies actuelles sont le plus souvent anadromes, c'est-à-dire qu'elles vivent en mer et se reproduisent en eaux douces, mais certaines espèces sont exclusivement adaptées

à l'eau douce. Ce serait le cas de l'espèce fossile découverte, *Mesomyzon mengae*, à en croire le cortège d'espèces qui l'accompagne.

Paradoxalement, un des intérêts majeurs de cette lamproie fossile est sa ressemblance avec les lamproies actuelles. Comme elles, *Mesomyzon* a un long museau, des yeux bien développés munis de cristallins, une ventouse vraisemblablement garnie de dents pour se fixer aux proies qu'elle parasitait, un « cartilage piston » soutenant une langue permettant de râper la peau de leur hôte et de pomper leur sang ainsi que sept poches branchiales situées en arrière de la tête. La seule différence notable est un corps aux proportions plus ramassées que celui des lamproies actuelles.

Avec cette découverte, on peut dorénavant qualifier les lamproies actuelles de fossiles vivants, car leur morphologie n'a pas varié de façon notable depuis 125 millions d'années (on parle de stase évolutive) et leur registre fossile présente une immense lacune précédant les formes actuelles. Notons que les fossiles vivants parmi les poissons, tels que les cœlacanthes et les dipneustes (des poissons rattachés à la branche menant aux tétrapodes), appartiennent à des groupes autrefois diversifiés et aujourd'hui très appauvris. Cette caractéristique explique la rareté des fossiles, mais peut-elle également expliquer les stases évolutives observées ? C'est en combinant les nouvelles données de la paléontologie à nos connaissances des mécanismes évolutifs qu'une réponse à cette question pourra se dessiner.

Lionel Cavin,

Muséum d'histoire naturelle de Genève

Nature, 441, pp. 972-974, 2006

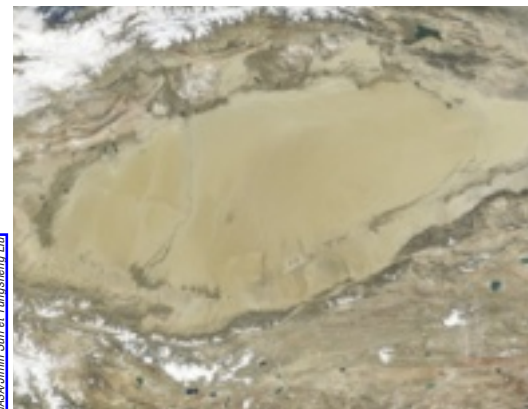
Un désert plus ancien

Le désert du Takla-Makan, au Nord-Ouest de la Chine, est une vaste étendue de dunes, la deuxième au monde en superficie après le Sahara. Depuis combien d'années ? Les chiffres avancés oscillaient entre 1 et 3,5 millions d'années, ces écarts s'expliquant notamment par la difficulté à trouver de bons enregistrements stratigraphiques. Jinmin Sun et Tungsheng Liu, de l'Institut de géologie et de géophysique de Pékin, en ont pourtant trouvé dans le Sud de l'étendue désertique, là où les vents convergent et sont arrêtés par les monts Kunlun.

Une colonne de 1 626 mètres de sédiments a été analysée. L'examen des grains, notamment de leur usure, révèle leur nature éolienne ou aquatique, et a montré que la région est recouverte de dunes depuis au moins 5,3 millions d'années. Ce profil serait la conséquence d'une détérioration climatique au début du Pliocène : d'une part, la salinité des océans a diminué de six pour cent, entraînant l'apparition d'une calotte glaciaire en Sibérie et, en conséquence, de vents froids dans la région du Takla-Makan ; d'autre part, l'élévation du plateau tibétain a perturbé le climat local en modifiant la circulation des vents.

L. M.

Science, vol. 312, p. 1621, 2006



Jinmin Sun et Tungsheng Liu

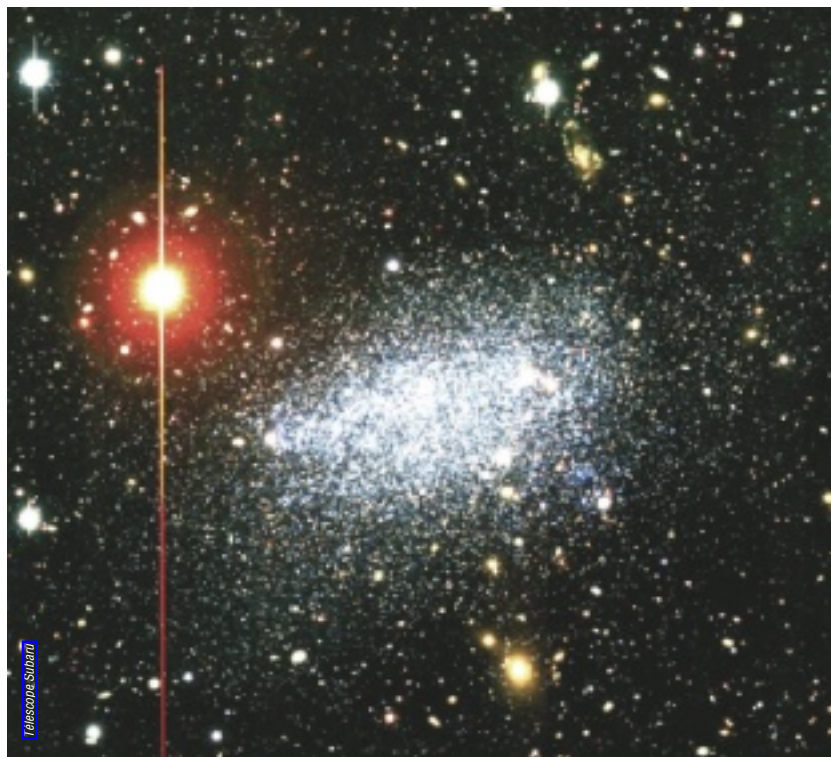
Régulation démographique chez les galaxies naines

Alors que les galaxies naines ont mis elles-mêmes un coup d'arrêt à leur multiplication au début de l'Univers, elles se forment parfois aujourd'hui lorsque de grandes galaxies s'entrechoquent.

Les galaxies naines jouent un rôle capital en cosmologie : leur distribution fournit des indices sur la répartition de la matière noire dans l'Univers. Deux études viennent éclairer l'évolution de leur population. La première, menée par Stuart Wyithe, de l'Université de Melbourne, en Australie, et Avi Loeb, du Centre Smithsonian de Harvard pour l'astrophysique, confirme que les galaxies naines se sont « autostérilisées » dans le premier milliard d'années suivant le Big Bang, ce qui a limité leur nombre. La seconde, menée par Frédéric Bournaud, de l'Observatoire de Paris, et Pierre-Alain Duc, du CEA, montre que ces objets se forment encore aujourd'hui lors de collisions entre grosses galaxies.

Le comportement autodestructeur des premières galaxies naines était pressenti sur le plan théorique. Quelques centaines de millions d'années après le Big Bang, le rayonnement ultraviolet des premières étoiles qu'elles abritaient a en effet chauffé et ionisé le gaz baignant l'Univers. Or en raison de l'agitation thermique, plus un nuage de gaz est chaud, plus il résiste à l'effondrement sous son propre poids, première étape de la formation de nouvelles étoiles et galaxies. Le réchauffement du gaz intergalactique par les galaxies naines aurait ainsi stoppé leur croissance et, partant, sélectionné les galaxies assez massives pour autoriser l'accrétion du gaz excité.

Pour le prouver, S. Wyithe et A. Loeb ont observé des quasars lointains, témoins de cette époque reculée. Leur spectre lumineux est altéré lorsque leur lumière traverse un nuage contenant de l'hydrogène non ionisé. Or cet élément est plus rare dans les environs des galaxies. Aussi, si les galaxies naines étaient nombreuses et uniformément réparties dans



Les galaxies naines, comme ici Leo A, se sont en majorité formées au tout début de l'Univers ; une faible part est née récemment lors de collisions de galaxies.

l'Univers, les spectres des quasars varieraient peu de l'un à l'autre, tandis que de grandes variations trahissent une répartition moins homogène de la matière, c'est-à-dire la prédominance d'un petit nombre de grandes galaxies. C'est ce dernier cas qui a été observé par les astrophysiciens, confirmant que les grosses galaxies ont pris le dessus sur les naines.

Les galaxies naines ne peuvent-elles pour autant naître qu'au début de l'Univers ? C'est ce que l'on croyait, jusqu'à ce que F. Bournaud et P.-A. Duc montrent, à l'aide d'une centaine de simulations, que les traînées de gaz et d'étoiles résultant de collisions de galaxies donnent naissance à de nouvelles galaxies naines. Près d'un quart d'entre elles survivent au moins deux milliards d'années. Ces naines dites de marée ne représenteraient que quelques pour cent de la population de galaxies naines ; toutefois, elles en modifient les propriétés statistiques et ont donc un impact sur les scénarios cosmologiques.

Stéphane Fay

S. Wyithe et A. Loeb, *Nature*, vol. 441, pp. 322-324, 2006 ; F. Bournaud et P.-A. Duc, à paraître, *astro-ph/0605350*

Un nouveau stock de menhirs

Le Morbihan est connu pour ses menhirs, dolmens et autres mégalithes. Une réputation qui se confirme, puisque Stephan Hinguant et ses collègues de l'Institut national d'archéologie préventive (INRAP) viennent de mettre au jour un nouveau champ de menhirs sur le site de Kerduelland, à quelques kilomètres de Carnac. Ces vestiges ont été découverts lors de travaux de terrassement.

Sur près de 3 000 mètres carrés sont éparpillés une cinquantaine de blocs de granit, mais aussi un réseau de fossés, des fondations et des fosses. Des silex taillés et des tessons de céramique révèlent deux périodes d'occupation humaine, l'une néolithique, l'autre médiévale.

Contrairement au site de Carnac, les menhirs ont été retrouvés dans les sols néolithiques d'origine, qui renferment d'importantes informations sur l'environnement des monuments et leur mise en place. Certains menhirs sont simplement couchés à côté de leur fosse d'implantation ; d'autres, déplacés, portent des traces de débitage. Au III^e millénaire avant notre ère, les mégalithes ont sans doute été renversés : un tel démantèlement se retrouve sur de nombreux sites de la même époque. Les blocs à terre ont ensuite été débités et exploités au Moyen Âge.

Philippe Ribeau-Gésippe

www.inrap.fr



UNE GAZELLE ÉCONOME

La gazelle des sables (*Gazella subgutturosa*) est dotée de mécanismes adaptatifs originaux qui l'aident à résister aux conditions extrêmes du désert.

Le dromadaire, vaisseau du désert, peut boire en une seule fois de quoi résister à la plus longue des expéditions, ou méharées. Il présente également d'autres adaptations, par exemple des réserves de graisses dans sa bosse : la combustion de graisse produit 1,1 gramme d'eau par gramme de graisse consommée contre 0,3 gramme seulement pour la combustion du sucre. Chaque espèce vivant dans les milieux arides a développé des mécanismes qui lui permettent de survivre dans ces contrées extrêmes. Stéphane Otrowski et ses collaborateurs du Centre de recherche sur la vie sauvage, en

Arabie saoudite, se sont intéressés à la gazelle des sables (*Gazella subgutturosa*) et ont découvert des mécanismes qui lui sont propres. En effet, durant les quatre mois que dure la saison où la nourriture et l'eau sont particulièrement rares, la masse des organes les plus gourmands en oxygène diminue notablement. Ce faisant, l'animal respire plus lentement et diminue la quantité d'eau ainsi éliminée. Les organes qui « maigrissent » sont le cœur et le foie. À l'inverse, l'intestin, qui, chez les ruminants, fabrique jusqu'à 46 pour cent des protéines nécessaires à l'organisme (un métabolisme grand consommateur d'énergie et d'oxygène), garde à peu près son poids tout au long de l'année. Cette différence résulte probablement du fait que la végétation, qu'il faut digérer, est le principal pourvoyeur d'eau. Autre découverte des zoologistes, le cerveau des gazelles contient beaucoup de graisses : comme pour le dromadaire, les lipides seraient aussi une assurance contre le manque d'eau et de nourriture.

L. M.

Physiological and Biochemical Zoology, vol. 79(4), 2006



Franca et Mauro Bernasconi, Lugano, Suisse

Le lac de Cadagno, en Suisse

D'où vient

composés stables à long terme qui forment de petits filets dans la roche dite roche mère. En raison des mouvements de l'écorce terrestre, la roche mère s'enfonce davantage dans le sol, et, sous l'effet de la chaleur, ces substances se décomposent en pétrole et en gaz naturel. Comment ces liaisons doubles sont-elles saturées ? Des micro-organismes sont-ils responsables de cette première transformation des lipides ?

Les chimistes ont étudié des sédiments récents (quelques milliers d'années) déposés dans le lac de Cadagno en Suisse, car ce dernier est représentatif des milieux qui ont donné des roches mères au cours de l'histoire de la Terre. Ils ont trouvé, dans les couches supérieures de sédiments, des composés stables issus de la saturation des lipides ; par exemple, le bêta-carotène est transformé en bêta-carotane. Or les structures dans l'espace – les configurations chimiques – du bêta-carotane analysé sont variées : c'est la marque d'une réaction chimique, et non d'un processus biologique dû à des micro-organismes, qui serait plus précis et sélectif (on n'obtiendrait qu'une seule configuration du bêta-carotane).

Ainsi, l'équipe de P. Albrecht a postulé que la réaction de transformation primaire des lipides est chimique. Reproduisant en laboratoire les conditions du milieu naturel, elle a observé la transformation des lipides en composés qui donneront du pétrole. La réaction chimique fait intervenir de l'hydrogène sulfuré (H_2S) qui s'ajoute sur les doubles liaisons des lipides pour donner des composés nommés thiols. Ces derniers perdent ensuite leur atome de soufre, laissant en place l'hydrogène, et des liaisons saturées. L'hydrogène sulfuré, présent dans les couches d'eau profondes, est donc l'agent d'hydrogénation, qui permet notamment de transformer le bêta-carotène en bêta-carotane. Contrairement à l'idée répandue

Le pétrole se forme au terme d'un long processus de sédimentation au cours duquel les organismes morts se transforment en substances résistant à la dégradation. On pensait que des bactéries étaient responsables des premières transformations conduisant à la préservation de la matière. Or Pierre Albrecht et ses collègues de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg et de l'Institut fédéral de technologie à Zurich ont montré qu'il n'en est rien : le principal processus primaire de transformation serait purement chimique, et non biologique.

Quand un animal ou un végétal meurt, les protéines, les acides nucléiques et les sucres qui le constituent sont décomposés – par des enzymes – et réutilisés par d'autres organismes. En revanche, ses lipides ou graisses, tel le bêta-carotène, ne sont pas dégradés. Ainsi, moins de un pour cent de la matière organique morte sédimente, c'est-à-dire qu'elle s'incorpore dans des roches ou à des matières minérales en formation. Cette fraction de lipides subit une première transformation en début de sédimentation : les liaisons chimiques doubles qu'ils contiennent seaturent, donnant des liaisons simples. On obtient des



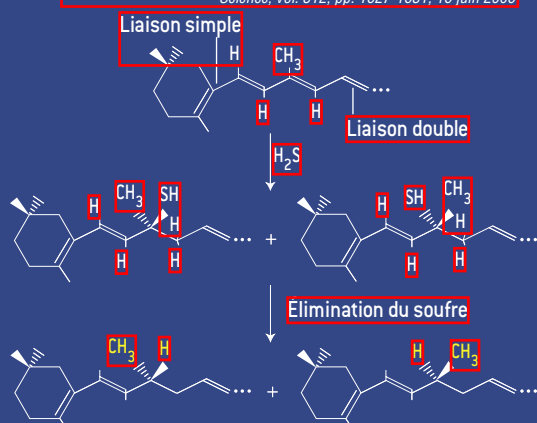
La plus **vieille** tombe **étrusque** peinte

le pétrole ?

due, les premières étapes de la formation du pétrole seraient purement chimiques... En revanche, les micro-organismes restent indispensables pour réduire les ions contenant du soufre – des sulfates – et former l'hydrogène sulfuré nécessaire à la réaction chimique...

Bénédict Salthun-Lassalle

Science, vol. 312, pp. 1627-1631, 16 juin 2006



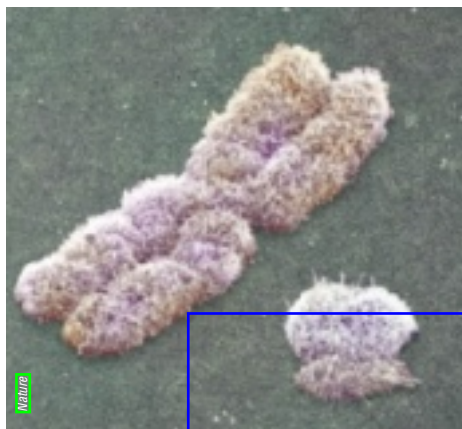
Saturation d'une double liaison, par exemple dans le bêta-carotène (on n'a représenté que quelques liaisons d'une molécule beaucoup plus longue) : l'hydrogène sulfuré (H_2S) se fixe sur un carbone d'une double liaison et est remplacé par un atome d'hydrogène. Cette réaction donne deux configurations différentes. Étant donné le nombre de liaisons qui subissent une telle réaction, le nombre de combinaisons est grand (selon les positions respectives des groupes portés par les atomes de carbone).

Une tombe étrusque découverte à Veio, non loin de Rome, est plus ancienne encore que la tombe des Canards, qui remonte à la première moitié du VII^e siècle avant notre ère.

On considère que l'histoire de la peinture étrusque commence au VII^e siècle avant notre ère par les dessins de la tombe des Canards (*tomba delle Anatre*) pour s'achever au II^e siècle par la représentation raffinée d'un typhon sur le pilastre central de la tombe du Typhon (*tomba del tifone*) à Tarquinia (capitale étrusque). Or une tombe aristocratique peinte découverte à Veio, non loin de Rome, vient d'allonger de quelques décennies cette longue histoire.

Selon Annamaria Moretti, surintendante du Latium (elle supervise l'archéologie), cette tombe remonterait aux deux premières décennies du VII^e siècle, alors que la tombe des Canards daterait de -680 à -670. Pour autant, la ressemblance de style entre les deux sépultures est manifeste : toutes deux contiennent une chambre rectangulaire aux murs enduits et peints à sec (sans fresques) et des représentations d'oiseaux. Dans la nouvelle tombe étrusque, ces oiseaux aquatiques ou migrateurs aux contours rouge vif et noir volent tous vers la droite, symbolisant, selon A. Moretti, le passage de la vie vers la mort. Sous ces oiseaux, des félins, peut-être des lions, peints en noir la gueule ouverte et menaçante, se dirigent vers la gauche ; deux d'entre eux se font face au centre de la paroi du fond. Ils pourraient refléter l'horreur « de ce qui est au-delà de la vie ».

Au-delà de ces interprétations forcément sujettes à caution, la « tombe des lions rugissants » a l'intérêt de documenter l'apparition précoce à Veio de la culture funéraire aristocratique étrusque, c'est-à-dire des premiers tumulus à chambre mortuaire accueillant soit une sépulture à inhumation, soit une sépulture à incinération. Détail intéressant : la tombe des lions rugissants est une sépulture à incinération, ce qui illustre la continuité funéraire entre les Étrusques et les Villanoviens leurs ancêtres, qui incinéraient leurs morts. Qui plus est, il se confirme que la Veio étrusque, voisine immédiate et première ennemie de Rome qui la détruisit, est probablement l'endroit où la peinture étrusque est née. Découverte dans un secteur jusque-là ignoré, grâce aux aveux d'un pilleur de tombes repent, la tombe des lions rugissants n'a été violée qu'en partie. Francesca Boitani, qui en a dirigé les fouilles, y a découvert de la vaisselle grecque, une épée, des ornements personnels ou de banquet, etc., ce qui a aidé à la dater.



Chromosomes X (à gauche) et Y (à droite).

SOURCE: VOI 412, PP. 163-165, 2006

SEXE À REBONDISSEMENTS

Les mécanismes d'inactivation du chromosome X seraient apparus deux fois.

Chez les reptiles, le sexe est déterminé par la température d'incubation des œufs, les oiseaux ont des chromosomes W et Z, certains poissons changent de sexe au cours de leur vie... Pas de doute, le monde animal fait preuve d'imagination dès

qu'il s'agit de sexe, même au niveau génétique. Chez les humains, les femmes ont deux chromosomes X tandis que l'homme a un X et un Y, ce dernier étant dégénéré : il ne contient qu'une trentaine de gènes contre un millier pour le X. Puisque la plupart des gènes s'expriment (sauf dans le cas d'un gène récessif), les femmes auraient deux fois plus de protéines codées par le chromosome X que les hommes ? Non, nos cellules disposent d'un mécanisme qui réduit au silence, chez les femmes, l'un des chromosomes X, rétablissant l'équilibre dans la quantité de protéines intracellulaires : la parité est sauve. Ce mécanisme requiert, chez les mammifères placentaires, une molécule, l'ARN Xist, qui, s'associant étroitement au chromosome X, l'inactive : ses gènes ne s'expriment pas. L'ARN Xist est un ARN non codant, c'est-à-dire qu'il n'est pas traduit en protéines, à l'inverse des ARN messagers. Laurent Duret, du Laboratoire de biométrie et biologie évolutive, à Lyon, et Philip Avner, de l'Unité de Génétique moléculaire murine, de l'Institut Pasteur, ont voulu savoir d'où venait cet ARN atypique.

Pour ce faire, ils ont comparé le génome de différents mammifères placentaires (humain, bovins, souris...) avec celui d'autres animaux plus éloignés évolutivement (mammifères non placentaires, tels les opossums – marsupiaux – et les ornithorynques – monotrèmes –, mais aussi oiseaux, amphibiens, poissons, etc.). Ils ont profité du fait que le gène *Xist* est flanqué de gènes de protéines classiques bien conservés chez tous les vertébrés : à l'aide de ces balises, on pouvait reconstituer l'histoire du gène *Xist* en retrouvant sa trace chez tous les animaux étudiés. À la place de ce gène, toutes les espèces (sauf les mammifères placentaires) ont cinq gènes protéiques dont un serait l'homologue (un cousin) du gène *Xist*. Ce gène code une protéine, Lnx3, qui participe à des voies de signalisation intracellulaire. Ainsi, chez l'ancêtre des mammifères placentaires, le gène *Lnx3* aurait muté, serait devenu un pseudogène (non fonctionnel) et aurait été récupéré – c'est le bricolage de l'évolution –, ou détourné, pour coder au final, non plus une protéine, mais un ARN non codant, l'ARN Xist.

Ce résultat bouleverse ce que l'on croyait acquis, à savoir que l'inactivation du chromosome X était apparue chez l'ancêtre de tous les mammifères. Or puisque seuls les placentaires disposent d'un ARN Xist, ce mécanisme serait plus récent. Qui plus est, il serait apparu une deuxième fois, car si ses modalités sont différentes, l'inactivation du X existe aussi chez les marsupiaux. Les monotrèmes sont à part, chacune de leurs cellules ayant cinq Y et cinq X ! L. M.

UN ALTERNATEUR À MARÉE

Des tubes contenant des turbines reliées à un alternateur et placées dans un courant de marée produiraient de l'électricité dans les deux sens du courant.



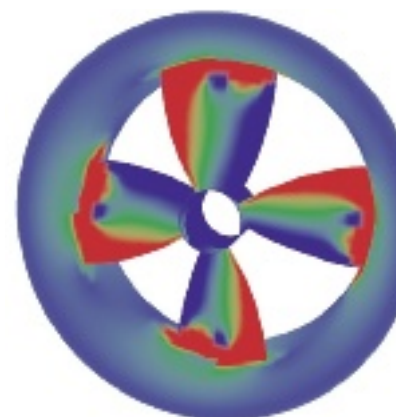
Que se passe-t-il quand on fait tourner l'axe d'un moteur électrique ? Il produit de l'électricité. C'est cette idée que Steve Turnock et Suleiman Abu-Sharkh, de l'Université de Southampton, ont mis en œuvre pour inventer un générateur électrique exploitant l'énergie des marées.

Tout est parti du moteur pour ROV (de l'anglais *Remote Operated Vehicle*), c'est-à-dire pour un robot plongeur alimenté et dirigé par câble, que les deux ingénieurs avaient développé ensemble. Une bobine intégrée dans le carénage de la nacelle est parcourue par un courant alternatif. Un champ magnétique y naît, qui fait tourner un rotor portant des aimants, lequel est solidaire de la turbine. Très utilisés par les pétroliers pour la maintenance des installations sous-marines, les ROV plongent à plusieurs milliers de mètres sous la surface, et doivent être robustes. Pour limiter le nombre de pièces, S. Turnock et S. Abu-Sharkh ont réduit à une dizaine le nombre de pièces composant leur propulseur, en évitant en particulier l'emploi

de transmissions. Par ailleurs, il fallait que leur ROV puisse avancer et reculer, donc que la turbine soit hydrodynamiquement efficace dans les deux sens.

Leur propulseur terminé, les deux ingénieurs ont entrepris de le transformer en générateur électrique. Dans le principe, rien de plus simple : au lieu de faire passer un courant électrique dans le moteur, on y fait passer un courant... d'eau. Le flux traversant la nacelle fait tourner la turbine et donc le rotor et ses aimants, lesquels produisent un courant alternatif dans la bobine. Un prototype, construit à partir de la nacelle de 25 centimètres de diamètre du propulseur de ROV et d'un contrôle électronique prévu pour exploiter au mieux sa puissance variable en fonction du courant, est encourageant. Ils espèrent qu'un modèle de série sera en vente d'ici cinq ans. Ils envisagent que des alignements de nacelles soient fixés sur des fonds rocheux parcourus deux fois par jour par la marée. Plusieurs autres principes sont déjà mis en œuvre pour exploi-

ter l'énergie de la marée : outre les barrages classiques à retenue (usine marémotrice de la Rance), on exploite des « éoliennes sous-marines », dont la structure est relativement complexe puisque leurs hélices doivent être réorientées deux fois par jour face au « vent marin ». F. S.



Simulation du dispositif en activité.

S. Turnock, University of Southampton

UNE AIRE CÉRÉBRALE MULTI-USAGE

En 1861, le neurologue français Paul Broca découvrit une zone du cerveau associée au langage et qui porte aujourd'hui son nom : l'aire de Broca. Or, d'après des données obtenues par imagerie cérébrale, cette région serait aussi activée lors de la réalisation de certains actes

moteurs. Quel est le lien entre action et langage ? Verbalise-t-on intérieurement nos actions ? L'aire de Broca n'est-elle pas exclusivement dédiée au langage ? L'équipe d'Étienne Koechlin de l'INSERM U742 Action-neuro-imagerie-modélisation, à Paris, a montré que l'aire de Broca est sollicitée par nos activités motrices, sans qu'il y ait verbalisation interne.

L'aire de Broca correspond aux aires dites 44 et 45 de l'hémisphère gauche. Le cerveau étant quasi symétrique, l'hémisphère droit du cortex présente une zone homologue de l'aire de Broca. Quand on parle, ces deux régions ne sont pas activées de la même façon : l'aire de Broca permet de construire les phrases tandis que son homologue traite les connotations du langage.

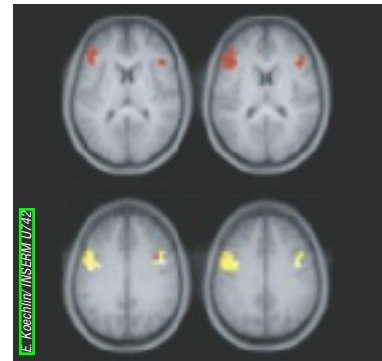
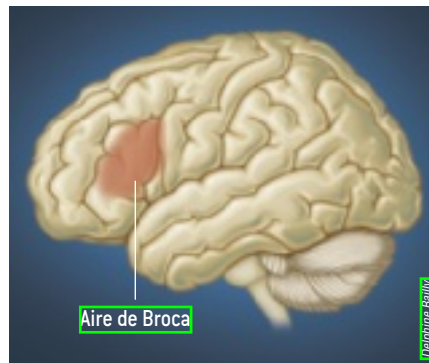
L'équipe d'É. Koechlin a observé par imagerie par résonance magnétique l'activité des deux aires de Broca chez 16 personnes effectuant des séries de mouvements de doigts sur les touches d'un clavier. Les sujets devaient réaliser plusieurs types de séries : appuyer sur une touche (acte moteur simple), taper une séquence de touches (séquence d'actes moteurs simples) et réaliser un plan comportant plusieurs séquences de frappe (un plan d'action). Les aires 44 droite et gauche s'activent lors de la transition entre deux séquences d'actes moteurs simples (quand les sujets ont fini de taper une séquence de touches et qu'ils en commencent une autre), et les deux aires 45 lors de la transition entre deux plans d'action (quand les sujets ont fini un plan comportant plusieurs séquences et qu'ils en commencent un autre). Ainsi, ces deux régions interviennent dans l'organisation des actes moteurs, sans qu'il y ait verbalisation, puisque ces acti-

vations sont observées à des moments très précis correspondant aux transitions entre séquences ou plans.

Des études antérieures avaient montré que l'aire 44 de Broca s'active lorsque nous émettons une syllabe et l'aire 45, lorsque nous prononçons une phrase. Par conséquent, l'activation présente également une hiérarchisation pour le langage, qui apparaît similaire à celle de l'organisation des actes moteurs.

Ces résultats montrent que le langage et l'organisation de comportements simples reposent sur des zones communes du cerveau. Aussi pourrait-on envisager de traiter des troubles du langage par des protocoles de rééducation comportementale. Par ailleurs, cette aire est présente chez les singes qui ne parlent pas : au fil de l'évolution, elle aurait donc d'abord été dédiée à la mise en place de plans d'action simples. Et l'on s'interroge : à quel moment et comment ses attributions se sont-elles multipliées ?

Laurence André
Neuron, vol. 50, pp. 963-974, 2006



Dans l'aire de Broca, certaines régions sont activées au début et à la fin de séquences d'actes moteurs simples, puis par les transitions entre ces séquences (*en jaune-orange*), et au début ou à la fin de plans d'action comportant plusieurs séquences ou lors du passage d'un de ces plans au suivant (*en rouge*).

Le deuxième disque de *Bêta Pictoris*

Bêta Pictoris est la première étoile autour de laquelle a été découvert, en 1984, un disque de poussière. C'est désormais la première étoile accompagnée d'un deuxième disque circumstellaire, comme le montrent les observations de David Golimowski, de l'Université de Baltimore, dans le Maryland, à l'aide du télescope spatial *Hubble*.

Un gauchissement du disque circumstellaire principal avait déjà mis la puce à l'oreille des astronomes ; les nouvelles images révèlent que cette distorsion résulte de la superposition de deux disques distincts. Le second disque s'étend sur une centaine d'unités astronomiques (100 fois la distance de la Terre au Soleil), contre plus de 300 pour le disque principal. Il est incliné d'environ quatre degrés par rapport à ce dernier.

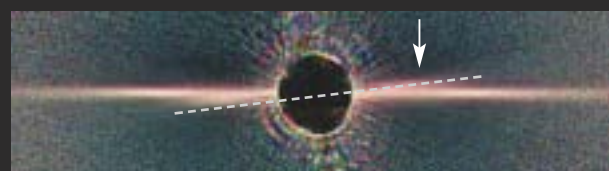
Le disque secondaire aurait été formé par une planète plus massive que Jupiter. Écartée du disque principal, elle aurait entraîné dans son sillage une foule de petits corps réduits par la suite en poussière au fil des collisions. L'analyse du spectre lumineux de ce disque suggère qu'il est composé de grains de silicates ou de gra-

phite compacts et très fins (jusqu'à 0,15 micromètre de diamètre). La poussière fine étant rapidement soufflée loin de l'étoile, sa présence implique que sa régénération, par les collisions de petits corps ou par les comètes plongeant sur *Bêta Pictoris*, est rapide.

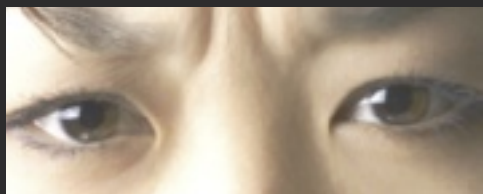
Le Système solaire, avec des orbites planétaires inclinées jusqu'à sept degrés l'une par rapport à l'autre, se serait-il formé dans plusieurs plans différents ?

Ph. R.-G

D. Golimowski, Astronomical Journal, vol. 131, pp. 3109-3130, juin 2006



Le second disque de poussière de l'étoile *Bêta Pictoris* : il est légèrement incliné par rapport au disque principal.



Attention, on vous surveille !

Payeriez-vous votre café si on vous donnait le choix de ne pas le faire ? Tout dépend de la situation ! Melissa Bateson et ses collègues, de l'Université de Newcastle, ont montré que nous sommes plus honnêtes et plus altruistes si nous nous sentons observés. Dans l'expérience imaginée par M. Bateson, les 50 personnes qui prennent leur café tous les jours doivent payer spontanément leur consommation et mettre la monnaie dans une boîte. Chaque semaine, une image grand format représentant soit des fleurs, soit des yeux qui regardent le consommateur, est installée au-dessus du tableau où sont affichés les prix. Les semaines où l'image est celle des yeux, les consommateurs payent en moyenne trois fois plus leurs cafés que quand il y a les fleurs. La simple sensation d'être observé pousse à un comportement plus honnête, plus généreux, car notre cerveau serait programmé pour réagir à un visage et à des yeux, même si c'est un leurre.

B. S.-L.

Biology Letters, 28 juin 2006

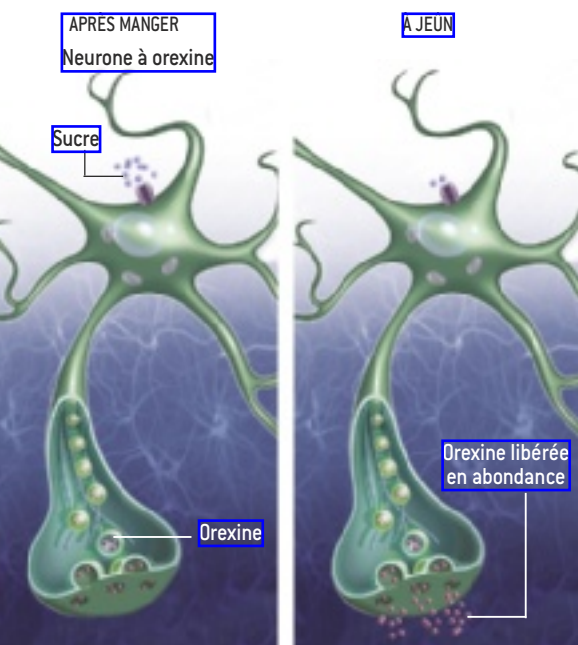
Antigènes et acidité

La taille des antigènes dépend de l'acidité qui règne dans les compartiments cellulaires où ils sont préparés.

Les cellules dendritiques sont parmi les premières cellules en contact avec les intrus que le système immunitaire est chargé d'éliminer. Pour activer les défenses, elles présentent à leur surface des antigènes (des fragments des intrus) dont les autres cellules immunitaires prennent connaissance avant de partir à l'attaque. Les voies de présentation diffèrent selon la source des antigènes : ceux qui sont élaborés à l'intérieur des cellules dendritiques, telles des protéines d'un virus, sont présentés par des molécules du complexe majeur d'histocompatibilité de classe I (CMH I) ; les antigènes extracellulaires, par exemple ceux d'une bactérie, le sont par les molécules du CMH II. Enfin, outre ces deux voies dites classiques, certains antigènes extracellulaires, tels ceux d'une cellule tumorale, sont présentés par des molécules du CMH I : c'est le mécanisme de présentation croisée des antigènes. Quand l'antigène est extracellulaire, l'intrus est phagocyté par la cellule dendritique et découpé en morceaux (les antigènes).

Toutefois, les macrophages, d'autres cellules immunitaires, phagocytent aussi des éléments étrangers, mais ils les découpent en fragments trop petits pour qu'ils puissent être reconnus

Inutile de lutter contre... l'envie de sieste



Certains neurones libèrent de l'orexine, un médiateur de l'éveil. Après un repas, le sucre est abondant dans le sang et dans le cerveau, et peu d'orexine est libérée (à gauche). Au contraire, en l'absence de sucre, l'orexine est libérée en abondance (à droite).

Comme tous les jours, après le déjeuner, de retour au bureau, vous vous sentez las et feriez bien une petite sieste... Denis Burdakov, de l'Université de Manchester, et ses collègues ont montré comment le sucre absorbé pendant les repas inhibe certains neurones – les neurones à orexine – responsables de notre état d'éveil.

Les neurones à orexine sont présents dans une petite région du cerveau – l'hypothalamus postérieur – et émettent des prolongements dans la quasi-totalité du cerveau. À quoi sert l'orexine libérée ? Elle active des zones impliquées dans le maintien de l'éveil, tels les noyaux du raphé ou le locus coeruleus. Un dysfonctionnement de ces neurones serait responsable de la narcolepsie, une maladie caractérisée notamment par des épisodes de somnolence diurnes imprévisibles. Qui plus est, l'orexine, libérée dans le cortex, régulerait l'appétit et le métabolisme énergétique. Par conséquent, l'orexine stimule à la fois l'éveil et l'appétit : un déficit alimentaire active les neurones à orexine, entraînant une mobilisation des réserves énergétiques et gardant l'individu éveillé afin qu'il s'alimente pour reconstituer ses réserves. Et la cascade inverse

existe aussi : la consommation d'aliments, et donc de sucre, bloque les neurones à orexine, aboutissant à un endormissement des personnes repues...

Dans des neurones à orexine en culture, les biologistes anglais ont montré que le sucre active un canal potassium, nommé K_{2P} , qui diminue l'activité électrique des neurones ; ces neurones libèrent alors moins d'orexine. Comme l'orexine est une molécule de l'éveil, sa diminution stimule l'endormissement. En outre, le canal K_{2P} est très sensible aux variations de la concentration en sucre, puisqu'une augmentation correspondant à celle observée dans le cerveau après un repas normal suffit à l'activer. La régulation des neurones à orexine par le sucre via les canaux K_{2P} devrait permettre aux neurobiologistes de préciser les mécanismes de l'éveil, de la satiété, voire de l'obésité. Toutefois, les neurones à orexine ne sont pas les seuls à contrôler ces fonctions physiologiques : des neurones dits MCH, situés également dans l'hypothalamus et impliqués dans l'obésité, seraient activés par le sucre et favoriseraient le sommeil.

B. S.-L.

Neuron, vol. 50, pp. 711-722, juin 2006

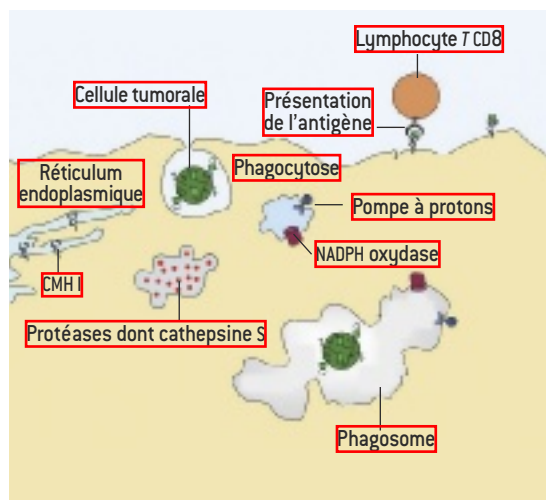
par les lymphocytes. Pourquoi la taille des « débris » varie-t-elle selon le type de cellule ? C'est ce qu'a découvert Ariel Savina dans l'équipe de Sebastian Amigorena, à l'Institut Curie, à Paris.

Les intrus phagocytés sont enveloppés dans un « sac », un phagosome, où ils sont « attaqués » par des enzymes, des protéases, dont l'environnement optimal, le plus souvent acide, est assuré par d'autres protéines, des pompes à protons. Des mesures avaient révélé que l'acidité augmente progressivement (le pH diminue) dans le phagosome des macrophages dès qu'il est formé. Aussi, fort de ce constat, les biologistes pensaient qu'il en allait de même dans les cellules dendritiques, la différence entre la taille des fragments tenant au nombre de protéases sollicitées et à l'efficacité des pompes à protons.

Ils ont suivi l'acidité des cellules dendritiques et observé que, contre toute attente, le pH augmente dans le phagosome des cellules dendritiques avant de diminuer après plusieurs dizaines de minutes : or si le pH augmente malgré la présence des pompes à protons, c'est qu'un autre acteur intervient. L'équipe de Curie a montré qu'il s'agit d'un complexe protéique, la NADPH oxydase, connue pour diminuer l'acidité dans les neutrophiles, d'autres cellules immunitaires. Ainsi, la différence entre la dégradation des intrus par les macrophages et par les cellules dendritiques tient au contrôle de l'acidité qui règne dans le phagosome. En outre, cette découverte résout un problème sur lequel les biologistes demeuraient perplexes : pourquoi certaines protéases (la cathepsine S, par exemple) des cellules dendritiques ont un fonctionnement optimal pour un pH plutôt basique. La cellule dendritique est une sorte de macrophage tempéré par un constituant d'un neutrophile.

L. M.

Cell. vol. 126-2006



Lorsqu'un intrus, telle une cellule tumorale (en vert) est phagocyté par une cellule dendritique, plusieurs compartiments intracellulaires participent à la formation du phagosome où les antigènes sont préparés afin d'être présentés à la surface de la cellule selon le mécanisme de la présentation croisée des antigènes. D'abord, le réticulum endoplasmique apporte les molécules du CMH I. Certains compartiments cellulaires fournissent des protéases (en rouge), dont la cathepsine S, qui fonctionnent au mieux dans un milieu alcalin, d'autres des pompes à protons (en bleu) et la NADPH oxydase (en violet). Cette dernière diminue un temps l'acidité dans le phagosome de sorte que l'intrus est découpé en fragments suffisamment importants pour être apprêtés et présentés à la surface par le CMH I. Là, ils seront reconnus par des lymphocytes T CD8 (en orange) qui traqueront ensuite les cellules tumorales identiques à celle qui a déclenché le processus.



Cet été, redécouvrez notre collection Bulles de Sciences...

EDP Sciences enrichit sa collection **Bulles de Sciences** avec le nouvel ouvrage "Doit-on craindre la foudre ?"...

Cette collection apporte à chaque volume la réponse d'un spécialiste à une question d'apparence anodine... mais qui reflète un problème scientifique actuel. En langage accessible à tous, chaque auteur dresse l'état des connaissances sur cette question. Des textes vivants, illustrés, riches d'enseignements, d'anecdotes, de rencontres et d'aventures.

Cette collection a reçu la Mention Spéciale du Prix du Livre Scientifique d'Orsay 2002.

Nouveauté 1^{er} semestre 2006

Quelques autres titres Bulles de Sciences...



Doit-on craindre la foudre ?

C. Bouqueneau

La foudre est un phénomène naturel qui fascine. Si son caractère mystérieux est de mieux en mieux connu, il n'est pas toujours bien expliqué, ni compris, et alimente encore un nombre considérable d'idées reçues. Ce livre a pour objectif d'apporter des réponses claires et détaillées, afin de permettre à tout un chacun de connaître et d'apprécier cet événement à la fois banal et spectaculaire.

• Juin 2006 • ISBN 2-86883-841-3
• 192 pages • 18 €

Tous les autres titres de cette collection sont consultables sur notre site web : www.edpsciences.org (rubrique Livres)



www.edpsciences.org



Stromatolites d'Australie

Les stromatolites sont des roches à structure laminaire que l'on trouve, par exemple, dans le massif du Haut Atlas, au Maroc, ou sur le rivage australien. Leur origine fait débat : sont-elles d'origine sédimentaire, et donc purement géologique, ou organique, c'est-à-dire le résultat d'une activité biologique ? L'en-

ROCHES ASSURÉMENT BIOLOGIQUES

On sait désormais que les stromatolites, des roches stratifiées, sont de nature biologique.

Le jeu est de taille, car certaines de ces roches stratifiées sont datées de plus de 3,5 milliards d'années et seraient donc les témoins des balbutiements de la vie sur Terre. Les travaux de Abigail Allwood et ses collaborateurs de l'Université Macquarie, à Sydney, marquent la fin du débat : les stromatolites sont bien d'origine biologique.

Les tenants des deux écoles s'opposaient sur l'interprétation de la morphologie des couches superposées. La structure stratifiée diversifiée (des dômes, des colonnes ramifiées...) et les échelles de taille (du millimètre à la dizaine de mètres) ne peuvent résulter, selon certains, que d'une activité biologique. Ils prennent à témoin les édifices qu'élaborent les cyanobactéries actuelles et

qui ressemblent aux stromatolites. En revanche, selon les partisans de l'hypothèse abiotique, les multiples structures des stromatolites peuvent s'expliquer par des conditions de sédimentation particulières.

L'équipe australienne a étudié une zone de dix kilomètres de longueur, à l'Ouest de l'île, et y a distingué sept faciès, caractérisés notamment par des conditions de sédimentation différentes. Or, pour chaque faciès, les formes des stromatolites qu'on y trouve sont variées. La conclusion s'imposait : ces concrétions sont d'origine biologique. En effet, dans des conditions identiques, un même mécanisme géologique de formation aurait conduit à la même morphologie.

L. M.

Nature, vol. 441, pp. 714-718, 2006

Cerveau & Psycho

Actuellement en kiosque

Cerveau & Psycho numéro 16

Juillet-Août 2006

- Pourquoi les enfants tentent-ils de **consoler** un petit qui est tombé et pleure ?
- Pourquoi le **coaching** est-il à la mode ?
- Pourquoi certains adolescents traversent-ils une **crise de rejet** de la famille et de la société ?

Des psychologues abordent ces questions dans le nouveau numéro de Cerveau & Psycho.

www.pourlascience.fr

Du trébuchet au propulseur

A la lecture de la rubrique *Idées de physique* sur Le trébuchet du footballeur (voir *Pour la Science* n° 344, juin 2006), je me demandais si le propulseur (utilisé chez nous pendant la Préhistoire et par les Aztèques, les Inuits et les aborigènes australiens) est considéré comme un levier composé ou un simple prolongateur du bras ? Je pratique régulièrement cet engin et la question me tracasse, d'autant que le sujet ne fait pas l'unanimité parmi les archéologues et les sportifs.

Christian Lepers, par courriel

Réponse de Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Le film du jet d'une lance par un propulseur (Woomera ou Atlatl) montre qu'au cours du mouvement, le bras du lanceur se déploie, et que le propulseur tourne dans sa main. Le résultat est que la lance atteint une vitesse (de l'ordre de 100 km/h) bien supérieure à celle de la main. L'articulation de l'ensemble bras-propulseur est donc tout à fait cruciale et dépasse le simple effet de levier. Néanmoins, l'histoire ne s'arrête pas là : le propulseur et la lance fléchissent tous deux durant le jet. Le stockage d'énergie élastique, puis sa restitution à la lance ajoutent aux performances de l'engin. Pour cela, tout comme un arc et une flèche, l'élasticité du propulseur et celle de la lance doivent être adaptées l'une à l'autre.

Du sang fabriqué par l'industrie

En ce qui concerne Le sang fabriqué en laboratoire de Luc Douay (voir *Pour la Science* n° 345, juillet 2006), peut-on produire des globules rouges à partir des cellules d'une étape intermédiaire du protocole de multiplication et de différenciation, sans nécessairement partir des cellules souches ? En d'autres termes, est-ce que le processus s'autoentretient sans dégradation biologique ?

Julien Berthaud, par courriel

Réponse de Luc Douay

Les cellules intermédiaires de notre protocole de maturation érythroïde sont notamment les érythroblastes. Il est en effet possible d'appliquer notre protocole aux érythroblastes naturellement présents dans la moelle osseuse. Cela a été démontré in vivo en injectant à une souris qui tolère des cellules étrangères une population d'érythroblastes après dix jours de culture ; ces cellules ont continué leur maturation in vivo jusqu'au stade de globule rouge. Il est également possible d'amener à maturation, in vitro, des érythroblastes de la moelle osseuse.

Toutefois, dans une optique de production à grande échelle, cela n'est pas concevable, car on ne peut pas imposer à ces cellules un rythme de multiplication important. Plus généralement, notre protocole d'amplification et de multiplication s'applique seulement à des cellules souches hématopoïétiques de diverses origines, ainsi qu'à tous les précurseurs érythroïdes.

Un nouvel ancêtre du sudoku

En complément à l'article *Les ancêtres français du Sudoku* (voir *Pour la Science* n° 344, juin 2006), je signale un article paru dans la revue *La Nature* du 26 décembre 1885. Il s'agit, dans un carré 4x4, de « placer les As, Rois, Dames, Valets d'un jeu de cartes tel que dans chaque ligne, colonne et diagonale, il n'y ait qu'une carte et une seule de même valeur, et une carte et une seule de même couleur ». C'est à rapprocher du problème des 81 officiers, puisque chaque élément possède deux attributs. Est-il possible de faire un sudoku de 16x16 avec 16 carrés de 4x4 avec ces cartes et avec les règles ci-dessus pour chaque carré 4x4, mais chaque ligne ou colonne de 16 cases contenant les 16 cartes, soit les quatre figures (As, Rois, Dames, Valets) dans les quatre couleurs (trèfle, carreau, cœur, pique) ?

Michel Feuillée, Franconville la Garenne

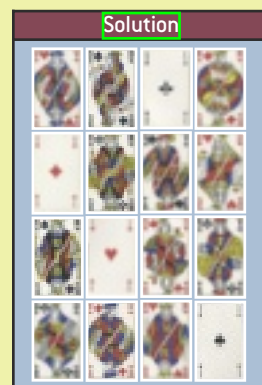
Réponse de Christian Boyer

Votre problème de 1885 confirme bien l'intérêt des Français de cette époque pour ces questions. Sa solution peut passer par un carré magique eulérien. En voici une des nombreuses possibilités. Vous remarquerez que c'est aussi une superposition de deux sudokus 4x4, chaque sous-carré 2x2 contenant aussi toutes les cartes :

Carré magique eulérien				
1	7	16	10	34
14	12	3	5	34
11	13	6	4	34
8	2	9	15	34
34	34	34	34	

Enlever 1 et écrire en base 4				
0.0	1.2	3.3	2.1	
3.1	2.3	0.2	1.0	
2.2	3.0	1.1	0.3	
1.3	0.1	2.0	3.2	

Equivalence des cartes	
0.	Valet
1.	Dame
2.	Roi
3.	As
0.	Cœur
1.	Carreau
2.	Pique
3.	Trèfle



Le problème que vous avez ajouté est bien plus difficile. Alors que des sudoku 16x16 sont connus, publiés dans des revues de jeux, et alors que les carrés eulériens 4x4 sont bien connus, votre superposition des deux questions semble nouvelle. En voici une solution :

1	7	16	10	12	14	5	3	13	11	4	6	8	2	9	15
14	12	3	5	7	1	10	16	2	8	15	9	11	13	6	4
11	13	6	4	2	8	15	9	7	1	10	16	14	12	3	5
8	2	9	15	13	11	4	6	12	14	5	3	1	7	16	10
5	3	12	14	16	10	1	7	9	15	8	2	4	6	13	11
10	16	7	1	3	5	14	12	6	4	11	13	15	9	2	8
15	9	2	8	6	4	11	13	3	5	14	12	10	16	7	1
4	6	13	11	9	15	8	2	16	10	1	7	5	3	12	14
2	8	15	9	11	13	6	4	14	12	3	5	7	1	10	16
13	11	4	6	8	2	9	15	1	7	16	10	12	14	5	3
12	14	5	3	1	7	16	10	8	2	9	15	13	11	4	6
7	1	10	16	14	12	3	5	11	13	6	4	2	8	15	9
6	4	11	13	15	9	2	8	10	16	7	1	3	5	14	12
9	15	8	2	4	6	13	11	5	3	12	14	16	10	1	7
16	10	1	7	5	3	12	14	4	6	13	11	9	15	8	2
3	5	14	12	10	16	7	1	15	9	2	8	6	4	11	13

Le plus difficile a été d'obtenir toutes les diagonales des sous-carrés 4x4 correctes (comportant bien les quatre figures et les quatre couleurs de cartes). Vous retrouverez dans le coin haut gauche la solution au problème de 1885. Je vous laisse le soin de le convertir en base 4 et en cartes à jouer, selon les mêmes règles.

Pour nous écrire : tribune@pouirlascience.fr

Le mal des profondeurs



À mesure qu'il descend, un plongeur éprouve parfois d'étranges sensations : il se sent euphorique, puis désorienté et les poissons lui apparaissent monstrueux. C'est la narcose à l'azote. Les neurobiologistes précisent les mécanismes de ces troubles comportementaux.

Jean-Claude Rostain

Plonger pour admirer les poissons de la mer Méditerranée est un loisir que vous pratiquez peut-être cet été. Cependant, à partir de 30 mètres de profondeur, vous pourriez perdre tout contrôle de vous-même; vous vous sentiriez d'abord bien, confiant, puis euphorique; vos mouvements seraient plus lents, et vous pourriez même ôter votre masque afin d'embrasser un poisson qui passe à proximité. Certains plongeurs se sentent invulnérables, ont des vertiges, d'autres ont les lèvres, la bouche et les doigts engourdis. Ces symptômes sont caractéristiques de la narcose à l'azote, que le commandant Jacques-Yves Cousteau nomma l'« ivresse des profondeurs » dans les années 1950, quand la plongée de loisir en scaphandre autonome se développa. Aujourd'hui, la plongée sous marine en bouteille est un sport à la mode : en France, la Fédération française d'étude et de sports sous-marins (FFESSM) compte environ 50 000 licenciés, qui, parce qu'ils sont bien entraînés, peuvent descendre jusqu'à 50 ou 60 mètres avec des bouteilles d'air comprimé. Pourtant chaque plongeur doit

savoir que plus il descend, plus les troubles comportementaux risquent d'être importants. Mais qu'est-ce qui provoque de tels symptômes ? Nous examinerons à quoi sont dus ces troubles, pourquoi la profondeur entraîne une narcose à l'azote et quelles sont les hypothèses neurobiologiques proposées pour expliquer ces troubles. Un coupable : l'azote constituant majoritaire de l'air.

À mesure que l'on descend dans l'eau, la pression augmente. À la surface, nous subissons une pression égale à une atmosphère ou un bar soit 10^5 pascals (l'unité de pression est le pascal, mais, par commodité, nous utiliserons le bar soit un kilogramme par centimètre carré). Plus on s'éloigne de la surface, plus le poids de l'eau augmente. À dix mètres de profondeur, un centimètre carré de l'organisme subit une pression correspondant au poids d'une colonne d'eau de dix mètres de hauteur sur un centimètre carré de surface, ce qui représente un kilogramme. À dix mètres, la pression due à l'eau est donc égale à un bar et elle augmente progressivement de un bar tous les dix mètres. À cette pression hydrostatique due à la hauteur



d'eau, s'ajoute la valeur de la pression atmosphérique, soit un bar : à dix mètres, le plongeur subit une pression absolue de deux bars ; à 60 mètres, la profondeur maximale atteinte lors des plongées en bouteille, la pression est de sept bars. Par conséquent, en profondeur, on respire l'air ou les mélanges gazeux utilisés dans les bouteilles à une pression élevée. À la pression atmosphérique, la composition de l'air étant de 79 pour cent d'azote et de 21 pour cent d'oxygène, la pression partielle d'azote respiré est de 0,79 bar et celle de l'oxygène de 0,21 bar. À dix mètres, la pression partielle d'azote est égale 1,58 bar et celle de l'oxygène de 0,42 bar. Or, selon la loi de Henry, la quantité de gaz dissous dans le sang augmente avec sa pression partielle. En profondeur, la quantité d'oxygène, et surtout d'azote, dans le sang et dans les tissus (et dans le cerveau) augmente jusqu'à atteindre la saturation, c'est-à-dire jusqu'à ce que la pression en gaz dans les organes soit égale à celle du milieu environnant. Cette élévation de la pression d'azote est responsable des symptômes du plongeur...

En 1935, un médecin de la marine américaine, Albert Behnke, a relié les symptômes observés en profondeur au pouvoir narcotique de l'azote sous pression, c'est-à-dire à sa capacité de déclencher les symptômes associés à la narcose. À partir de 30 mètres de profondeur (soit quatre bars), le plongeur se sent détendu, un peu perdu au milieu des poissons et il a quelques difficultés à nager. Plus il descend, plus les troubles s'accroissent : il a des vertiges, des nausées, des hallucinations et est de plus en plus désorienté. C'est la narcose à l'azote. Les plongeurs sont plus ou moins sensibles au pouvoir narcotique de l'azote, et les symptômes disparaissent dès que l'on remonte. Comment expliquer de tels troubles ? Depuis plusieurs années, on étudie, en laboratoire, les effets de l'azote sous pression grâce à des caissons hyperbares, où l'on peut élever progressivement la pression, reproduisant les conditions d'une descente sous l'eau. On a ainsi constaté que plus la pression augmente plus la personne présente des modifications de son humeur, un ralentissement de ses mouvements et même une diminution de ses performances intellectuelles. Ces symptômes sont ceux de la narcose aux

gaz inertes, regroupant l'azote, le xénon, le krypton, l'hydrogène, le néon ou encore l'hélium.

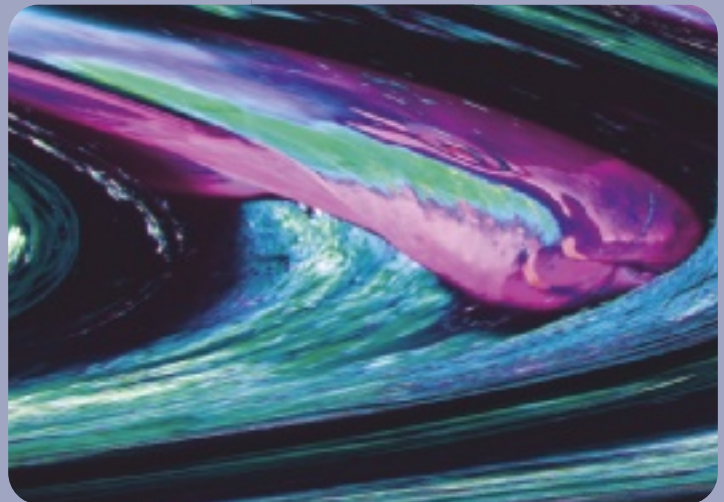
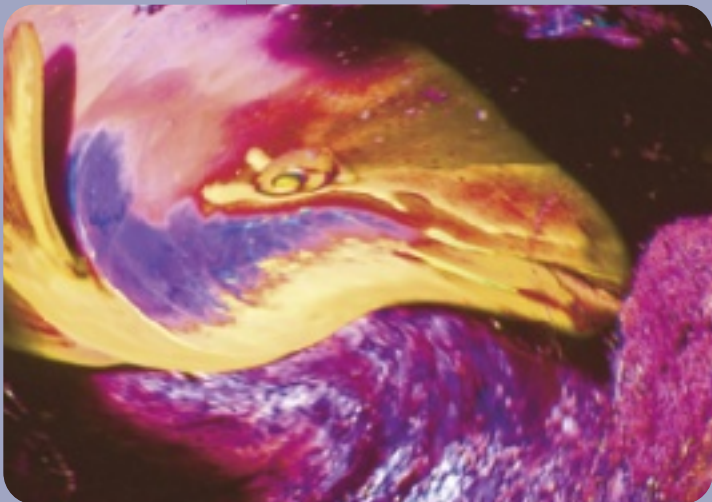
Contrairement à l'oxygène, un gaz inerte n'est pas métabolisé par l'organisme, c'est-à-dire qu'il n'entre dans aucune réaction biochimique. L'azote se dissout dans les tissus de l'organisme en fonction de sa pression partielle. A. Behnke a étudié la solubilité des gaz inertes dans les graisses – les lipides – qui constituent les membranes des cellules, afin de relier leur pouvoir narcotique à leurs propriétés physiques. Trois gaz inertes, plus solubles dans les lipides que l'azote, sont aussi plus narcotiques : le xénon, très narcotique à la pression atmosphérique, le krypton, qui entraîne des vertiges, et l'argon. Trois autres gaz inertes sont moins solubles dans les lipides que l'azote : l'hydrogène, deux à trois fois moins narcotique, le néon, trois fois moins narcotique, et enfin l'hélium qui n'a presque pas de pouvoir narcotique.

La narcose aux gaz inertes

Donc plus un gaz est soluble dans les lipides, plus il est narcotique. Pour éviter la narcose, l'azote des mélanges respiratoires des plongeurs a été remplacé par de l'hélium, le gaz inerte le moins narcotique. Grâce à ces mélanges hélium-oxygène où la pression partielle d'oxygène est maintenue à des valeurs acceptables (0,4 bar en général), des pressions correspondant à des profondeurs supérieures à 100 mètres sont atteintes en caisson hyperbare, sans signe de narcose.

Qui plus est, les plongeurs professionnels, travaillant sur des plates-formes pétrolières par exemple, reçoivent de la surface les mélanges hélium-oxygène dans leur tourelle de plongée, car ils travaillent à 100, voire 200 mètres de profondeur. Mais, sous ces fortes pressions et malgré l'absence de gaz narcotique dans les mélanges respiratoires, des troubles comportementaux apparaissent : le plongeur tremble, ne contrôle plus ses gestes, a des contractions musculaires involontaires et peut même somnoler. Ces troubles sont

1. Quand un plongeur subit une narcose à l'azote, il perd le sens de la réalité et du danger. Il a parfois des hallucinations visuelles, voyant les poissons changer de couleurs et de formes, tel ce poisson-perroquet.



différents de ceux de la narcose et sont regroupés sous le terme de syndrome nerveux des hautes pressions, SNHP. Ces symptômes sont d'autant plus intenses que la vitesse de compression est rapide et que la profondeur augmente.

Ainsi, il existe deux types de troubles : la narcose aux gaz inertes (dès quatre ou cinq bars de pression absolue) que subit le plongeur de loisir qui respire de l'azote sous pression, et le syndrome nerveux des hautes pressions (dès dix bars), observé chez les professionnels soumis à des pressions très élevées. Les symptômes de la narcose se caractérisent plutôt par une diminution de l'activité motrice et des capacités de réflexion, alors que ceux du syndrome nerveux des hautes pressions correspondent à une hyperexcitabilité motrice et nerveuse. Ces troubles neurologiques supposent que les gaz sous pression perturbent la communication entre les neurones, c'est-à-dire la libération de certains neurotransmetteurs, des molécules qui assurent ces communications. Nous examinerons deux théories qui tentent d'expliquer ces

symptômes : la théorie lipidique et la théorie protéique. Au début des années 1970, on observe que la pression s'oppose au pouvoir narcotique de l'azote : c'est la théorie lipidique, où le gaz aurait un mécanisme dit d'action diffuse. A. Behnke a montré que le pouvoir narcotique d'un gaz est lié à son affinité pour les lipides : en saturant la bicouche lipidique des membranes cellulaires, les gaz narcotiques augmenteraient localement son volume et la déformeraient (voir la figure 2).

La théorie lipidique

Dans le cerveau, cette dilatation de la partie lipidique de la membrane des neurones perturberait la propagation de l'influx nerveux. Elle entraverait alors la libération des neurotransmetteurs et l'activité des récepteurs sur lesquels se fixent ces molécules. Les symptômes de la narcose surviendraient quand la propagation de l'information est notablement réduite. En revanche, de fortes pressions, dont les

Qu'est-ce qu'un accident de décompression ?

Les plongeurs, de loisir ou professionnels, et les travailleurs en caisson hyperbare – les hyperbaristes – sont exposés à de fortes pressions partielles de gaz inertes, ce qui peut entraîner une narcose. Mais ces gaz sont aussi responsables des pathologies liées à la décompression.

Lors d'un séjour sous forte pression, le sang traversant les poumons – des échangeurs de gaz performants – se sature en gaz inertes en fonction de leurs pressions partielles alvéolaires (selon la loi de Henry, la quantité de gaz dissous augmente avec la pression). Le sang artériel répartit de façon hétérogène les gaz inertes dans tous les tissus, et ce jusqu'à saturation si l'exposition est suffisamment longue (24 à 48 heures pour l'azote ou l'hélium). Les aviateurs et les astronautes sont aussi concernés lorsqu'ils sont décompressés rapidement à partir de la pression normale (montée rapide ou activité en dehors du véhicule spatial). Lors du retour à la pression atmosphérique, ces gaz dissous doivent repasser par les poumons pour être éliminés. Or une baisse rapide ou importante de la pression ambiante provoque le retour du gaz dissous à sa forme gazeuse là où il se trouve, créant de petites bulles disséminées qui peuvent grossir (selon la loi de Mariotte, une diminution de pression s'accompagne d'une augmentation de volume).

Caisson de recompression d'urgence.

Aussi, la procédure de décompression doit-elle être contrôlée : il convient de respecter des paliers de décompression successifs. Une table de décompression indique la durée pendant laquelle l'hyperbariste doit rester à pression constante pour chaque palier. Il existe de nombreuses tables de décompression adaptées aux conditions d'exposition (personne sous l'eau ou dans un caisson, type de gaz respiré, durée du séjour sous pression, altitude du lieu, etc.). Ces tables sont calculées empiriquement et validées par l'utilisation. Ainsi, même si elles sont respectées lors d'une décompression, la probabilité qu'un

accident survienne existe, bien qu'elle soit faible. Si les bulles apparaissent dans l'organisme, elles représentent des corps étrangers et provoquent divers symptômes. Dans les articulations, elles sont responsables de douleurs ostéo-articulaires. En circulant dans les vaisseaux, elles risquent de bloquer le flux sanguin ; elles déclenchent alors des hypoxies au hasard des zones embolisées, et les signes sont divers, le plus souvent neurologiques, parfois respiratoires. Ces corps étrangers circulants entraînent aussi une cascade de réactions inflammatoires dans la paroi (l'endothélium) des capillaires. À long terme, des nécroses osseuses dites dysbariques peuvent apparaître dans les grosses articulations (épaules, hanches principalement). Les accidents de décompression peuvent régresser spontanément, mais, le plus souvent, ils laissent des séquelles importantes. Aujourd'hui, ils sont rarement mortels, à moins d'une erreur grave.

Il existe plusieurs cas de décompression trop rapide : en plongée, si la remontée est incontrôlée ou, pour les hyperbaristes, si la table de décompression suivie n'est pas adaptée aux conditions d'exposition, par exemple. Souvent, il y a peu de conséquences. Cependant, si un plongeur est remonté trop rapidement par rapport à la table prévue, une procédure de ré-immersion permet de corriger l'erreur avant que les symptômes n'apparaissent.

En revanche, si des symptômes, même mineurs, sont perçus par le plongeur, l'accident de décompression est une urgence médicale. Les signes les plus courants sont des douleurs articulaires (des épaules, des genoux, de la hanche), des fourmillements dans les bras et, pour les accidents graves, une paralysie (paraplégie) brutale ou progressive débutant par les membres inférieurs. Les traitements reposent alors sur la respiration d'oxygène pur au masque dès l'apparition des signes (pour lutter contre l'hypoxie et favoriser l'élimination du gaz inerte), puis sur la recompression (afin de réduire le volume des bulles) aussi immédiate que possible, en caisson hyperbare et selon les tables spécifiques. L'inflammation est traitée par une perfusion (remplissage avec du sérum, traitement avec des anti-inflammatoires, des vasodilatateurs...). Si le traitement est rapide et approprié, la guérison est souvent complète.

Jean-Claude Le Péchon, ingénieur conseil en hyperbarie

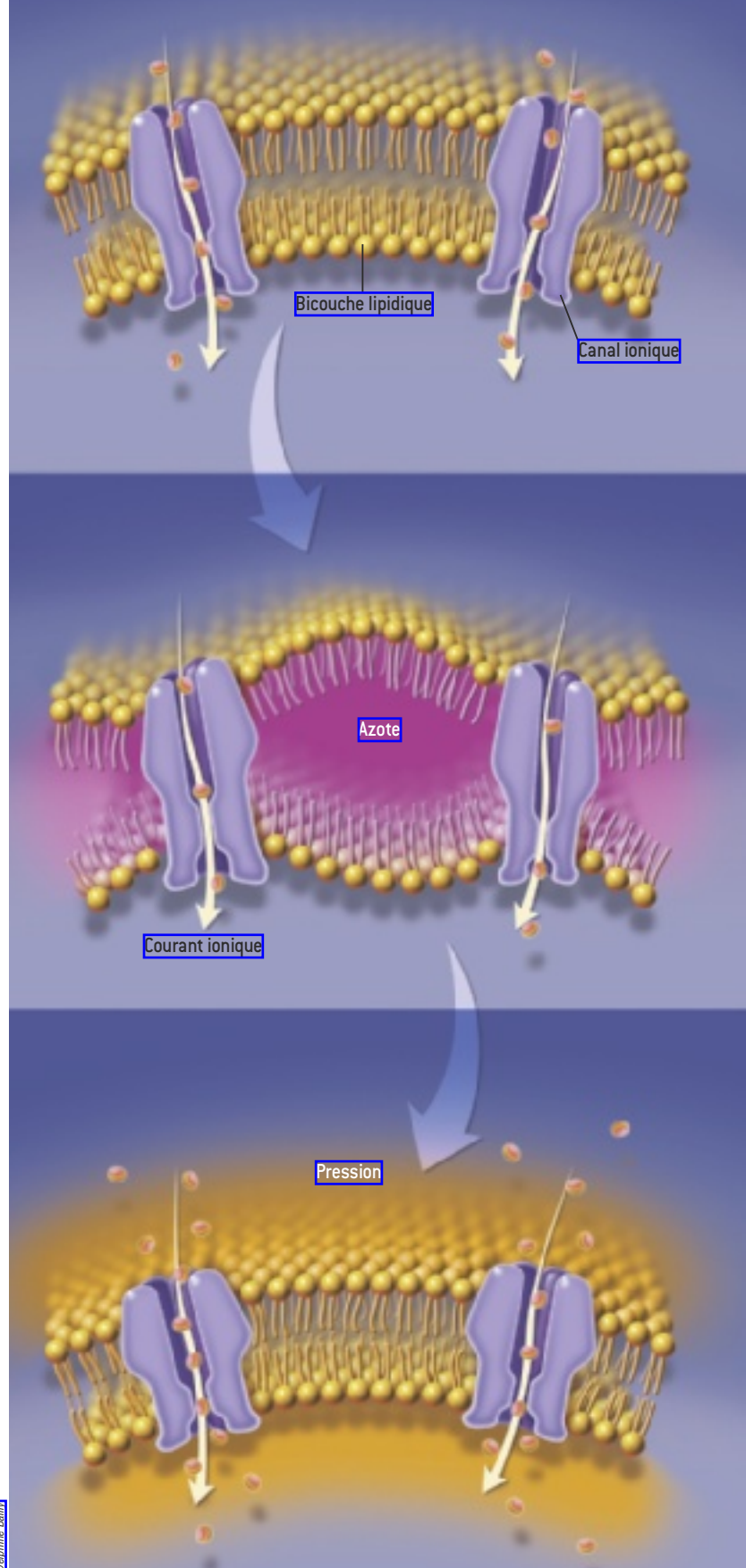
effets sont mis en évidence par l'utilisation de gaz peu narcotiques tel l'hélium, comprimeraient la bicouche lipidique, ce qui augmenterait la transmission des informations et l'activité des neurones (rappelons que sous l'effet des hautes pressions, la pression partielle de gaz dissous dans le sang et dans les tissus est élevée). Ainsi, deux effets opposés se manifestent : le volume membranaire augmente à cause de la dissolution du gaz narcotique (l'effet narcotique se manifeste) et diminue sous l'effet des hautes pressions (l'effet mécanique de la pression l'emporte) : quand la variation résultante est positive, l'effet narcotique prédomine, quand elle est négative, l'effet exciteur l'emporte.

Par conséquent, pour les plongeurs amateurs qui ne dépassent guère 60 mètres, on peut remplacer l'azote par un gaz moins narcotique, supprimant le syndrome de narcose des profondeurs. En revanche, pour les plongeurs professionnels (100 à 200 mètres de profondeur), on cherche à éviter l'effet exciteur des fortes pressions dû à une compression des membranes. Pour ce faire, on ajoute un peu de gaz narcotique dans les mélanges hélium-oxygène des plongeurs, tel l'azote qui se dissout dans les membranes, maintenant le volume membranaire normal. Cette théorie lipidique est la raison de l'utilisation des gaz trimix : de l'azote ou de l'hydrogène – des gaz narcotiques qui se dissolvent bien dans les membranes – est ajouté au mélange hélium-oxygène pour réduire les symptômes du syndrome nerveux des hautes pressions. Avec la Marine nationale et la COMEX, nous avons montré, en laboratoire, qu'avec des mélanges hélium-azote-oxygène constitués de cinq pour cent d'azote ou hélium-hydrogène-oxygène avec moins de 25 bars d'hydrogène, certains symptômes du syndrome nerveux des hautes pressions, tel le tremblement hyperbare, diminuent, voire disparaissent. Cependant, sous forte pression en caisson hyperbare et en utilisant ces mélanges trimix, des symptômes, telle la somnolence, persistent, et d'autres sont augmentés : la théorie lipidique ne suffit donc pas à expliquer les troubles causés par les gaz sous pression. Un autre mécanisme interviendrait.

La théorie protéique

Depuis quelques années, la théorie dite protéique, émise dans les années 1960 par l'Américain R. Featherstone, revient sur le devant de la scène. En 1994, Nicholas Franks et William Lieb, de l'Imperial College à Londres, suggèrent qu'un gaz au pouvoir narcotique élevé (le xénon) se lie à des protéines membranaires des cellules. Les gaz inertes agissent-ils sur ces protéines à pression élevée ?

En 1998, nous avons émis l'hypothèse que l'azote et l'argon se lient à un site protéique situé sur des récepteurs membranaires, lesquels interviennent dans la transmission chimique de l'information entre les neurones. Chez le rat, quel que soit le gaz utilisé, la pression d'apparition de la narcose augmente avec la vitesse de compression : cette pression ne varie pas pour les vitesses faibles, et à partir d'une certaine vitesse, elle augmente brusquement pour atteindre un palier, même si la vitesse de compression continue de s'élever (la courbe du seuil d'apparition de la narcose en fonction de la vitesse de compression est une sigmoïde). Or, selon la théorie lipidique, l'expansion des membranes est quasi



2. Selon la théorie lipidique, l'azote se dissout dans la partie lipidique de la membrane des neurones provoquant leur expansion et leur déformation. Les mouvements des ions de part et d'autre de la membrane des neurones seraient diminués, ce qui causerait un ralentissement de la propagation de l'influx nerveux. À l'inverse, une élévation de la pression hydrostatique comprimerait les bicouches lipidiques, augmenterait les échanges ioniques et faciliterait donc l'activation des neurones. Ces modifications du volume des bicouches lipidiques expliqueraient les troubles narcotiques et ceux qui dépendent de la pression.

Mécanismes d'action spécifiques de la pression et de l'azote

L'azote et la pression agiraient tous deux sur les récepteurs de divers neurotransmetteurs dans les ganglions de la base, des structures impliquées dans les fonctions cognitives et motrices.

Les principaux neurones impliqués dans ces connexions sont des neurones dits GABAergiques (*en vert*) qui libèrent du GABA, un neuromédiateur inhibiteur, des neurones dits dopaminergiques (*en orange*) qui libèrent de la dopamine, un neuromédiateur qui a des effets excitateurs ou inhibiteurs selon le récepteur sur lequel il se fixe, et des neurones glutamatergiques (*en jaune*) qui libèrent le glutamate, un neurotransmetteur excitateur. Qui plus est, certains neurones dopaminergiques portent des récepteurs du GABA et les neurones GABAergiques des récepteurs de la dopamine. Tous ces neurones sont étroitement imbriqués.

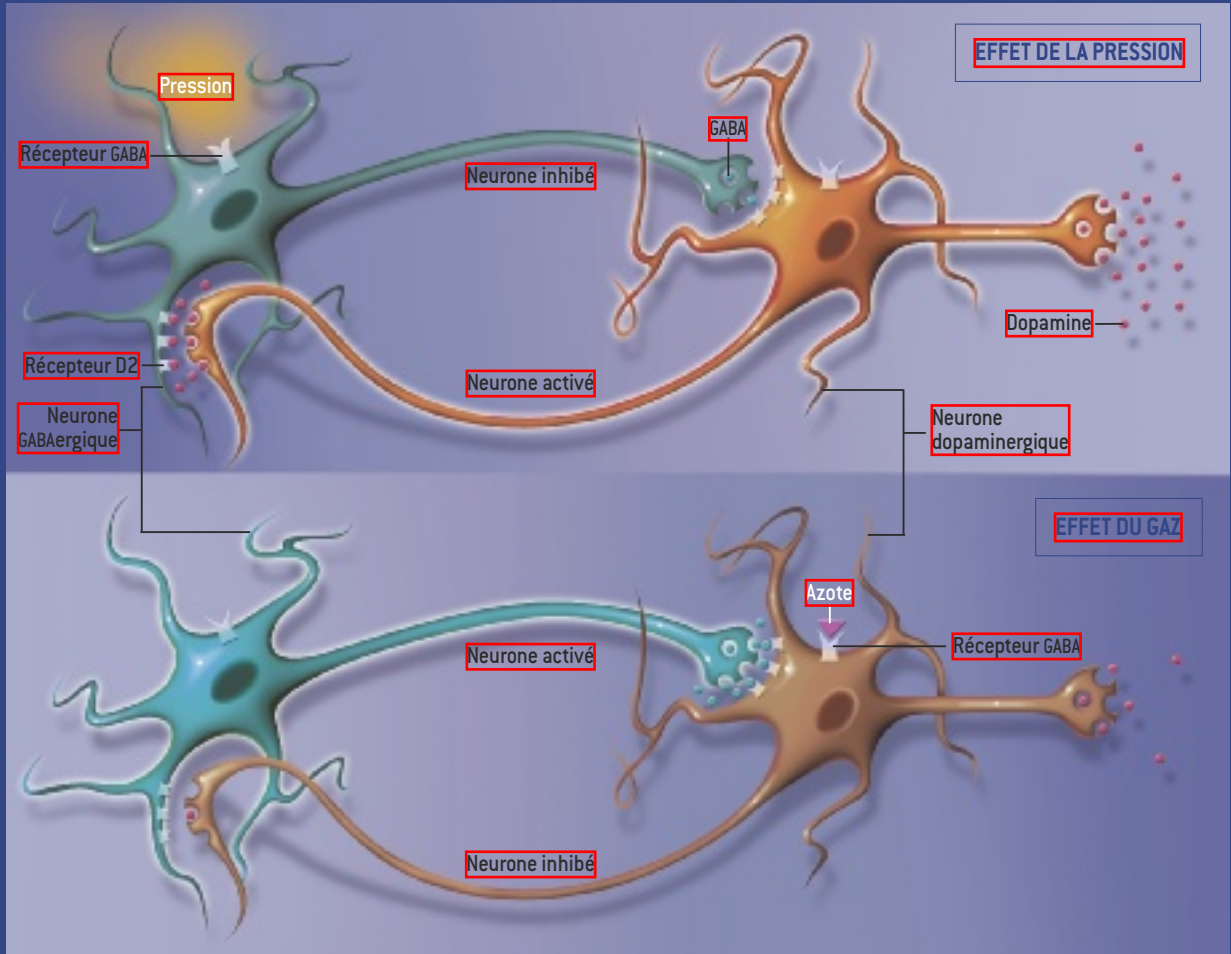
La substance noire *pars reticulata* contient des neurones GABAergiques inhibiteurs qui portent des récepteurs du GABA et des récepteurs D2 (inhibiteurs) où se fixe la dopamine. Ces neurones émettent des projections vers les neurones dopaminergiques de la substance noire *pars compacta* et les neurones glutamatergiques excitateurs du thalamus (de la voie nigrothalamique). Les neurones dopaminergiques de la substance noire *pars compacta* ont des récepteurs GABA, se projettent dans le striatum (voie nigrostriée) et ont des prolongements dans la substance noire *pars reticulata*.

La pression active les récepteurs GABA inhibiteurs des neurones GABAergiques de la substance noire *pars reticulata* et de la substance noire *pars compacta*. Ces neurones sont alors

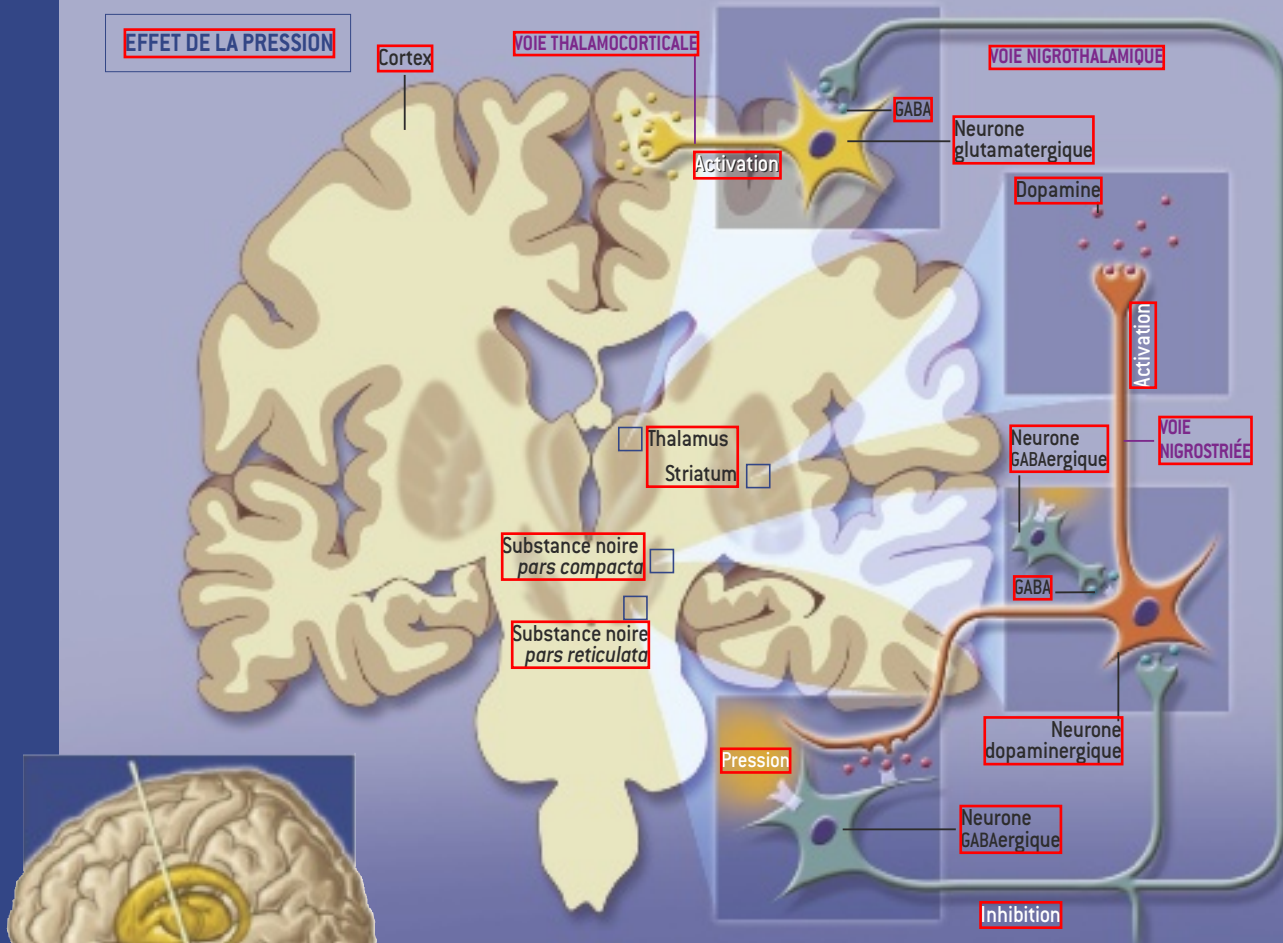
inhibés : ils libèrent moins de GABA inhibiteur dans la substance noire *pars compacta* et dans le thalamus (*voir détails ci-dessous*). Il en résulte que les neurones dopaminergiques de la substance noire *pars compacta* et les neurones glutamatergiques du thalamus sont moins inhibés (ou davantage activés). La dopamine est abondamment libérée dans le striatum, l'activité de la voie thalamo-corticale et, par conséquent, l'activité motrice sont augmentées. Ce serait la cause de certains troubles moteurs du syndrome nerveux des hautes pressions.

L'azote, quant à lui, agit directement sur les récepteurs GABA des neurones dopaminergiques de la substance noire *pars compacta*. Ces neurones sont inhibés (*voir détails ci-dessous*) : ils libèrent moins de dopamine dans le striatum et dans la substance noire *pars reticulata*. Or la dopamine inhibe les neurones GABA de la substance noire *pars reticulata* via une activation des récepteurs D2 inhibiteurs situés à leur surface. Comme il y a moins de dopamine, l'inhibition est levée : les neurones GABA sont activés et bloquent les neurones dopaminergiques de la substance noire *pars compacta* et les neurones glutamatergiques du thalamus. La libération de dopamine dans le striatum diminue encore et les neurones glutamatergiques du thalamus sont inhibés. L'activité motrice est ralentie, ce qui expliquerait certains symptômes de la narcose à l'azote.

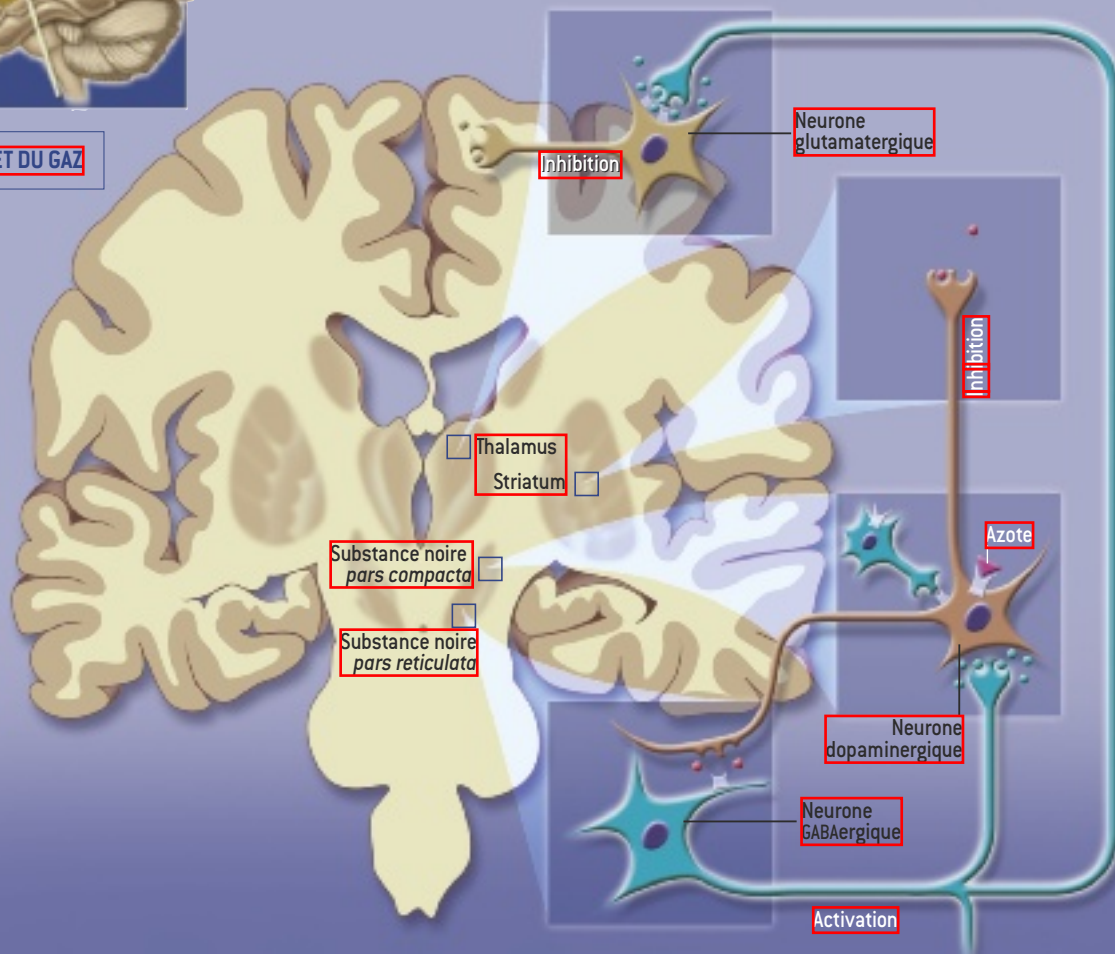
Par conséquent, la narcose et le syndrome nerveux des hautes pressions résulteraient d'un équilibre entre ces différentes modifications chimiques, celles de la pression sur la voie GABAergique nigrothalamique et celles du gaz sur la voie dopaminergique nigrostriée.



EFFET DE LA PRESSION



EFFET DU GAZ



proportionnelle à la concentration des gaz dissous et ne semble pas limitée. Nous avons donc émis l'hypothèse que le gaz agit sur des sites particuliers, présents en quantités limitées : le gaz inerte se lierait spécifiquement à des récepteurs membranaires en modifiant leur activité – on parle de modulateurs allostériques. Si les molécules de gaz se lient effectivement à de telles protéines membranaires, elles agiraient comme une drogue : des molécules pharmacologiques empêchant la fixation des gaz sur ces récepteurs devraient en masquer l'effet. Pour le savoir, nous devons préciser le mécanisme d'action de l'azote sous pression.

Depuis le début des années 2000, nous étudions les mécanismes de neurotransmission dans les ganglions de la base, des structures du cerveau impliquées dans la régulation des processus moteurs et cognitifs (voir l'encadré des pages 34 et 35). Or ces mécanismes sont perturbés par les gaz inertes sous pression. Les ganglions de la base contiennent plusieurs types de neurones : des neurones GABAergiques, libérant du GABA (l'acide gamma amino butyrique), un neuromédiateur inhibiteur, qui ralentit l'activité des neurones où il se fixe ; des neurones dopaminergiques, ayant des récepteurs du GABA et libérant de la dopamine excitatrice ou inhibitrice selon le récepteur où elle se fixe ; des neurones glutamatergiques excitateurs libérant du glutamate. En outre, les ganglions de la base sont divisés en plusieurs noyaux : la substance noire *pars reticulata* et *pars compacta*, le striatum et le thalamus. Les neurones GABAergiques de la substance noire *pars reticulata* émettent des projections vers les neurones dopaminergiques de la substance noire *pars compacta* et vers les neurones glutamatergiques du thalamus (c'est la voie nigrothalamique). Les neurones dopaminergiques de la *pars compacta* se terminent dans le striatum, définissant la voie dite nigrostriée. Enfin, les neurones glutamatergiques du thalamus sont reliés au cortex : c'est la voie thalamocorticale. Or la voie nigrostriée, la voie nigrothalamique et la voie thalamocorticale modulent les fonctions motrices et cognitives.

Des effets inverses

En 2001 et 2002, grâce à des méthodes de dosage des substances neurochimiques libérées dans ces régions du cerveau de rat, nous avons montré que la pression en mélange hélium-oxygène (sans gaz narcotique) active directement les récepteurs GABA des neurones GABAergiques de la substance noire *pars reticulata* et de la substance noire *pars compacta* ; l'inhibition que ces neurones exercent sur les neurones dopaminergiques de la substance noire et sur les neurones glutamatergiques du thalamus est levée, si bien que les concentrations de dopamine dans le striatum augmentent et, par conséquent, l'activité motrice. À l'inverse, l'azote active les récepteurs GABA des neurones dopaminergiques de la voie nigrostriée entraînant une inhibition de ces neurones et des neurones glutamatergiques. Moins de dopamine est libérée, ce qui entraîne une diminution de l'activité motrice.

Ainsi, la pression et les gaz narcotiques ont des effets opposés dans les ganglions de la base du rat. L'azote favoriserait la neurotransmission GABA de la substance noire, entraînant une hypoactivité motrice. Ce serait une des causes de la narcose à l'azote. La pression par elle-même augmenterait l'activité motrice et corticale : cela expliquerait le syndrome nerveux

des hautes pressions. Qui plus est, en 2002, nous avons montré que les effets de la pression et de l'azote dépendent de l'agencement des unités constitutives des récepteurs GABA des neurones GABAergiques et des neurones dopaminergiques. Certaines associations de sous-unités sont davantage sensibles à la pression (on les trouve surtout dans les récepteurs GABA des neurones GABAergiques), d'autres à l'azote (sur les récepteurs GABA des neurones dopaminergiques).

Plusieurs médiateurs perturbés

Les gaz inertes sous pression agissent aussi sur d'autres neurotransmissions. Sous pression d'hélium, les acides glutamique et aspartique et la sérotonine – des neurotransmetteurs excitateurs qui modifient l'activité des ganglions de la base – sont libérés. Cependant, alors que l'augmentation de la libération de dopamine est proportionnelle à la pression, la libération de ces neurotransmetteurs peut être soudaine. En outre, en 2005, nous avons montré qu'avec des gaz narcotiques, tel l'azote, l'augmentation de pression déclenche, outre la diminution de dopamine, une perturbation des libérations d'acide glutamique et de sérotonine ; les concentrations d'acide aspartique ne changent pas. Bien entendu, les effets des gaz inertes sous pression ne se limiteraient pas à ces seuls neurotransmetteurs. Plusieurs modifications neurochimiques existeraient, perturbant les fonctions motrices et cognitives de la personne narcosée.

De surcroît, quand une personne subit souvent les effets de la narcose, les réactions neurochimiques se modifieraient durablement. En 2005, nous avons observé chez l'animal, après plusieurs expositions à une narcose modérée (équivalente à celle que l'homme subit vers 30 mètres de profondeur), que la dopamine augmente dans le striatum au lieu de diminuer. Le gaz qui agit sur les récepteurs GABA modifierait leur activité ou leur répartition au fil des plongées. Nous cherchons aujourd'hui à savoir si ces processus sont irréversibles ou non.

Le mécanisme protéique d'action spécifique des gaz inertes sous pression n'exclut pas le mécanisme lipidique d'action diffuse. Ainsi, la narcose perturberait l'activité des neurones comme le fait un agent pharmacologique. Nous voulons désormais déterminer si les narcoses intenses et fréquentes sont toxiques pour les neurones. Pour limiter les accidents de plongée, il est important de préciser les mécanismes neurochimiques provoqués par ces gaz inertes sous pression. Mais, n'oubliez pas, si les poissons qui vous entourent commencent à changer de couleurs et de formes, remontez doucement vers la surface : les symptômes de la narcose disparaîtront quand l'azote aura été éliminé de votre cerveau...

Jean-Claude ROSTAIN est neurophysiologiste et neurochimiste au CNRS, dans l'unité de recherche Physiopathologie et action thérapeutique des gaz sous pression de l'Université de la Méditerranée à Marseille.

B. BROUSSOLLE et J.-L. MELIET, *Physiologie et médecine de la plongée*, Ellipse, 2006.

P. BENNETT et J.-C. ROSTAIN, *Inert gas narcosis*, in *Physiology and Medicine of Diving* et *The high pressure nervous syndrome*, in *Physiology and Medicine of Diving* cinquième édition, Saunders, London, pp. 300-357, 2003.



1906-2006

INSTITUT OCÉANOGRAPHIQUE

Fondation Albert I^{er}, Prince de Monaco

La Fondation a 100 ans

Le 14 avril 1906 à Monaco, SAS le Prince Albert I^{er} de Monaco crée la Fondation Institut océanographique.

La Fondation est un organisme de droit français comprenant l'Institut océanographique de Paris et le Musée océanographique de Monaco.

Elle a pour vocation l'étude et l'enseignement de l'océanographie et la diffusion des connaissances.



195 rue St Jacques
75 005 Paris
www.oceano.org



avenue St Martin
MC 98 000 Monaco
www.oceano.mc



La Fondation, reconnue d'utilité publique dès 1906,
peut recevoir des dons et des legs

Les exploits de *Hubble*

En espérant une dernière révision du télescope Hubble, les astronomes font le bilan de ses 16 années d'exploitation.

Mario Livio

Peu de télescopes ont eu autant de retentissement sur la recherche astronomique que le télescope spatial *Hubble*. Pourtant, son influence n'est pas celle qu'on lui attribue généralement. Il n'a pas permis de grandes découvertes, mais il a transformé en quasi-certitudes des hypothèses formulées d'après les résultats obtenus sur Terre. Il a conduit les théoriciens à revoir leurs modèles afin d'en élaborer de nouveaux, plus précis, expliquant les phénomènes astrophysiques avec beaucoup plus de détails. En bref, l'influence du télescope *Hubble* a été considérable, non pas parce qu'il s'est démarqué des autres instruments et techniques, mais, au contraire, parce qu'il a su s'intégrer à l'ensemble des dispositifs existants.

En avril 2006, le télescope a fêté son seizième anniversaire dans l'espace. Seize années au cours desquelles il a fourni aux astronomes une profusion de détails, et livré un aperçu des merveilles de l'Univers. Mais ses prouesses ont récemment été éclipsées par le débat relatif à son avenir. Avec le redémarrage des missions de la navette spatiale, les astronomes espèrent qu'une mission sera dédiée à la maintenance de *Hubble*. Si les astronautes ne le remettent pas en état, le télescope cessera de « vivre »

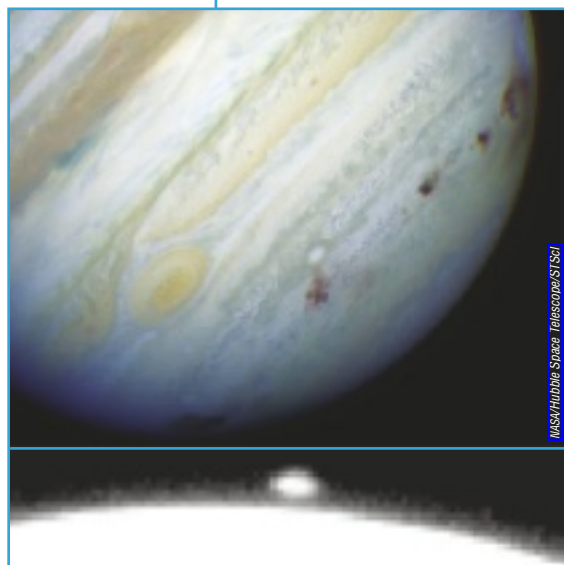
dès le milieu de 2008. L'imminence de cette échéance m'a incité à faire le point sur dix ans et demi de bons et loyaux services.

J'ai sélectionné les dix contributions qui me semblent les plus fascinantes : de la découverte des objets les plus petits, telles les planètes, jusqu'aux galaxies et à l'Univers dans sa globalité. Sélection personnelle et, je l'admets, certainement partielle. Il est quasi impossible de résumer toutes les contributions de *Hubble*. Au moment où j'écris ces lignes, son système d'archivage contient plus de 27 téraoctets de données et grossit à un rythme de 390 gigaoctets par mois. Ces données ont conduit à la publication de 6300 articles scientifiques. Qui plus est, le télescope ne cesse de produire de nouveaux résultats. En collaboration avec d'autres observatoires, *Hubble* a découvert, l'année dernière, deux nouveaux satellites de Pluton, une étonnante galaxie massive dans l'Univers primordial, et le compagnon planétaire d'une naine brune, elle-même à peine plus lourde qu'une planète. Grâce à *Hubble*, nous avons vu, pour la première fois, ce que nous devions nous contenter d'imaginer jusqu'à présent.

Durant la première mission d'entretien de *Hubble*, en décembre 1993, les astronautes Story Musgrave (*sur le bras déplié*), Jeffrey Hoffman (*dans la soute*) et leurs compagnons ont réglé le miroir initialement non fonctionnel, permettant au satellite de nous envoyer une moisson d'images.



1 Le grand crash de la comète



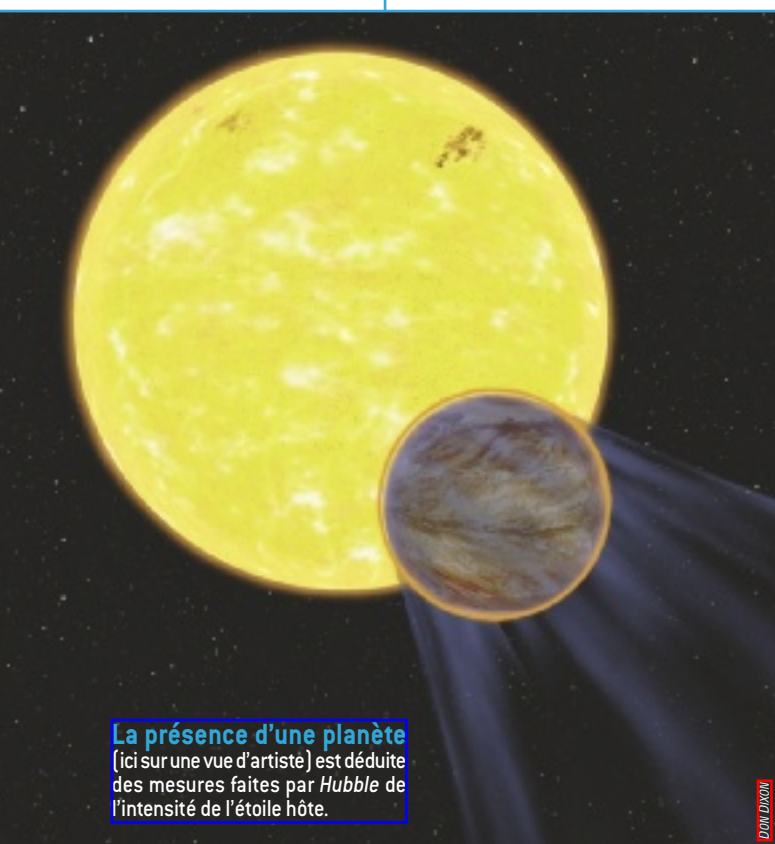
NASA/Hubble Space Telescope/ST/Sci

Huit sites d'impact (certains se chevauchent ou sont à peine visibles) ont été repérés sur cette image de l'hémisphère Sud de Jupiter prise le 22 juillet 1994. En bas, un panache ressemblant à un champignon nucléaire, au-dessus de l'horizon de la planète, six minutes après l'impact du 16 juillet.

D'un point de vue cosmique, l'impact de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter fut anecdotique : la surface couverte de cratères des planètes rocheuses témoigne déjà du fait que le Système solaire est un champ de tir. En revanche, d'un point de vue plus humain, la collision a représenté une expérience exceptionnelle : une comète ne s'écraserait sur une planète qu'une fois tous les 1000 ans en moyenne.

Un an avant les déboires de Shoemaker-Levy 9, les images de *Hubble* avaient montré que la comète s'était scindée en une vingtaine de fragments, un « collier de perles ». Le premier fragment a percuté l'atmosphère de Jupiter le 16 juillet 1994, et le reste au cours de la semaine suivante. Les images ont montré des panaches ressemblant à des champignons nucléaires et s'élevant au-dessus de l'horizon de Jupiter, avant de retomber en moins de dix minutes après l'impact. Les « cicatrices » dues à ces impacts ont persisté durant des mois. La rareté des images suffirait à les rendre précieuses, mais ces clichés ont en plus soulevé la question de la composition de l'atmosphère de Jupiter. Sur un des sites de percussion, des ondes se sont propagées vers l'extérieur à une vitesse de 450 mètres par seconde. Il s'agirait d'ondes de gravité, et on pourrait comparer le système à celui d'un morceau de bois qu'on tente de maintenir sous l'eau et qui jaillit hors de l'eau avant d'y retomber. Si tel est le cas, les propriétés des ondes semblent indiquer que le rapport de l'oxygène sur l'hydrogène dans la couche de l'atmosphère jovienne où l'onde s'est propagée serait dix fois plus élevé que dans le Soleil. Or si Jupiter s'est formé par la fragmentation gravitationnelle du disque primordial de gaz et de poussière, comme le postulent certaines théories, il devrait avoir la même composition que le disque, et une composition similaire à celle du Soleil. La question reste ouverte.

2 Les planètes extrasolaires



La présence d'une planète (ici sur une vue d'artiste) est déduite des mesures faites par *Hubble* de l'intensité de l'étoile hôte.

Don Dixon

En 2001, la Société américaine d'astronomie a demandé aux planétologues de dire ce qui, selon eux, avait été la découverte principale des dix dernières années. Ils ont choisi la détection de planètes extérieures au Système solaire. Aujourd'hui les chercheurs en ont détecté environ 180. La plupart ont été trouvées grâce à des télescopes au sol qui suivaient les faibles oscillations que l'attraction gravitationnelle d'une planète exerce sur son étoile hôte. Cependant, ces observations ne donnent que la taille et l'ellipticité de l'orbite de la planète ainsi qu'une limite inférieure de sa masse.

Hubble a pris le relais en se focalisant sur le sous-ensemble des planètes dont le plan orbital est aligné avec notre ligne de visée, de telle sorte qu'en passant périodiquement devant leur étoile, elles en réduisent l'éclat, un événement que l'on nomme transit. *Hubble* a observé le premier transit planétaire, celui du compagnon de l'étoile HD 209458 ; on a ainsi obtenu l'information la plus détaillée dont on dispose pour une planète située en dehors du Système solaire. Elle est 30 pour cent plus légère que Jupiter, bien que son diamètre soit 30 pour cent supérieur, mais la cause de cet embonpoint reste encore inconnue. Les données de *Hubble* sont si précises qu'elles auraient révélé de grands anneaux ou des satellites massifs autour de la planète... s'ils avaient existé. Mais ce n'est pas le cas. Encore plus impressionnant, *Hubble* a fait les premières mesures de la composition d'un système stellaire voisin. L'atmosphère contient du sodium, du carbone et de l'oxygène, et l'hydrogène s'en échappe en créant une sorte de queue cométaire. Ces observations serviront aux astronomes qui recherchent des signes chimiques de vie dans l'Univers.

3 Agonies stellaires

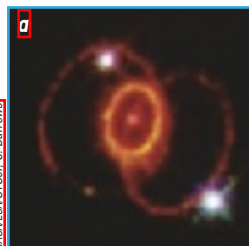
La théorie prédit qu'une étoile dont la masse est comprise entre 8 et 25 fois celle du Soleil terminera sa vie dans une explosion de supernova. Quand l'étoile a épuisé son combustible utilisable, elle perd le combat qu'elle a mené toute sa vie durant : éviter de s'effondrer sous son propre poids. Son cœur s'effondre pour former une étoile à neutrons (un vestige extrêmement dense et inerte) et les couches de gaz externes sont éjectées à une vitesse égale à cinq pour cent de celle de la lumière.

Toutefois, cette théorie a été très difficile à valider, car aucune supernova n'a explosé dans notre galaxie depuis 1680. À défaut, les astronomes ont suivi l'explosion, le 23 février 1987, d'une supernova dans le Grand Nuage de Magellan, une des galaxies satellites de la Voie lactée. *Hubble* n'était pas encore fonctionnel, mais trois ans plus tard, il a commencé à suivre la progression de l'événement. Il a rapidement détecté un système de trois anneaux autour de l'étoile qui avait explosé. L'anneau central semble représenter le rétrécissement d'un nuage de gaz en forme de sablier, et les anneaux plus larges représentent les bords de deux lobes en forme de goutte, apparus quelques dizaines de milliers d'années avant l'explosion. En 1994, *Hubble* a commencé à observer des taches devenir plus brillantes le long de l'anneau central, comme cela est prédit par la théorie : c'est le moment où la matière éjectée de la supernova a heurté l'anneau. Depuis, *Hubble* livre des informations sur la fin de la vie de cette étoile.

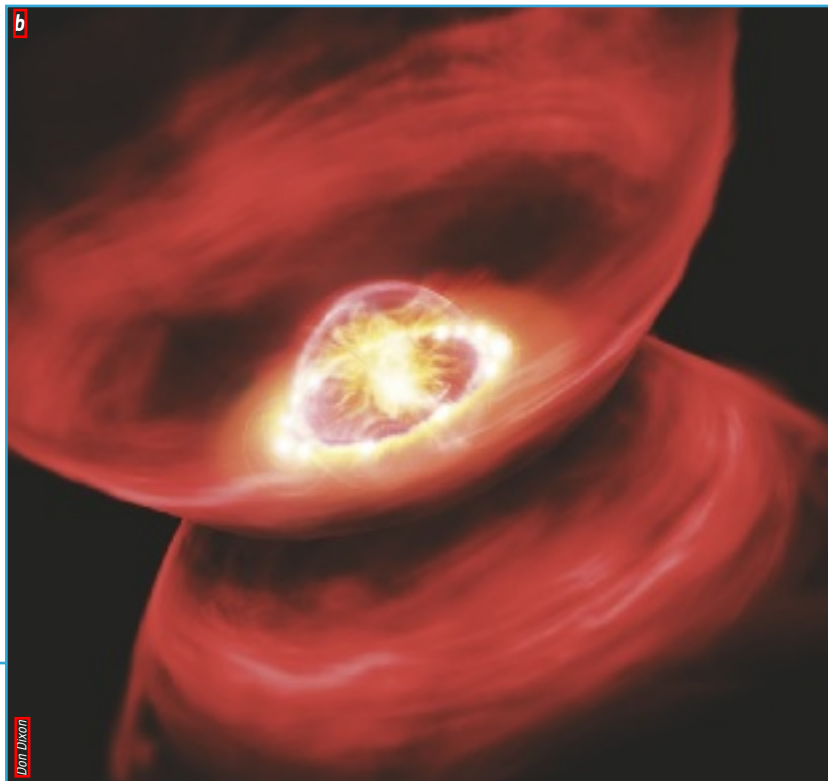
Contrairement à leurs homologues plus massives, les étoiles de type solaire mourraient plus gracieusement, en éjectant leurs couches gazeuses externes dans un processus non explosif qui durerait une dizaine de milliers d'années. Quand le cœur central brûlant de l'étoile est mis à nu, son rayonnement ionise le gaz éjecté, le faisant briller dans le vert (émis par l'oxygène ionisé) et le rouge (l'hydrogène ionisé). Le résultat est ce que l'on appelle, un peu à tort, une nébuleuse planétaire. On en connaît environ 2000 aujourd'hui. *Hubble* a révélé des formes extrêmement complexes avec une précision inégalée.

Certaines des nébuleuses présentent un jeu d'anneaux concentriques, qui indiquerait un processus d'éjection périodique. La période entre deux épisodes d'éjection (environ 500 ans) est trop longue pour être expliquée par des pulsations dynamiques (durant lesquelles l'étoile se contracte et se dilate, tirillée entre la gravité et la pression du gaz) et trop courte pour correspondre à des pulsations thermiques (où l'étoile est hors équilibre). La nature précise des anneaux observés reste à élucider.

Quand l'onde de choc de la supernova 1987 A a percuté un anneau de gaz préexistant, des taches brillantes sont apparues (a, observation de Hubble, b vue d'artiste).



La nébuleuse de l'Œil de Chat est l'une des nébuleuses planétaires parmi les plus complexes, sans doute alimentée par une étoile de type solaire en fin de vie.



4 Naissances cosmiques

Depuis longtemps, les astronomes savent que des jets de gaz étroits sont caractéristiques de la naissance d'étoiles. Une étoile naissante peut émettre une paire de jets collimatés longs de plusieurs années-lumière. On ignore le mécanisme de ces émissions. Selon l'hypothèse la plus solide, un champ magnétique à grande échelle confère sa structure au disque de gaz et de poussière entourant l'étoile jeune. La matière ionisée circulant le long des lignes de champ magnétique serait projetée vers l'extérieur comme des perles sur des fils en rotation. Les observations de *Hubble* ont étayé ce modèle théorique en apportant la première preuve directe que ces jets sont effectivement issus du centre du disque.

Selon une autre hypothèse, invalidée par *Hubble*, les disques circumstellaires auraient été profondément enchâssés dans leurs nuages parents et auraient donc été impossibles à voir. En fait, *Hubble* a révélé des dizaines de disques protoplanétaires. En particulier, par un jeu de contraste, il a permis d'étudier en détail ceux dont la silhouette se profile devant les nébuleuses. Il apparaît que la moitié au moins de ces jeunes étoiles ont de tels disques, ce qui démontre que les matières premières de la formation planétaire sont omniprésentes dans la galaxie.



NASA, J. Eddy, H. Thron, C. O'Dell

Ressemblant à des amibes déformées, des disques de poussière entourent les étoiles embryonnaires de la nébuleuse d'Orion. Chaque image représente 2,4 unités astronomiques au carré.

5 Archéologie galactique



Les astronomes pensent que les grandes galaxies, telles la Voie lactée et Andromède, ont grossi en absorbant d'autres galaxies plus petites. Les traces de ce passé confus devraient être inscrites dans l'arrangement, l'âge, la composition et la vitesse de leurs étoiles. *Hubble* a contribué à déchiffrer cette histoire, par exemple grâce à ses observations du « halo » stellaire d'Andromède, le nuage sphérique ténu d'étoiles et d'amas stellaires qui entoure le disque galactique principal. Les astronomes ont ainsi trouvé que les étoiles du halo ont des âges variés : les plus anciennes ont entre 11 et 13,5 milliards d'années ; les plus jeunes entre 6 et 8 milliards d'années. Ces dernières sont des enfants dans une maison de retraite ! Elles seraient venues d'une galaxie plus jeune (par exemple d'une galaxie satellite qui aurait été assimilée) ou d'une région plus jeune d'Andromède elle-même (à savoir le disque, qui aurait été perturbé par le passage d'une autre galaxie ou la collision avec une galaxie). Le halo de la Voie lactée ne contient pas beaucoup d'étoiles aussi « jeunes ». Ainsi, bien qu'Andromède et la Voie lactée aient des formes comparables, les images de *Hubble* suggèrent que les deux galaxies ont un passé très différent.

Des étoiles étonnamment jeunes sont visibles sur cette photographie de la banlieue d'Andromède (voir le cartouche). Elles résulteraient d'une collision entre galaxies. Plusieurs galaxies apparaissent à l'arrière-plan sur cette image.

6 Des trous noirs supermassifs à foison



Depuis les années 1960, les astronomes pensent que les quasars et autres noyaux galactiques actifs (les noyaux brillants et violents des galaxies) sont alimentés par des trous noirs géants qui dévorent la matière. Les observations de *Hubble* ont renforcé ce scénario. Presque toutes les galaxies observées en détail présentent un trou noir en leur cœur. Deux découvertes ont été particulièrement révélatrices. Tout d'abord, les images à haute résolution des quasars montrent qu'ils résident dans des galaxies elliptiques brillantes ou dans des galaxies en interaction, ce qui suggère qu'un certain nombre d'événements doivent se succéder selon une séquence donnée pour que le trou noir central soit alimenté. En outre, la masse du trou noir géant est étroitement liée à celle du bulbe sphérique d'étoiles qui entoure le centre galactique. Cela suggère que la formation d'une galaxie et d'un trou noir, ainsi que leur évolution sont étroitement liées.

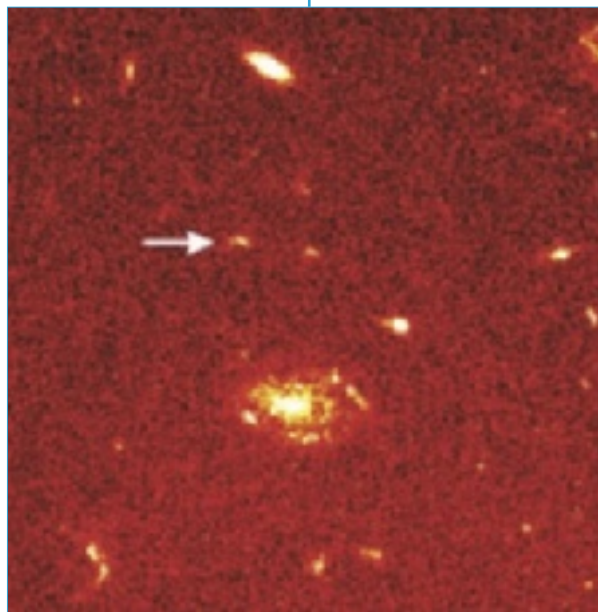
Ce jet de plasma, dont on pense qu'il serait produit par un trou noir de trois milliards de masses solaires, est émis par la galaxie M87.

7 Les plus grandes explosions

Les sursauts gamma sont de courtes flambées de rayonnement gamma qui durent de quelques millisecondes à quelques dizaines de minutes. Il y en a deux catégories, selon qu'ils durent plus ou moins de deux secondes ; les plus longs produisent des photons de plus basse énergie. D'après les données de l'Observatoire Compton de rayons gamma, du satellite à rayons X *BeppoSAX* et des observatoires au sol, les astrophysiciens ont attribué les sursauts de longue durée à l'effondrement du cœur d'étoiles massives à courte durée de vie, en un mot à un type de supernova. Mais on s'interroge : pourquoi seule une petite fraction des supernovae produit-elle des sursauts gamma ?

Hubble a montré que, tandis qu'on trouve des supernovae dans toutes les régions de formation stellaire, les sursauts gamma de longue durée sont concentrés dans les régions les plus brillantes où se trouvent les étoiles les plus massives. De plus, comparés aux galaxies hôtes des supernovae, les hôtes des sursauts gamma sont beaucoup plus faibles, plus irréguliers et moins riches en éléments lourds. Cela est important, car les étoiles massives pauvres en éléments lourds engendrent des vents stellaires plus faibles que ceux créés par leurs contreparties riches en éléments lourds. Durant leur vie, ces étoiles conservent l'essentiel de leur masse et quand elles disparaissent, elles sont plus lourdes. L'effondrement de leur cœur produit non pas une étoile à neutrons, mais plutôt un trou noir. En fait, les astronomes attribuent les sursauts gamma longs à des jets collimatés engendrés par des trous noirs en rotation rapide. Le facteur qui semble indiquer si l'effondrement d'un cœur donnera naissance ou non à un sursaut gamma serait la masse du progéniteur et sa vitesse de rotation au moment de la mort de l'étoile.

L'identification des sursauts gamma courts a été plus difficile. C'est seulement en 2005 qu'ils ont livré leurs secrets



La galaxie hôte du sursaut gamma 971214 ressemble à une petite tache (à la pointe de la flèche).

grâce aux satellites *HETE 2* et *Swift*. *Hubble* et l'Observatoire X *Chandra* ont montré que ces sursauts libèrent globalement moins d'énergie que les sursauts plus longs, et qu'ils se produisent dans des galaxies hôtes de types variés, y compris dans des galaxies elliptiques où il n'y a plus de formation d'étoiles. Apparemment, les sursauts courts ne sont pas associés à des étoiles massives de courte durée de vie, mais plutôt à leurs vestiges stellaires. Selon l'hypothèse la plus vraisemblable, ces sursauts courts se produisent durant la coalescence de deux étoiles à neutrons.

8 Le bord de l'espace

Une des principales préoccupations des astronomes est de remonter le plus loin possible dans le temps, jusqu'au Big Bang, pour comprendre comment notre galaxie et ses pré-curseurs se sont formés. Pour imaginer ce à quoi a ressemblé la Voie lactée depuis sa formation, les astronomes ont pris des clichés de galaxies à tous les stades de leur vie, de la petite enfance au grand âge. À cette fin, *Hubble* a, avec d'autres observatoires, cherché à repérer les galaxies les plus lointaines et donc les plus vieilles, en réalisant des expositions longues de petites portions du ciel : ce sont les programmes de recherche Champ profond de *Hubble*, Champ ultraprofond de *Hubble*, et GOODS (Great Observatories Origins Deep Survey).

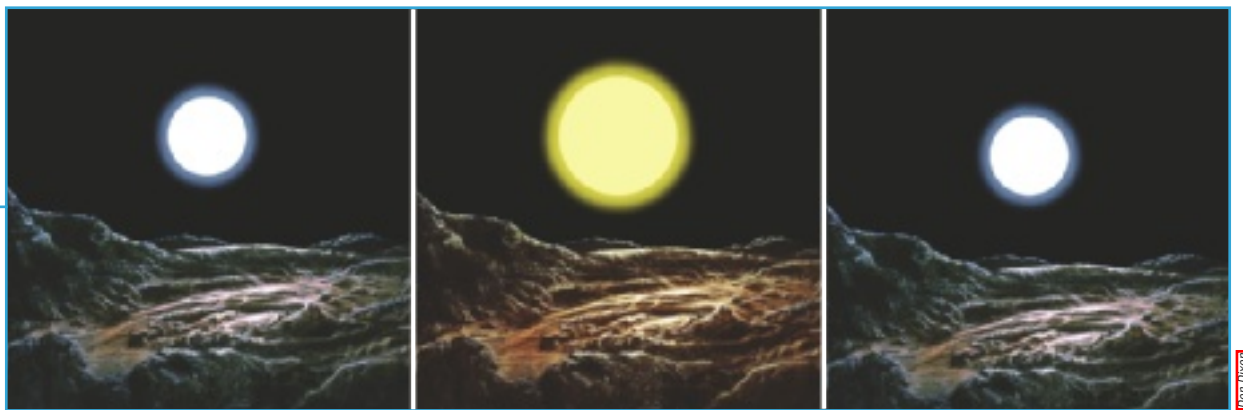
Ces images extrêmement sensibles ont dévoilé des galaxies qui existaient quand l'Univers n'avait que quelques millions d'années, soit environ cinq pour cent de son âge actuel. Ces galaxies étaient plus petites et de forme plus irrégulière que les galaxies modernes, comme on s'y attendrait si les galaxies d'aujourd'hui se formaient par agglomération de galaxies plus petites (par opposition au morcellement de galaxies plus grosses). Pour remonter encore plus loin dans le temps, un successeur de *Hubble* est actuellement en construction : le télescope spatial *James Webb*.

Les observations du champ profond ont également suivi les augmentations et les diminutions du taux de formation des étoiles dans l'Univers à l'échelle du temps cosmique. Ce



Des milliards de fois moins intenses que ce que l'œil peut détecter, des galaxies distantes sont disséminées dans tout le champ profond de *Hubble*.

taux semble avoir atteint son maximum il y a environ sept milliards d'années, et avoir été divisé par dix depuis. Lorsque l'Univers n'avait qu'un milliard d'années, le taux de formation des étoiles était apparemment déjà élevé : environ un tiers de sa valeur maximale.



9 L'âge de l'Univers

Les observations réalisées par Edwin Hubble et d'autres dans les années 1920 ont montré que nous vivons dans un Univers en expansion. Les galaxies s'éloignent les unes des autres, ce qui implique que la trame de l'Univers s'étire. La constante de Hubble (H_0) mesure le taux d'expansion actuel : c'est le paramètre clef pour déterminer l'âge de l'Univers. Le raisonnement est simple : H_0 est la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent ; ainsi, en négligeant toute

accélération ou décélération, l'inverse de H_0 donne le moment où toutes les galaxies devaient être réunies. La valeur de H_0 joue également un rôle dans la croissance des galaxies, la production des éléments légers et la durée des différentes phases de l'évolution cosmique. Il n'est donc pas étonnant que la mesure précise de la constante de Hubble ait été l'un des principaux objectifs du télescope du même nom.

En pratique, trouver cette valeur impliquait d'établir la distance des galaxies les plus proches, une tâche difficile qui a produit son lot de contro-

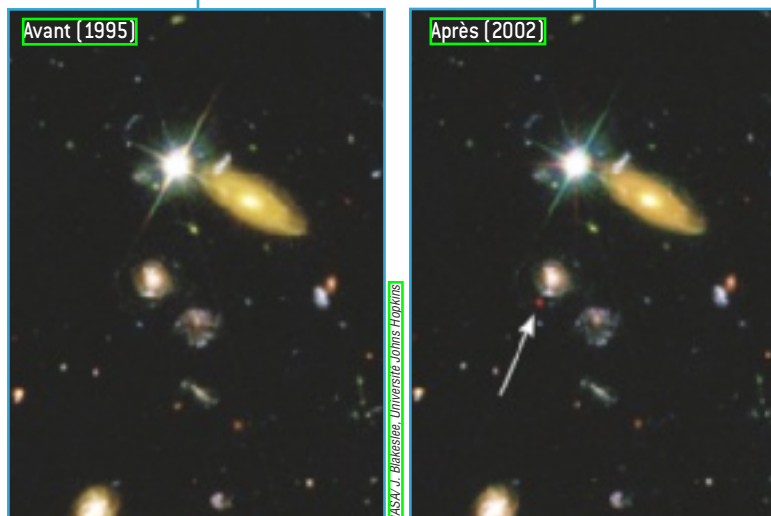
Des étoiles variables céphéides, telle celle de cette vue d'artiste, sont très utiles pour déterminer les distances intergalactiques.

verses durant le XX^e siècle. Le télescope a étudié les étoiles variables céphéides (des étoiles dont les pulsations caractéristiques révèlent la brillance intrinsèque et donc la distance) dans 31 galaxies. La valeur de H_0 qui résulte de cette étude est précise à environ dix pour cent près. Avec les mesures du fond diffus cosmologique, la valeur de la constante de Hubble indique que l'Univers est vieux de 13,7 milliards d'années.

10 L'accélération de l'Univers

En 1998, deux équipes ont fait sensation en annonçant que l'expansion de l'Univers s'accélère. Les astronomes avaient jusque-là considéré qu'elle ralentissait, car les galaxies s'attirent mutuellement par effet de gravitation, ce qui devrait retarder leur éloignement. Le moteur de cette accélération est sans doute le plus grand mystère de la physique actuelle. Selon l'hypothèse la plus répandue, l'Univers contiendrait un constituant non détecté, nommé énergie sombre. Des observations croisées de *Hubble*, des télescopes au sol et le fond diffus cosmologique suggèrent que cette énergie constituerait environ les trois quarts de la densité d'énergie totale de l'Univers.

Cette accélération a commencé il y a environ cinq milliards d'années ; auparavant, l'expansion ralentissait. En 2004, *Hubble* a découvert 16 supernovae distantes qui couvrent cette transition cruciale. Ces observations ont également posé des contraintes plus pertinentes sur la nature de l'énergie sombre. La possibilité la plus simple (mais à certains égards la plus mystérieuse) est qu'il s'agit d'une forme d'énergie contenue dans tout l'espace, y compris dans le vide. Le rôle de *Hubble* dans l'étude de l'énergie sombre est peut-être ce qui pourrait pousser la NASA à garder *Hubble* en fonctionnement. Pour le moment, c'est un instrument indispensable pour la recherche des supernovae qui permettront de comprendre ce qu'est l'énergie sombre.



Une supernova éloignée, découverte en comparant des images à différents instants, a révélé une transition entre une décélération cosmique et une accélération.

Mario LIVIO travaille actuellement à l'Institut scientifique du télescope spatial, à Baltimore.
<http://hubblesite.org>

L'Union des professeurs de physique et chimie (UdPPC) organise à Besançon ses 54^{es} Journées nationales du vendredi 27 au lundi 30 octobre 2006



Le centenaire de l'UdPPC

L'Union des physiciens (UdP, devenue UdPPC) fut créée à Pâques 1906, dans le but de mettre en œuvre et développer le caractère expérimental de l'enseignement des sciences.

Le temps est le thème majeur des conférences plénières, données par :

Claude COHEN-TANNOUDJI (ENS Paris, prix Nobel de physique 1997),
 Jean-Marc GAUDIN (Genève),
 Michel de LABACHELERIE (Besançon),
 Etienne KLEIN (CEA Saclay),
 Etienne GUYON (ESPCI),
 Gabriel CHARDIN (CEA Saclay),
 Daniel SIMON (Lyon),
 Jean-Marie VIGOUREUX (Besançon).

Plus de trente ateliers scientifiques, pédagogiques et culturels sont programmés, avec la participation des laboratoires de recherche de l'Université de Franche-Comté.

Des expositions : matériels pédagogiques, ouvrages scientifiques et expériences didactiques seront présentés.

Des visites scientifiques et culturelles permettront de découvrir les richesses et le dynamisme de la Franche-Comté.

Inscriptions et programme détaillé :
<http://besancon.udppc.asso.fr>

Les télescopes géants

Des télescopes dont le miroir atteint 100 mètres de diamètre verront le jour d'ici une quinzaine d'années. Ils permettront notamment d'observer des planètes extrasolaires ressemblant à la Terre.

VLT sans optique adaptative
Diamètre des miroirs : 8,20 mètres
Résolution : 0,4 seconde d'arc
Temps de pose : 620 secondes

Roberto Gilmozzi

Monter de nuit sur la plateforme qui abrite les quatre télescopes de huit mètres de diamètre du VLT (pour *Very Large Telescope*, ou Très grand télescope), à l'observatoire européen du mont Paranal, au Chili, est

une expérience magique. L'immense ciel étoilé au-dessus de la tête, les reliefs du désert à peine discernables sous l'horizon opalescent, mais aussi les mouvements silencieux et réguliers des télescopes de 430 tonnes aux noms étranges – *Antu*, *Kuyén*, *Melipal* et *Yepun*, soit le Soleil, la Lune, la Croix du Sud et Vénus en langue mapuche –, tout invite à la rêverie.

Le VLT, l'ensemble de télescopes le plus performant du monde, est une entreprise collective qui réunit de nombreuses nations. Comme les autres grands télescopes actuels, tels l'Observatoire *Keck* ou le télescope spatial *Hubble*, le VLT est un fleuron de la technique, issu des efforts conjugués de millions de personnes.

Cependant, le VLT avait à peine été construit que les astronomes ont commencé à se préoccuper de ses successeurs. Comme tous les nouveaux instruments scientifiques, les télescopes de huit à dix mètres de diamètre actuellement en activité ont apporté bien plus que des réponses aux questions pour lesquelles ils ont été conçus. Leurs découvertes ont soulevé de nouvelles questions, plus fondamentales. Étudier les

L'optique adaptative permet au télescope européen VLT de passer de taches indistinctes à une image plus détaillée que celle du télescope spatial *Hubble*. Cette résolution n'est cependant rien à côté du luxe de détails qu'offrirait le télescope géant OWL (ces simulations sont fondées sur une image prise par le VLT de la région de formation d'étoiles NGC 3603).

NGC 3603
European Southern Observatory

du futur



The diagram illustrates the evolution of astronomical telescopes. At the top, a small circle shows a distant galaxy. Below it, three large circular areas represent the field of view of different telescopes. The leftmost circle shows a very pixelated, low-resolution view of a galaxy. The middle circle shows a more detailed view with visible spiral arms. The rightmost circle shows a sharp, high-resolution view of a galaxy with many stars. Below these circles, a large radio telescope dish is shown on a complex metal structure, representing the OWL project.

Télescope spatial *Hubble*
Diamètre du miroir : 2,40 mètres
Résolution : 0,04 seconde d'arc
Temps de pose : 1 600 secondes

VLT avec optique adaptative
Diamètre des miroirs : 8,20 mètres
Résolution : 0,012 seconde d'arc
Temps de pose : 160 secondes

Projet OWL
Diamètre du miroir : 100 mètres
Résolution : 0,001 seconde d'arc
Temps de pose : 1 seconde

planètes de type terrestre au sein d'autres systèmes stellaires, rechercher des signes de vie, observer les premières galaxies de l'Univers, comprendre la nature de la matière noire et de l'énergie sombre, etc. Tous ces défis appellent une nouvelle génération de télescopes des centaines de fois plus puissants que les instruments actuels. Plusieurs agences spatiales ont fait de tels projets une priorité; pour l'Académie américaine des sciences, cet objectif arrive juste après la mise en service du successeur de *Hubble*, le télescope spatial *James Webb* (ou JWST). Nombre de projets sont à l'étude, notamment le télescope de trente mètres (*Thirty Meter Telescope*, ou TMT) et le télescope *Magellan* de 24 mètres (GMT), ou le télescope OWL (*Overwhelmingly Large Telescope*, ou télescope excessivement grand).

En microélectronique, la loi de Moore prévoit que la densité de transistors par unité de surface double tous les 18 mois. Les télescopes ont suivi une loi similaire: tous les 20 ou 30 ans, une nouvelle génération de télescopes voit le jour, avec des miroirs dont le diamètre a doublé. Il y a ainsi eu en 1917 le télescope *Hooker* du mont Wilson dont le miroir principal fait 2,5 mètres de diamètre, en 1948 le télescope *Hale* du mont Palomar avec cinq mètres, en 1992 les télescopes jumeaux du *Keck*, construits sur le Mauna Kea à Hawaï, avec un diamètre de miroir atteignant dix mètres.

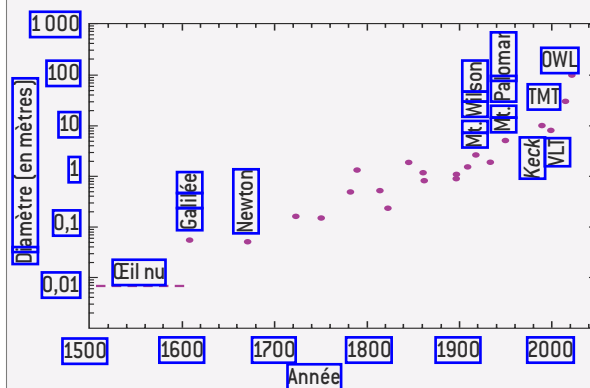
En continuant ainsi, la prochaine génération de télescopes devrait atteindre 20 mètres de diamètre d'ici 2025. Ceux qui proposent un télescope de 100 mètres de diamètre d'ici dix ans sont-ils irréalistes? Un examen des défis à relever pour construire de tels télescopes montre qu'il n'en est rien. Non seulement les besoins sont pressants, mais, dans une large mesure, les techniques nécessaires existent déjà.

Augmenter la surface collectrice

Une des motivations principales pour construire des grands télescopes est que les autres solutions pour améliorer les capacités des instruments arrivent à leurs limites. Dans un télescope, la lumière incidente est réfléchiée par un miroir principal et focalisée par un miroir secondaire en un point où est placé un détecteur (un capteur photographique ou un spectrographe qui décompose la lumière selon les différentes longueurs d'onde pour l'analyser). La taille d'un télescope se réfère au diamètre du miroir primaire. La sensibilité de l'instrument est proportionnelle à la quantité de lumière collectée, c'est-à-dire à la surface du miroir, ou encore au carré de son diamètre. Doubler le diamètre permet par exemple d'observer des corps célestes quatre fois moins lumineux, ou de même luminosité mais deux fois plus éloignés.

Au cours des 50 dernières années, les télescopes ont gagné en sensibilité non seulement en raison de l'augmentation de leur diamètre, mais aussi à cause de l'amélioration des détecteurs. Le télescope du mont Palomar était initialement équipé de plaques photographiques capables d'enregistrer quelques pour cent seulement de la lumière incidente. Les détecteurs électroniques actuels ont une efficacité proche de 100 pour cent. Le gain en sensibilité imputable aux capteurs équivaut à un quintuplement du diamètre du télescope. Les télescopes actuels étant de surcroît deux fois plus grands que ceux de la génération précédente, cela revient à dire qu'ils sont 100 fois plus sensibles. Pour accomplir le

La taille du miroir des télescopes ne cesse d'augmenter et double tous les 20 à 30 ans à peu près. Les télescopes en projet tels OWL ou TMT perpétueront cette tendance.



même bond en sensibilité, maintenant que l'efficacité des détecteurs est presque à son maximum, il faut désormais envisager un miroir de 100 mètres de diamètre.

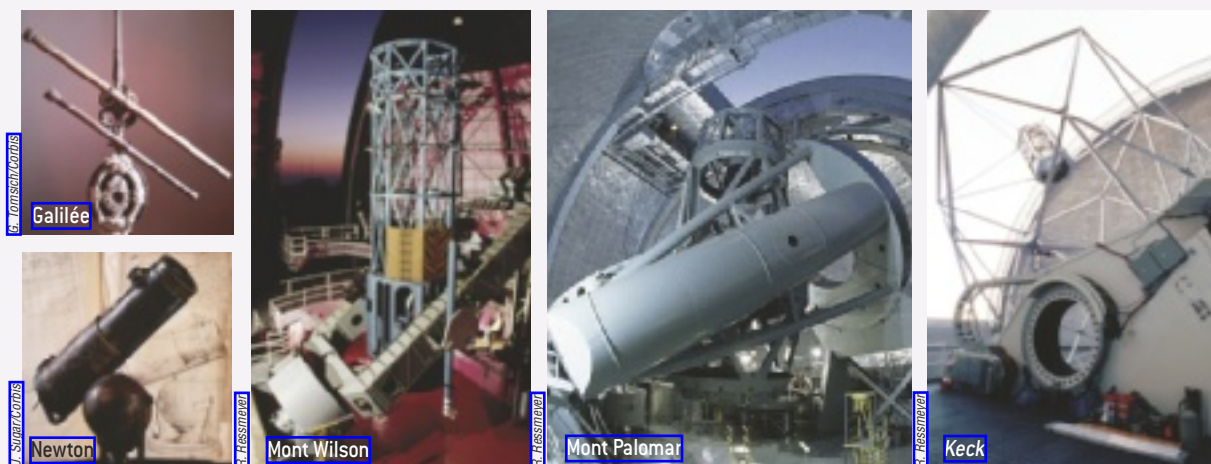
Les partisans des différents projets sont partagés sur la taille envisageable, mais personne ne doute de la nécessité d'augmenter la surface collectrice des prochains télescopes. Jusque récemment, la taille des télescopes était limitée par les capacités techniques en termes de fabrication et de polissage du miroir. Pour obtenir des images les plus nettes possibles, il faut en effet supprimer toutes les imperfections de surface dont l'amplitude est supérieure à une fraction de la longueur d'onde de la lumière recueillie. Cette contrainte est bien plus importante pour les télescopes optiques que pour les radiotélescopes, pourtant beaucoup plus grands, car la longueur d'onde de la lumière visible est plus courte que celle des ondes radio.

Le télescope du mont Palomar était équipé d'un miroir paraboloidal – vu en coupe, c'est une portion de parabole – de cinq mètres de diamètre, poli avec une précision de 50 nanomètres (soit l'équivalent de bosses d'au plus un centimètre sur une surface grande comme la France). Son polissage – avec finition à la main – a duré 11 ans, pendant lesquels sa forme était mesurée tous les deux jours (avec cependant une interruption durant la Seconde Guerre mondiale).

Le polissage des miroirs est aujourd'hui piloté par ordinateur, ce qui accélère le processus. Chacun des quatre miroirs de 8,2 mètres du VLT a été poli en moins d'un an, et mesuré quasiment en continu. La qualité de leur surface égale, voire dépasse, celle de *Hale*, malgré leur forme plus complexe – un hyperboloïde, qui assure la meilleure focalisation. Le polissage n'est donc plus le principal obstacle.

La fabrication du verre lui-même pose un problème plus sérieux. Pour construire des pièces de verre de huit mètres de diamètre, les constructeurs ont dû mettre sur pied des ateliers spéciaux et tâtonner; ils ont cassé plusieurs miroirs avant de réussir. Les procédés d'aujourd'hui ne permettraient pas de fabriquer des miroirs ne serait-ce que deux fois plus grands. Heureusement, l'astronome italien Guido Horn D'Arzturo proposa la solution dès 1932: construire un miroir en plusieurs morceaux. Les miroirs des télescopes jumeaux du *Keck*, par exemple, sont formés de 36 hexagones courbés, mesurant

Des télescopes de plus en plus grands



1,80 mètre de côté chacun. Chaque segment est un morceau d'hyperboloïde dont la forme précise dépend de sa place dans la mosaïque. La forme hexagonale permet de les agencer pour constituer une surface globale hyperboloïde. En principe, une telle architecture peut être transposée à n'importe quelle échelle. Seules contraintes : aligner les morceaux avec une précision inférieure à une fraction de la longueur d'onde utilisée et maintenir la cohésion de la structure en dépit du vent et des contraintes mécaniques.

Comme le *Keck*, *OWL* et le *TMT* auraient des mosaïques de miroirs hexagonaux, mais les concepteurs du *GMT* ont choisi une voie différente. Afin de réduire les inconvénients de la segmentation, ils ont prévu des segments moins nombreux mais plus grands. Leur télescope comporterait une mosaïque de sept miroirs circulaires de 8,4 mètres de diamètre (le premier d'entre eux est déjà en phase de fabrication, pour valider le principe). Cependant, il sera difficile d'étendre cette idée aux tailles supérieures.

Des exoplanètes à débusquer

La sensibilité lumineuse n'est que l'une des caractéristiques d'un télescope. Un autre point clef est la résolution, l'aptitude à discerner de petits détails. En principe, plus un télescope est grand, moins son image est dégradée par la diffraction des ondes lumineuses sur les bords du miroir, phénomène qui rend floues les images de sources ponctuelles. Une tache brillante indiquée par un petit télescope peut ainsi, vue à l'aide d'un instrument plus grand, se révéler être un amas d'étoiles.

En pratique, cependant, la distorsion du front d'onde lumineux par la turbulence atmosphérique est un obstacle majeur pour les télescopes optiques au sol. Même dans les sites astronomiques les plus purs, la turbulence de l'air brouille l'image de tout objet céleste plus petit que 0,3 seconde d'arc. Si l'on observe l'étoile géante Bételgeuse, qui a un diamètre de 0,05 seconde d'arc, à travers le télescope de cinq mètres du mont Palomar, on verra un point rouge plus brillant mais pas plus ponctuel qu'avec un télescope de 20 centimètres de diamètre (et 300 000 fois moins cher).

Les télescopes spatiaux ont le problème inverse. Ils produisent des images d'une netteté spectaculaire, mais, faute

de miroirs suffisamment grands, manquent de sensibilité pour observer les objets les moins lumineux. Pour que le télescope spatial *Hubble* rentre dans la soute de la Navette spatiale, le diamètre de son miroir a été limité à 2,4 mètres, et même le *JWST* n'aura qu'un miroir de 6,5 mètres de diamètre. Aussi l'analyse spectroscopique des astres découverts par les télescopes spatiaux doit-elle être conduite au sol.

Ce compromis entre sensibilité et résolution n'est pas acceptable pour la nouvelle génération de télescopes, dont les objectifs scientifiques nécessitent les deux qualités à la fois. Un télescope de 100 mètres de diamètre détecterait des astres 1 000 fois moins lumineux que tous ceux découverts jusqu'à présent. Là où les télescopes actuels ne voient qu'un ciel noir, leurs successeurs verraient une foule d'objets faibles. Sans une haute résolution angulaire, les images d'objets voisins se confondraient.

La conjonction d'une résolution élevée et d'une grande sensibilité est aussi nécessaire pour étudier des exoplanètes de type terrestre. Pour détecter une telle planète, au moins un milliard de fois moins lumineuse que son étoile hôte, les astronomes doivent occulter l'étoile avec un petit disque nommé coronographe. Mais si le disque est trop grand, il cache aussi la planète. Une résolution supérieure signifie que les astronomes peuvent se contenter d'un disque plus petit et étendre ainsi la portée de la chasse aux planètes. Pour chercher dans notre voisinage galactique des planètes sur des orbites de type terrestre, un télescope devrait avoir une taille minimale de 80 mètres. Il pourrait passer au crible une région comprenant environ 400 étoiles de type solaire et pourrait recueillir le spectre d'une quarantaine de planètes similaires à la Terre. Un instrument de 30 mètres ne pourrait scruter que les quelques dizaines de systèmes les plus proches, et devrait collecter de la lumière pendant plusieurs semaines pour analyser le spectre d'une éventuelle planète tellurique.

Pour que les télescopes futurs aient une résolution élevée, il faudra surmonter grâce à l'optique adaptative les distorsions introduites par la turbulence atmosphérique. Le principe est de suivre une étoile de référence (qui peut être une « étoile » artificielle créée en envoyant un faisceau laser se réfléchir dans la haute atmosphère) et d'ajuster en temps réel la forme du miroir, de façon à corriger les distorsions

Le projet OWL prévoit un télescope dont le miroir aurait un diamètre de 100 mètres. Il serait ainsi dix fois plus gros que n'importe quel instrument optique jamais construit. Un certain nombre d'innovations techniques limiteraient son coût à moins d'un milliard d'euros, c'est-à-dire un coût inférieur à celui du télescope spatial *Hubble*.

MIROIR PRIMAIRE

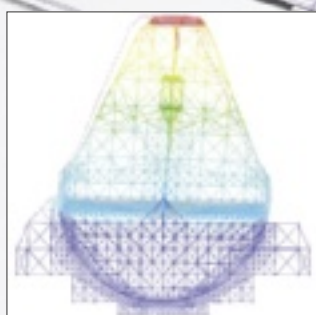
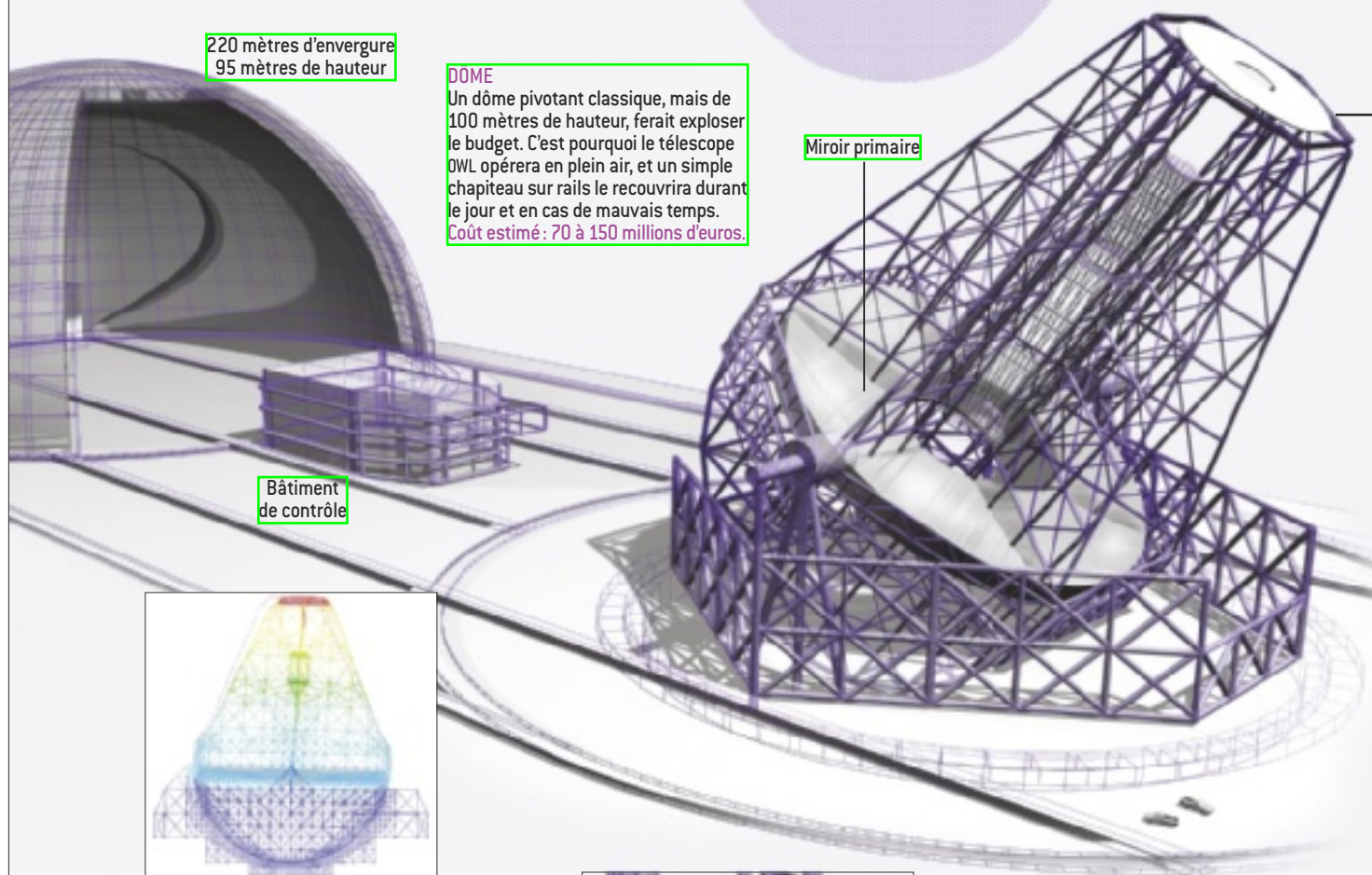
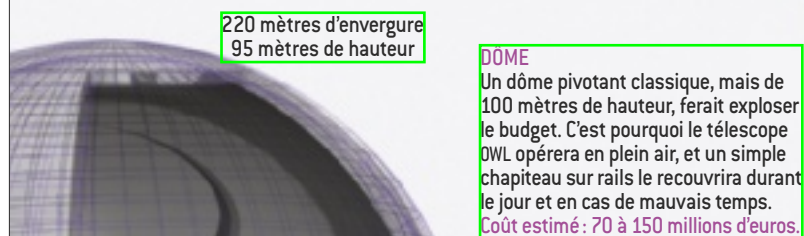
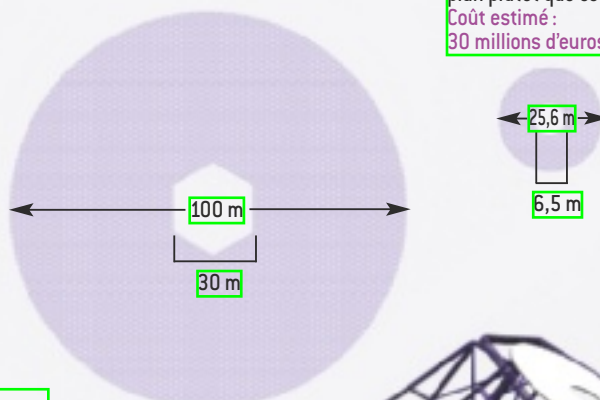
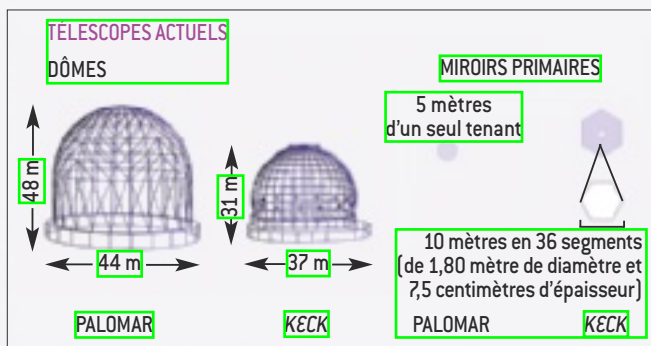
Le miroir primaire, qui collecte la lumière, est constitué de 3 048 segments hexagonaux de 1,60 mètre de diamètre et 15 centimètres d'épaisseur. Afin de réduire les coûts, ces miroirs élémentaires décrivent une portion de surface sphérique (et non parabolique ou hyperbolique), de sorte que leur courbure est constante.

Coût estimé : 290 millions d'euros.

MIROIR SECONDAIRE

Le miroir secondaire, qui renvoie la lumière vers le correcteur, est une mosaïque de 216 segments. Pour alléger les contraintes mécaniques, ce miroir est plan plutôt que courbe.

Coût estimé : 30 millions d'euros.



STRUCTURE

L'ossature du télescope se déformera symétriquement lorsqu'il sera incliné, de façon à maintenir l'alignement des miroirs. Les simulations montrent que le déplacement horizontal variera de zéro (en bleu) à 0,6 millimètre (en rouge). La structure occultera en partie le miroir, mais elle ne bloquera en fait qu'environ trois pour cent de la lumière.

Coût estimé : 185 millions d'euros.



MECANISME D'ENTRAÎNEMENT

Le télescope OWL pèsera près de 15 000 tonnes, ce qui est trop pour des montures classiques. Au lieu de cela, il sera posé sur 300 systèmes d'entraînement par friction (des bogies) roulant sur des pistes circulaires.

Coût estimé : 30 millions d'euros.

OWL, un géant de 100 mètres

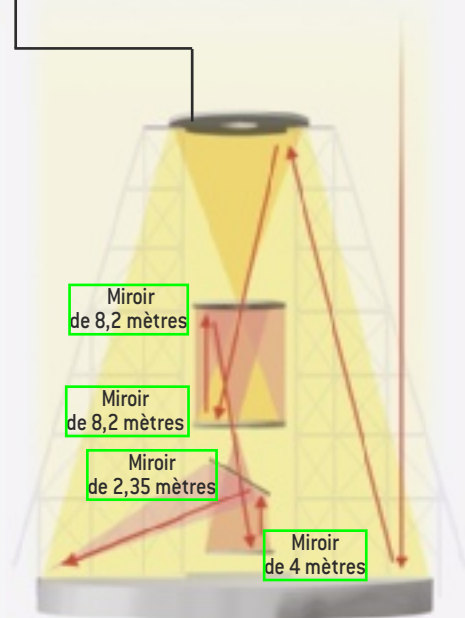
OPTIQUE ACTIVE

Chaque miroir élémentaire est muni de détecteurs et de trois vérins qui contrôlent son orientation.



Chaque segment :
1,6 mètre d'envergure
15 centimètres d'épaisseur

Miroir secondaire



CORRECTEUR OPTIQUE

Les quatre miroirs du correcteur, placés entre le miroir secondaire et les détecteurs, supprimeront les déformations induites par la forme inhabituelle des miroirs primaires et secondaires. Deux de ces miroirs peuvent aussi corriger les distorsions atmosphériques grâce à un système d'optique adaptative.

Coût estimé : 55 millions d'euros pour les miroirs, 100 millions d'euros pour l'optique adaptative.

de l'image de cette cible et à garder une image toujours nette. Le miroir mobile peut être le miroir secondaire ou un autre miroir plus petit interposé entre le miroir secondaire et les détecteurs. Une série de petits pistons, ou actuators, appuient sur l'arrière du miroir pour ajuster précisément sa forme.

Ce système permet aux télescopes d'approcher la résolution théorique maximale, limitée uniquement par la diffraction, comme si l'atmosphère n'existait pas. Avec l'optique adaptative, un télescope de 100 mètres distinguerait, dans les longueurs d'onde du visible, des détails de 0,001 seconde d'arc, 40 fois plus fins que ceux discernés par le télescope *Hubble*. À travers un tel télescope, Bételgeuse n'apparaîtrait pas comme un simple point lumineux, mais comme une image de 3000 pixels avec un niveau de détail équivalent à celui avec lequel on voit aujourd'hui les planètes proches de la nôtre.

L'optique adaptative est déjà utilisée pour de nombreux grands télescopes, mais la transposer à plus grande échelle n'est pas une mince affaire : pour un télescope de 100 mètres, un système d'optique adaptative devrait être composé de plus de 100 000 actuators, contre 1 000 au plus pour les systèmes actuels. Le système de contrôle devra adapter la forme du miroir plusieurs centaines de fois par seconde, ce dont les processeurs actuels sont incapables.

Les concepteurs adoptent une approche par étapes, en construisant d'abord des systèmes qui opèrent dans l'infrarouge. L'effet de la turbulence étant moins grave pour les grandes longueurs d'onde, un dispositif d'optique adaptative nécessiterait moins d'actuators. Une technique très prometteuse est l'optique adaptative multiconjuguée, dont le VLT est en train de déployer une version prototype ; elle corrige la turbulence sur un grand champ et non seulement dans une petite région centrée sur l'étoile de référence.

De l'optique... et de la mécanique !

L'interférométrie est un autre moyen d'améliorer la résolution. Elle consiste à combiner la lumière recueillie par plusieurs télescopes, les interférences résultantes permettant de reconstruire l'image d'origine avec une résolution encore meilleure que celle d'éventuels télescopes géants. Les quatre télescopes du VLT, distants de 130 mètres les uns des autres, peuvent fonctionner de concert en interférométrie ; ils offrent alors la même résolution qu'un télescope de 130 mètres de diamètre. L'interférométrie a cependant ses limitations. Son champ de vision est très étroit et, en raison de la complexité des systèmes optiques, seuls quelques pour cent de la lumière recueillie sont utilisables, contre 50 pour cent ou plus pour un télescope usuel. De toute façon, la surface collectrice totale n'est que la somme de celles des miroirs mis en jeu, bien inférieure à celle d'un miroir dont le diamètre correspondrait à leur écartement. Ainsi, comme les télescopes spatiaux, l'interférométrie favorise la résolution au détriment de la sensibilité ; elle ne saurait donc se substituer à un télescope géant au sol.

La conception d'un télescope géant pose de nombreux problèmes mécaniques. Le poids d'un animal augmente comme le cube de sa taille, tandis que la résistance de son squelette ne croît que comme le carré de la taille. Proportionnellement à sa taille, un éléphant a donc besoin de jambes beaucoup plus larges qu'une souris. C'est aussi valable

pour les télescopes. La structure du télescope doit être suffisamment rigide pour conserver l'alignement précis des miroirs et pour résister aux vibrations provoquées par le vent, les moteurs ou autre. En général, les télescopes courts et trapus sont plus rigides que les instruments longs et fins, mais leur longueur focale est plus courte – en d'autres termes, les rayons lumineux doivent être plus fortement déviés pour être focalisés – si bien que les imperfections du miroir et les défauts d'alignement se font plus cruellement sentir.

Aussi un équilibre doit-il être trouvé entre exigences mécaniques et exigences optiques. Le VLT vibre un peu sous l'effet du vent, mais on annule l'effet de ces vibrations en imposant à son miroir secondaire un mouvement dans la direction opposée, à une fréquence allant jusqu'à 70 hertz. Il devrait en être de même pour le télescope OWL.

Autre problème : quand le télescope suit le mouvement des étoiles dans le ciel, la répartition de son poids varie, ce qui peut induire une torsion de la structure et un désalignement des miroirs. La plupart des grands télescopes actuels sont construits selon une structure dite en squelette conçue par Mark Serrurier dans les années 1930 pour le télescope du mont Palomar. Les miroirs y sont tenus par un châssis ouvert constitué de quatre armatures triangulaires. Quand on incline le tout, le châssis se déforme et les miroirs se décalent latéralement, mais de la même façon pour tous, de sorte que leur alignement est à peu près conservé.

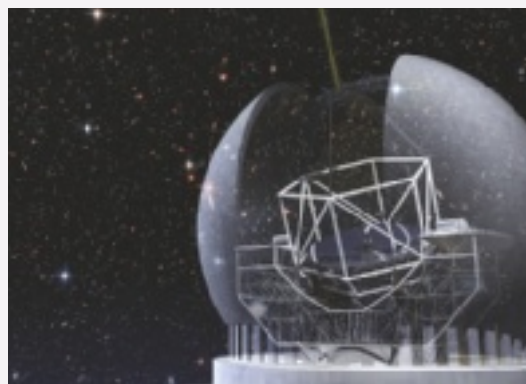
Le projet OWL reprend une approche similaire, mais présente l'avantage d'être construit à partir de quelques composants de base standardisés. La structure totale de OWL pèserait entre 10 000 et 15 000 tonnes – l'équivalent de la tour Eiffel – en fonction du choix des matériaux du miroir. Cela peut sembler excessif, mais OWL serait proportionnellement bien plus léger que les télescopes actuels : grand comme OWL, le VLT pèserait 500 000 tonnes ! Déplacer plus de 10 000 tonnes avec précision constitue cependant un défi. Les options envisagées incluent des chariots munis de systèmes d'entraînement par frottement, de minces couches d'huile sur lesquelles le télescope flotterait (c'est le cas pour le VLT) ou la lévitation magnétique.

Le coût, seul réel problème

Techniquement, les astronomes ne sont donc pas fous lorsqu'ils envisagent la construction de télescopes de 100 mètres de diamètre. Alors que les gains en taille passés ont été autant de sauts vers l'inconnu, la conception des télescopes futurs peut s'appuyer sur des techniques et des connaissances existantes.

Le seul réel problème est le coût d'un tel projet. Si l'on suit l'évolution historique, le prix d'un télescope est proportionnel au diamètre du miroir primaire élevé à la puissance 2,6. Les télescopes du VLT ayant coûté près de 100 millions d'euros chacun, un télescope de 20 mètres devrait alors coûter près de un milliard d'euros. Un télescope de 100 mètres de diamètre coûterait la somme faramineuse de 60 milliards d'euros ! Tant que cette loi sera vérifiée, les astronomes devront se contenter de construire une multitude de petits télescopes pour atteindre une surface collectrice équivalente. Le coût croîtrait alors comme le carré du diamètre souhaité. Pour moins d'un milliard d'euros, on pourrait construire dix

TELESCOPE DE TRENTE METRES (TMT)



Diamètre :

30 mètres

Coût estimé :
Conception :

580 millions d'euros
Miroir primaire de forme
hyperboloïdale et segmenté
<http://www.tmt.org>

Site Internet :

télescopes de 8,2 mètres de diamètre, leur surface collectrice totale étant équivalente à un unique télescope de 26 mètres de diamètre. Malheureusement, comme nous l'avons vu, l'équivalence en taille ne signifie pas équivalence en performance. Utilisé comme des télescopes ordinaires, ce réseau de télescopes aurait la sensibilité d'un instrument de 26 mètres, mais le pouvoir de résolution d'un miroir de 8,2 mètres. Utilisé comme interféromètre, il offrirait une résolution excellente, mais une sensibilité bien moindre.

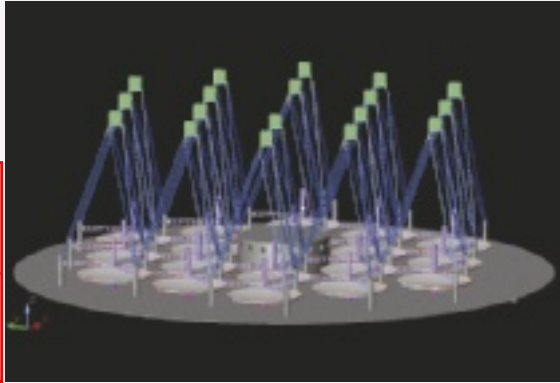
Heureusement, les ingénieurs comptent contourner la loi liée au coût en produisant les composants en série. Pour réaliser le miroir primaire de OWL, nous avons choisi d'assembler des miroirs de forme sphérique et tous identiques, au lieu de miroirs hyperboloïdaux classiques qui nécessitent de fabriquer chaque pièce sur mesure, en fonction de sa position dans le miroir final. On pourrait réaliser les 3048 miroirs élémentaires à la chaîne, au rythme d'un tous les deux jours. Pour compenser la distorsion de la lumière due à la sphéricité des miroirs, le télescope devrait être équipé d'un correcteur, similaire à celui qui a réparé la myopie de *Hubble*. Même ainsi, le système serait moins coûteux.

La forme du miroir secondaire est un autre choix non usuel. Pour simplifier les contraintes mécaniques, nous avons choisi une forme plate en lieu et place de l'hyperboloïde habituel, de sorte qu'une précision de quelques millimètres dans l'alignement suffirait, plutôt que quelques micromètres. L'inconvénient est que le miroir doit alors être énorme (25 mètres de côté). Les économies d'échelle devraient cependant largement compenser la complexité supplémentaire.

L'un des principaux éléments du coût d'un télescope est le dôme qui le protège. Le dôme du télescope du mont Palomar, avec 48 mètres de hauteur, est plus vaste que celui de la basilique Saint-Pierre de Rome. Cette taille est notamment imposée par la monture qui soutient le télescope : elle est inclinée pour pointer vers l'étoile polaire, de sorte que l'instrument peut suivre une étoile simplement en tournant autour de son axe. Ce type de monture est dit équatorial. Les télescopes modernes ont une monture plus

Les autres projets de télescopes géants

RESEAU DE MIROIRS LIQUIDES DE GRANDE OUVERTURE (LAMA)



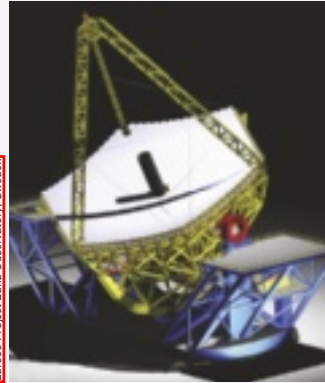
Equivalent à 42 mètres pour la sensibilité,
à 54 mètres pour la résolution
40 millions d'euros
18 miroirs paraboliques de 10 mètres de diamètre
en mercure liquide, pointant à la verticale
<http://www.astro.ubc.ca/LMT/lama/>

TELESCOPE GEANT MAGELLAN (GMT)



Equivalent à 21,40 mètres en surface,
à 24,5 mètres pour la résolution
400 millions d'euros
Sept miroirs hyperboloïdaux
de 8,4 mètres sur une même monture
<http://www.gmto.org>

EURO50



50 mètres
580 millions d'euros
Miroir primaire ellipsoïdal segmenté
<http://www.astro.lu.se/fftorben/euro50>

compacte, dite alt-azimutale (le terme se réfère à un mouvement continu dans deux dimensions plutôt qu'une rotation autour d'un axe). Le contrôle en est plus compliqué, mais a été rendu possible par l'informatique. En conséquence, les dômes modernes sont plus petits – celui du *Keck* fait par exemple 31 mètres de hauteur.

Cependant, même avec une monture alt-azimutale, le dôme d'un télescope de 100 mètres de diamètre serait gigantesque et très onéreux. En outre, des simulations numériques suggèrent qu'une structure aussi monumentale créerait elle-même de la turbulence atmosphérique. Le TMT et le GMT auraient ainsi un dôme, mais OWL serait simplement doté d'un hangar amovible pour être abrité durant la journée ou en cas de mauvais temps, et opérerait à l'air libre le reste du temps. OWL supporterait des vents modérés (jusqu'à 15 mètres par seconde).

L'avenir de l'astronomie optique

Le coût final d'un télescope de 100 mètres de diamètre tel que OWL serait d'environ un milliard d'euros. Le TMT devrait quant à lui coûter environ 580 millions d'euros, et le GMT 330 millions d'euros. Ces coûts restent inférieurs à ceux de la plupart des expériences spatiales, mais représentent néanmoins une somme considérable, qui nécessitera probablement une collaboration internationale.

La dernière décennie a été un âge d'or pour l'astronomie, mais nous attendons encore plus de découvertes d'ici 2015. Les nouveaux détecteurs et l'optique adaptative étendront les capacités des télescopes actuels de huit à dix mètres. L'interférométrie, de nos jours technique expérimentale, deviendra routinière et permettra d'atteindre des résolutions supérieures à la milliseconde d'arc. Le JWST, destiné en particulier aux observations en infrarouge, devrait être lancé en 2013. La mise en service du Grand réseau millimétrique de l'Atacama (ALMA), avec ses 50 antennes de 12 mètres, jettera un pont entre l'astronomie infrarouge et radio dès 2011. Les radioastronomes auront peut-être commencé à construire

le réseau d'antennes SKA (pour *Square Kilometer Array*, ou réseau de un kilomètre carré) pour détecter les ondes radio de basse fréquence, un domaine peu exploré du spectre.

Les astronomes ont-ils vraiment besoin de télescopes géants dans le domaine optique? Assurément oui, notamment pour étudier les planètes extrasolaires ou les constituants des étoiles et des galaxies. Les télescopes au sol offriront une résolution et une sensibilité plus élevées en lumière visible et infrarouge que les observatoires spatiaux – lesquels se spécialiseront dans les rayonnements X, ultraviolet et infrarouge moyen, auxquels l'atmosphère terrestre est opaque.

Il ne sera pas chose facile pour les astronomes de trancher entre les projets OWL, TMT et GMT. Chacun a ses avantages et ses inconvénients. Un comité international a récemment jugé que le projet OWL était faisable, mais risqué du point de vue financier et technique. Nous élaborons actuellement un projet de plus petite taille, et une décision est attendue avant la fin de l'année.

Au fil des siècles, les télescopes sont passés d'objets tenant sur une table de chevet à des instruments aussi grands qu'un immeuble. Il nous est désormais possible de construire des instruments capables de découvrir les premières étoiles de l'Univers et des jumelles extrasolaires de la Terre. Quand le ferons-nous? La question reste ouverte.

Roberto GILMOZZI est l'un des principaux responsables du projet de télescope géant OWL. Il a dirigé de 1999 à 2005 l'observatoire européen VLT, au Chili.

Exploring the cosmic frontier: astrophysical instruments for the 21st century, ESO Astrophysics Symposia, Springer-Verlag, sous presse.
www.mpifr-bonn.mpg.de/berlin04/

A. L. ARDEBERG et T. E. ANDERSEN (éd.), *Proceedings of second Bäckskog workshop on extremely large telescopes*, in *Proceedings of the SPIE*, vol. 5382, juillet 2004.

R. GILMOZZI et P. DIERICKX, *OWL concept study*, in *ESO Messenger*, n° 100, pp. 1-10, juin 2000. En ligne :
www.eso.org/projects/owl/publications/2000_05_Messenger/htm

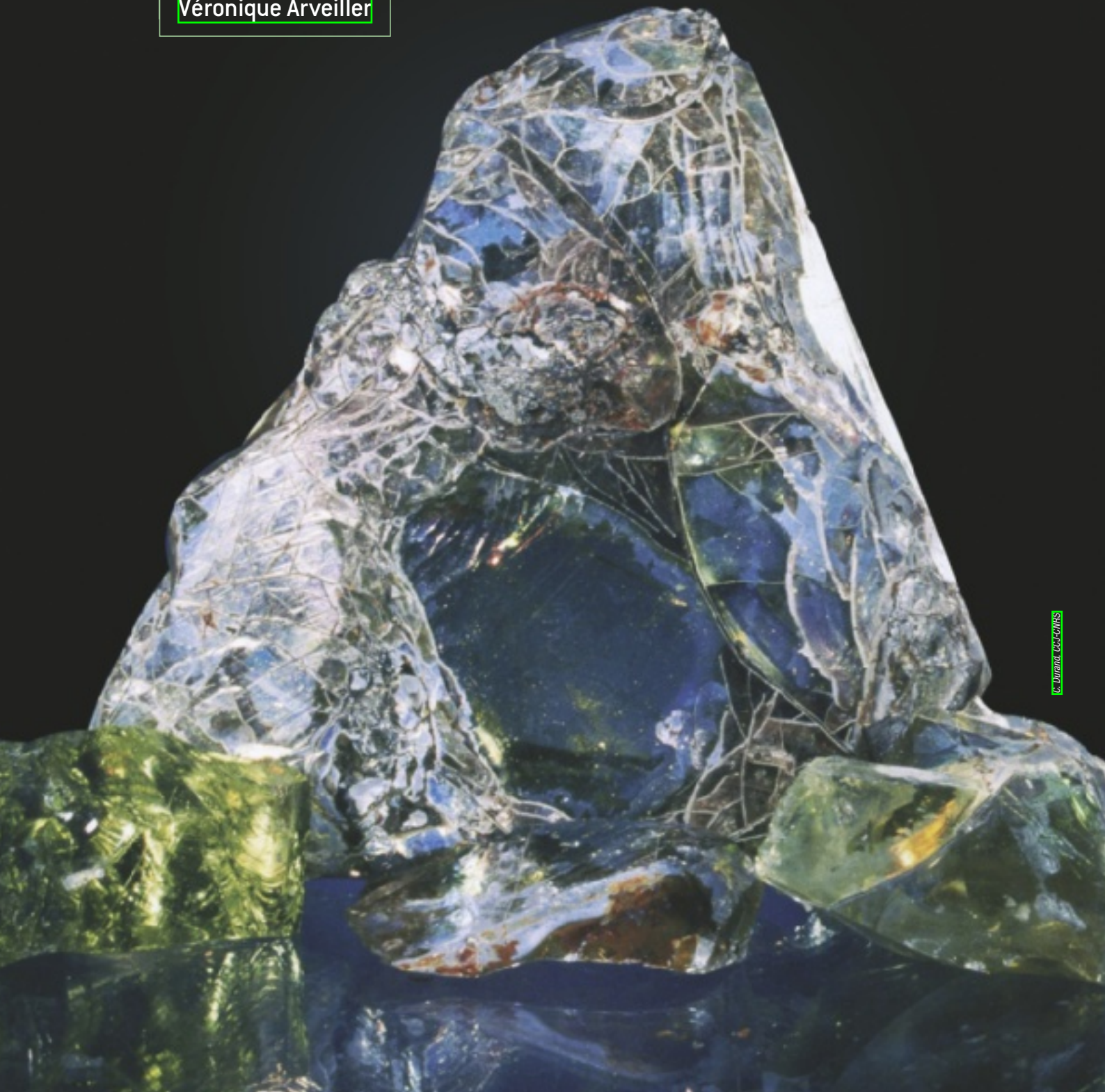
Site du projet OWL : www.eso.org/projects/owl/

Auteurs & Bibliographie

Le verre dans l'Empire

Le verre fut d'abord une matière précieuse que l'on importait d'Orient, puis l'invention du soufflage en fit un matériau courant.

Véronique Arveiller



« Il est en Syrie une région nommée Phénicie confinante à la Judée et contenant au pied du mont Carmel, un marais appelé Candebia. On croit qu'il donne naissance au fleuve Bélus qui après un cours de cinq mille pas se jette dans la mer auprès de la colonie de Ptolémaïs... Selon la tradition, un navire portant des marchands de nître vint y aborder, et, comme les marchands dispersés sur le rivage, préparaient leur repas et ne trouvaient pas de pierres pour rehausser leurs marmites, ils les remplacèrent par des mottes de nître [natron] tirées de leur cargaison. Quand celles-ci furent embrasées, mêlées avec le sable du rivage, des ruisseaux translucides d'un liquide inconnu se mirent à couler et telle fut l'origine du verre. »

Plinie l'Ancien, Histoire naturelle, XXXVI, 65

Cette légende rapportée par Plinie situe la découverte de la recette du verre près de l'embouchure du fleuve Bélus sur la côte syro-palestinienne. Elle souligne la part due au hasard dans l'invention du matériau, tout en donnant l'idée que les Anciens s'en faisaient : un mélange fusible

de sable et de natron (du carbonate de sodium). Nous savons aujourd'hui que trois ingrédients sont nécessaires pour obtenir du verre : environ 60 pour cent de silice (l'agent vitrifiant), de la soude ou de la potasse pour abaisser le point de fusion entre 1 000 et 1 100 °C (l'agent fondant) et de la chaux (ou tout autre agent stabilisant) pour rendre le verre résistant et l'empêcher de se dissoudre à long terme. La recette antique, quant à elle, ne comprend que deux ingrédients.

Pour autant, les plus anciens objets de verre ne sont pas syro-assyriens, mais mésopotamiens, et remontent au III^e millénaire avant notre ère. Au II^e millénaire, des artisans mésopotamiens réalisaient de petits réci-

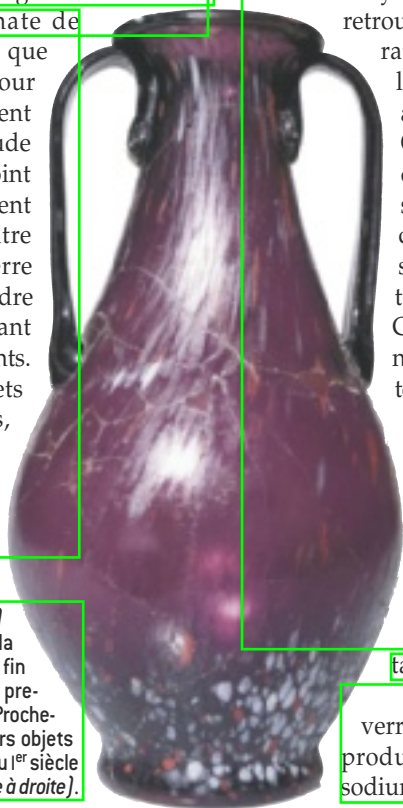
pients à partir d'éléments préfabriqués ou les modelaient à partir d'un noyau de verre. Toutefois, il n'existe probablement de véritable artisanat du verre que depuis les découvertes évoquées par Plinie l'Ancien dans le monde assyrien. Elles eurent probablement lieu vers le VIII^e siècle avant notre ère, et furent suivies par le développement d'une production et d'un artisanat verriers au Proche-Orient et en Égypte à l'époque hellénistique. Ainsi, le verre fut d'abord une matière précieuse venue d'Orient que les navires commerciaux transportaient jusqu'en Occident. Il conserva ce statut de produit de luxe pendant l'ère romaine jusqu'à l'invention du soufflage, qui, facilitant la production manufacturière, suscita une énorme demande. À tel point que le verre devint usuel dans tout l'Empire romain.

Des siècles de dépendance

On a découvert récemment à quel point l'Occident antique dépendait de l'Orient pour l'approvisionnement en verre.

L'analyse chimique de nombreux verres romains retrouvés en Occident a montré que leur élaboration se faisait en deux phases, d'une part, la production du matériau brut dans des ateliers primaires localisés au Proche-Orient, et ensuite sa transformation en produits manufacturés dans des ateliers secondaires situés en Occident. Au cours de l'élaboration de leur verre, les stabilisants (chaux, alumine, magnésie...) étaient tous apportés par le sable ou par le natron. C'était le sable syro-palestinien qui convenait particulièrement bien à cause de sa teneur idéale en stabilisants, ce qui explique l'implantation des ateliers primaires de production de verre en Palestine. Nous le savons depuis que l'analyse chimique en laboratoire de nombreux verres romains trouvés en Occident a établi qu'ils ont tous été produits avec du sable issu de la côte syro-palestinienne, ce même sable dont les auteurs anciens vantaient la qualité.

Quant à l'autre ingrédient antique du verre, le natron, il s'agit d'un minéral naturel produit par l'évaporation de mares riches en sodium. Il est composé de carbonate de sodium



1. Ce bloc de verre brut (page ci-contre) se trouvait à bord d'un navire romain, qui coula près de l'île des Embiez au large de Toulon à la fin du II^e siècle. Incapables de produire la matière première, les verriers romains la faisaient venir du Proche-Orient, et la refondaient afin de produire divers objets usuels, telle cette amphore à décor moucheté du I^{er} siècle trouvée à Carpenedolo près de Brescia (ci-contre à droite).



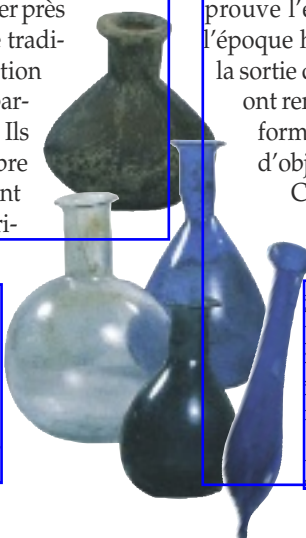
Hervé Alfonsi / ARASO

2. L'un des plongeurs de l'Association pour la recherche archéologique sous-marine, en Corse, remonte un bloc de verre brut trouvé dans une épave d'époque hellénistique (III^e siècle avant notre ère) échouée dans la passe des Sanguinaires à l'entrée du golfe d'Ajaccio. Une demi-tonne de verre brut en lingots atteste de l'ancienneté du trafic de verre brut de l'Orient vers l'Occident.

hydraté ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ainsi que d'une roche évaporitique (produit par l'évaporation d'une mare chargée en sédiments) contenant du carbonate de sodium (NaCO_3) et surtout du bicarbonate de sodium (NaHCO_3). À l'époque romaine, on le trouve essentiellement dans les lacs du Wadi Natrun entre Le Caire et Alexandrie et c'est presque exclusivement le natron d'Égypte qui est utilisé.

Ainsi, pendant des siècles, les officines occidentales dépendent des centres de production orientaux, dépendance qui durera du III^e siècle avant notre ère à la fin du VII^e siècle ! Le verre que refondaient les artisans occidentaux provenait probablement en grande partie de Syrie-Palestine. Certes la région n'a pas encore livré d'atelier primaire d'époque impériale (à partir de la fin du I^{er} siècle avant notre ère), mais la découverte exceptionnelle de 17 fours primaires de la fin du VI^e ou du début du VII^e siècle, à Bet Eli'ezer près d'Hadera, en Israël, atteste d'une certaine tradition et permet de comprendre la fabrication du verre durant le I^{er} millénaire. Seules les parties inférieures des fours sont conservées. Ils étaient divisés en deux parties : la chambre de chauffe et la chambre de fusion. À l'avant sont placées deux chambres de chauffe tri-

3. Ces balsamaires trouvés à *Forum Julii* (actuelle Fréjus) contenaient des parfums. Au cours des premiers siècles de notre ère, de telles fioles furent produites par centaines de milliers, par exemple en Campanie dans la région du Vésuve, puis exportées dans tout l'Empire. Les Romains y mettaient leurs parfums, tant pour les cultes religieux que pour la toilette.



Service Municipal d'Archéologie - Fréjus

angulaires, tandis qu'une chambre de fusion rectangulaire (de deux mètres sur quatre) est située à l'arrière. Le sable et le natron devaient être déposés dans le bassin avant la fermeture de la voûte et avant l'allumage de feux dans les chambres de chauffe ; il fallait entretenir le feu pendant 10 à 15 jours. Cette durée de cuisson est encore celle qu'il faut aux actuels verriers traditionnels indiens, dont les procédés sont comparables à ceux des Romains. Le chauffage portait les matériaux à 1100 °C grâce au rayonnement des parois. Puis le verre produit au cours de la cuisson devait être refroidi rapidement à l'eau afin que ses composants ne recristallisent pas, au risque que le matériau ne perde son aspect homogène. Pour ce faire, les artisans démontaient la partie haute du four afin d'accéder à la dalle de verre de huit à neuf tonnes qui avait été produite à l'intérieur. Une fois refroidie, la dalle était attaquée à la masse afin d'obtenir des blocs transportables. Des installations similaires ont été découvertes en Israël, à Apollonia et à Bet She'arim. D'autres l'ont été en Égypte au cours des fouilles menées en 2005 dans le Wadi Natrun sous la direction de M.D. Nenna : il semble que dans certains fours à bassin, on produisait jusqu'à 16 tonnes de verre.

Longtemps, les énormes quantités de verre retrouvées à Pompéi et à Herculaneum en Campanie ont fait croire que des ateliers primaires existaient aussi dans la région du Vésuve. Cette possibilité semblait d'autant plus plausible que dans son *Histoire naturelle*, Pline l'Ancien évoque le sable blanc verrier du fleuve Volturne entre Cumes et Litterne : « On recueille un sable blanc très tendre ; on le broie au mortier et à la meule ; ensuite on y mêle trois parties de nitre... Cette masse est mise en fusion, et elle donne du verre pur et des pains de verre blanc. » Cependant, les analyses des fragments de verre brut retrouvés et celles des objets de verre découverts à Pompéi ne font que confirmer l'origine syro-palestinienne du verre brut.

Le commerce du verre

Cette organisation antique de la production du verre engendrait tout un commerce transméditerranéen, sur lequel nous renseignent les épaves découvertes dans la *Mare Nostrum*. Fouillée par Hervé Alfonsi et les membres de son équipe de l'Association pour la recherche archéologique sous-marine, en Corse, une épave du III^e siècle avant notre ère prouve l'exportation de verre d'Orient en Occident dès l'époque hellénistique. Dans la passe des Sanguinaires, à la sortie du golfe d'Ajaccio, les plongeurs de l'association ont remonté plus de 550 kilogrammes de verre, sous la forme de fragments de lingots, mais aussi de restes d'objets manufacturés (voir la figure 2). Au large de la Croatie, le naufrage d'un bateau au I^{er} siècle nous renseigne sur la nature des cargaisons de verre à l'époque romaine : outre les habituelles amphores, il contenait une centaine de kilogrammes de blocs de verre bleu-vert. Avec les siècles, le volume des échanges verriers entre l'Orient et l'Occident n'a cessé d'augmenter, ce que confirment les épaves des II^e et IV^e siècles. Fouillée en 2003 par Marie-Pierre Jézégou du Département des recherches archéologiques

subaquatiques et sous-marines du ministère de la Culture, l'épave des Embiez au large de Toulon contenait plusieurs tonnes de verre incolore dont les plus gros blocs atteignent 25 kilogrammes. Transportée à la fin du II^e siècle ou au début du III^e siècle, la cargaison comprenait aussi du verre à vitre et de la vaisselle. On ignore encore sa provenance. Cette présence de verre à recycler n'est guère surprenante : étant donné la valeur du matériau transparent pendant l'Antiquité, le recyclage s'imposait, et les fouilles sous-marines révèlent régulièrement des cargaisons de verre à recycler. Ce fut par exemple le cas à Grado, dans le golfe de Trieste, où une épave trouvée au large de l'île contenait un tonneau rempli de tessons de verre destinés au recyclage. Le verre à vitre est un autre produit usuel des cargaisons. Dans la baie d'Ajaccio, près de Porticcio, l'équipe d'Hervé Alfonsi a retrouvé l'épave d'un navire de transport romain chargé de vitres. Elle a remonté plus de 3 000 fragments, soit une masse totale de 231 kilogrammes, correspondant à la fois à de la vaisselle et à des vitres. Le navire aurait contenu quelque 85 vitres d'une surface de 85 centimètres sur 35.

Toutefois, le commerce maritime du verre brut ne concernait pas seulement la Méditerranée, puisque le *Périple de la mer Érythrée*, un guide du voyageur de commerce du milieu du I^{er} siècle, indique que le verre brut transitait par les ports de la mer Rouge vers l'Indus et l'Inde. Une fois livré en Occident, le verre brut était refondu, puis mis en forme dans des ateliers secondaires. Longtemps, ceux-ci ont appliqué les techniques mises au point au Proche-Orient à l'époque hellénistique, voire avant : moulage sur noyaux d'argile (technique vite abandonnée) ou dans un moule (ouvert ou fermé). Il s'agit du savoir-faire d'un artisanat de luxe, où le matériau de base, onéreux, est travaillé à chaud ou à froid. Sont produits des verres mosaïqués (certains dorés) ou rubanés, des récipients de luxe, quelques sculptures, etc. Toutes ces réalisations représentent un faible volume : la production d'une industrie de luxe.

La situation change à partir de l'arrivée au pouvoir d'Auguste en 27. Le développement spectaculaire des ateliers verriers prouve que de la main-d'œuvre et surtout le savoir-faire de l'Orient ont été introduits. Ainsi, le Nord de la Péninsule, mais aussi Rome et la Campanie attirent nombre d'artisans orientaux comme en témoigne la présence de marchands nabatéens, juifs, héliopolitains et tyriens spécialisés dans le verre à Pouzzoles au Nord de Naples.

Que s'est-il passé ? Dans la vieille ville de Jérusalem, la fouille d'un atelier de ver-

rier contenant un récipient de toilette en verre soufflé et des monnaies d'Alexandre Jannaeus (roi juif ayant régné entre -105 et -78) suggère que le soufflage du verre a été inventé au Moyen-Orient au cours de la première moitié du I^{er} siècle avant notre ère. Cette hypothèse est corroborée par la découverte à Ein Gedi en Israël d'une bouteille soufflée dans un cimetière qui fut abandonné vers -31.

L'invention du soufflage

Quoi qu'il en soit, l'invention du soufflage est la plus grande découverte verrière depuis l'invention du... verre. Le nouveau procédé de soufflage permet de produire avec une canne de la vaisselle de verre beaucoup plus vite et avec moins de matière. C'est en Italie que cette invention va se perfectionner et faire passer l'art verrier du statut d'un artisanat de luxe à celui d'une production de masse. Les artisans exploitent toutes les possibilités, à tel point que les Anciens s'étonnent de la malléabilité du verre et de l'habileté avec laquelle les souffleurs le transforment : « J'aurais bien voulu montrer à Posidonius le verrier donnant au verre avec son souffle mille formes qu'une main pourtant habile aurait peine à reproduire », écrit par exemple Sénèque (-4 à 65) dans l'une de ses *Lettres à Lucilius* (XIV, 90, 29).

C'est en Italie que la production secondaire est la plus importante. Les auteurs anciens nous apprennent l'existence d'un *vicus vitrarius* (quartier verrier) à Rome. Strabon, par exemple, écrit dans sa *Géographie* (XVI, 2,25) que : « En effet, à Rome, il s'invente chaque jour, paraît-il, de nouvelles compositions, de nouveaux procédés pour colorer le verre, pour simplifier la fabrication et pour obtenir des verres transparents comme le cristal ; on peut y acheter un gobelet ou une petite coupe pour un chalque [une monnaie de bronze]. » Les auteurs anciens mentionnent aussi un *clivus vitrarius unguentarius* (quartier des verriers et parfumeurs) à Pouzzoles, où les verriers fournissent aux nombreux parfumeurs campaniens de quoi conditionner leurs parfums. D'autres spécialités existaient probablement à Aquilée, en Lombardie actuelle, au Piémont et au Tessin actuels, puisque les traces d'énormes productions ver-

rières y ont été retrouvées.

Des ateliers secondaires sont aussi implantés dans d'autres parties de l'Empire, notamment en Gaule et en Germanie, en pays helvète, en Espagne et en Grande-Bretagne. Besançon par exemple vient de livrer un complexe artisanal construit en bordure du Doubs, où fonctionnaient sept fours circulaires et deux

4. Cette cruche bleue à décor de cabochons blancs illustre la mode des récipients bleus décorés à chaud, par exemple en collant à la surface des morceaux de fils de verre blancs.



quadrangulaires. L'industrie verrière romaine était aussi très présente dans la capitale des Gaules, Lyon, où, en 1965 et 1966, puis en 2000-2001, quatre implantations différentes d'ateliers verriers ont été retrouvées. Ils datent du I^{er} siècle de notre ère. Deux siècles plus tard, un corps d'artisans verriers travaillait toujours dans la ville comme en atteste l'épithaphe de Julius Alexander, un « Lyonnais » mort au III^e siècle : « Aux dieux Manes et à la mémoire éternelle de Julius Alexander, africain de naissance, citoyen de Carthage, homme excellent, artisan verrier, mort à l'âge de 75 ans, cinq mois et treize jours, après 48 ans de mariage en parfait accord avec sa femme... »

L'étude des fours verriers retrouvés à Lyon nous a livré de nombreuses informations. Le plus souvent, le four est circulaire, d'un diamètre interne variant de 0,50 à 1,18 mètre, et construit en briques et en tuiles. L'alandier, c'est-à-dire l'accès pour alimenter en bois et retirer les cendres, peut être un simple passage situé au même niveau que le foyer. Au-dessus de ce dernier, les matières vitreuses sont refondues dans une chambre de fusion avant d'être prélevées du bout de la canne. Un des fours lyonnais de manufacture est équipé d'une arche de recuit, c'est-à-dire d'un lieu où l'on laissait les verres refroidir lentement pour éviter qu'ils ne se brisent.

Que produit-on ? Alors qu'au début du I^{er} siècle, la vaisselle moulée monochrome ou polychrome domine encore les modèles souvent inspirés de la céramique ou du métal, la mode change progressivement au profit du verre bleu-vert, surtout pour la vaisselle courante. À partir du I^{er} siècle, on

voit apparaître des pièces plus raffinées en verre incolore de belle qualité parfois ornées d'un décor gravé de facettes. Désormais le verre fait partie du quotidien et n'est plus un produit de luxe comme aux époques antérieures.

Verre et parfum : un vieux couple

Ainsi voit-on apparaître une multitude de petits balmes, petits flacons destinés à contenir des parfums. On sait que les parfums jouent un rôle important dans la vie quotidienne et religieuse des Anciens. La Campanie avec Pompéi, Capoue et Pouzzoles étaient célèbres pour leurs parfums à la rose et les verriers sont installés à côté des parfumeurs. Le verre est le contenant idéal pour le parfum, car il est lisse, brillant, transparent et étanche. Il remplace les céramiques à parfums et donne des flacons sphériques ou allongés, de petite ou moyenne contenance, faciles à fabriquer. On trouve aussi des récipients sphériques, souvent ornés de filets en spirale, en forme d'oiseaux, dont certains conservent encore des traces de poudre ou de fard, et de très nombreux petits flacons dotés de cols cylindriques, de panses allongées et de lèvres évasées, arrondies ou coupées.

Le service en verre s'impose aussi progressivement sur la table des Romains aux côtés de la vaisselle céramique et métallique. On voit surgir tout un vaisselier formé de gobelets, bols, assiettes, coupes, coupelles, cruches, bouteilles, amphores, mais aussi des formes plus raffinées pour les banquets comme le rhyton (corne à boire), le calice ou le *skyphos* (verre à boire à deux anses). Les peintres de Pompéi et d'Herculanum témoignent de cet engouement pour ce matériau transparent avec des natures mortes présentant des coupes profondes remplies de fruits divers (pêches, abricots, coings, raisins), de légumes ou de vin. Dans la seconde moitié du I^{er} siècle, on voit apparaître des vases destinés au stockage des denrées et au transport : ce sont des pots sphériques ou ovoïdes avec ou sans anses, souvent réutilisés comme urnes cinéraires. On trouve aussi quantité de récipients à panse cylindrique ou carrée, à parois épaisses et solides. En témoignent ces bords carrés retrouvés dans une caisse en bois de la Maison de Ménandre à Pompéi. Ces formes sont exécutées par soufflage dans un moule, procédé apparu vers la fin du I^{er} siècle. Le moule peut être en pierre, en terre cuite ou en plâtre. D'autres pièces au décor moulé plus soigné sont aussi fabriquées : gobelet ou bouteille à décor végétal, à décor d'amandes, en forme de tête, de fruit (datte-raisin), etc.

Les verriers ont aussi recours à une multitude de procédés pour orner les vases. Ils les décorent à chaud de fils appliqués dessinant divers motifs, de pastilles, d'éléments préfabriqués (masques, coquillages, rosettes, médaillons) ou pratiquent des dépressions avec un outil. Ils créent des décors mouchetés en roulant la paraison sur le marbre parsemé de grains de verre coloré (voir la figure 4) ou des décors marbrés en mélangeant des verres colorés pour évoquer le jaspe ou l'albâtre. Et que dire du verre camée (constitué d'une double couche de verre), une spécialité italienne illustrée par le célèbre Vase bleu découvert à Pompéi en 1837. Les artisans décorent aussi le verre à froid à l'or ou en le peignant, et ils le gravent à main levée ou à



Pierre Petitier

5. Ces fours mis au jour à Lyon sont typiques des installations des verriers d'époque romaine : circulaires, ils sont construits en briques et en tuiles.



6. Une bouteille, de la vaisselle et un vase à anses du I^{er} siècle illustrent le type d'ustensiles que de nombreux Romains ont commencé à utiliser quotidiennement après que l'invention du soufflage a fait du verre un matériau courant. Ainsi, les verriers ont multiplié les formes de bou-

teilles, les plus courantes étant rectangulaires ou cylindriques, et les plus luxueuses pouvant avoir une forme animale (poisson) ou celle d'une plante. Matériau courant, le verre restait néanmoins cher : on estime que la vaisselle de verre s'achetait au prix de celle d'argent.

l'aide de petites meules pour obtenir tantôt de simples motifs géométriques, tantôt des représentations figurées élaborées.

Un autre usage du verre apparaît au I^{er} siècle avec l'emploi massif du verre à vitre. Les architectes romains ont compris l'intérêt de la transparence du verre pour faire pénétrer la lumière dans les édifices publics et privés, et les auteurs anciens l'ont bien perçu comme un signe de modernité. Ainsi, au I^{er} siècle, Sénèque oppose-t-il la rusticité des thermes de la villa de Scipion à peine éclairés au luxe des bains modernes. Le verre est aussi utilisé pour la composition de mosaïques en tessères de verre (petits cubes irréguliers de différentes couleurs) comme celles qui décorent les nymphées de certaines villas de Pompéi.

Cette production est impressionnante, mais nous ignorons tout de ceux à qui on la devait : les verriers. Qui étaient-ils ? Seuls quelques noms apposés sur des flacons soufflés dans un moule, ou imprimés sur des anses ou des médaillons nous renseignent sur les noms de ces ouvriers souvent d'origine syro-palestinienne, tels Ennion, Jason, Aristéas, Meges, Neikais ou Artas, mais qui pouvaient être aussi... « bourgeois », tel Amaranthus.

Ainsi, durant les deux premiers siècles de l'Empire, on assiste à une diffusion de l'artisanat verrier dans des régions qui auparavant n'en avaient aucune connaissance. Le soufflage du verre va permettre d'augmenter et d'accélérer la production. Le répertoire des formes s'enrichit peu à peu comme on le constate par exemple pour le service de table et dans les cités vésuviennes. On a pu dire que la vaisselle en verre avait pris la place de la céramique fine, même si cette situation n'est sans doute pas applicable à

tout l'Empire (voir la figure 6). La créativité des verriers se développe encore tout au long des III^e et IV^e siècles, et les productions tendent à s'individualiser à travers certaines formes ou décors spécifiques. Ainsi Cologne et son atelier des « filets serpentants », Rome et les verres gravés ou à « fond d'or », la Syrie et sa spécialité de flacons compte-gouttes, ou encore l'Égypte et ses verres peints ou gravés du IV^e siècle. À partir du V^e siècle, la verrerie de luxe disparaît et le répertoire des formes s'appauvrit ainsi que la qualité du verre. Dans le Nord de l'Europe, le verre devient un matériau rare et luxueux. Sur les bords de la Méditerranée, il continue à être utilisé dans la vie de tous les jours et la transition vers les productions du haut Moyen Âge se fait progressivement.

Véronique ARVEILLER, en charge de la collection de verres antiques au Département des antiquités grecques, étrusques et romaines du musée du Louvre, est aussi conseillère scientifique de l'exposition *Le verre dans l'Empire romain*, qui se tiendra jusqu'à la fin du mois d'août 2006 à la Cité des Sciences et de l'Industrie, à Paris.

F. SLITINE, *Histoire du verre : l'Antiquité*, Paris, Massin, 2005.

V. ARVEILLER-DULONG et M.D. NENNA, *Les verres antiques du musée du Louvre : vol. II : Vaisselle et contenants du I^{er} siècle au début du VII^e siècle après J.-C.*, Paris, Musée du Louvre éditions et Somogy, Éditions d'art, 2005.

D. FOY et M.D. NENNA, *Tout feu, tout sable : mille ans de verre antique dans le Midi de la France*, Marseille, 2001 [exposition au musée d'Histoire de Marseille], Aix-en-Provence, Edisud, 2001.

M.D. NENNA, *La Route du verre : ateliers primaires et secondaires de verriers du second millénaire av. J.-C. au Moyen Âge*, Travaux de la Maison de l'Orient, n° 33, Lyon, 2000.

Pour oublier la maladie

On comprend mieux les processus moléculaires conduisant à cette maladie qui détruit la mémoire. Et les biologistes retrouvent l'espoir de vaincre un jour ce fléau redouté, synonyme de perte d'identité.

Michael Wolfe



d'Alzheimer

Le cerveau humain enregistre une grande variété d'expériences sensorielles, traite et stocke ces informations, puis les rappelle au bon moment : un ordinateur organique en somme ! Aussi, la maladie d'Alzheimer a été comparée à l'effacement d'un disque dur, commençant par les fichiers les plus récents et remontant dans le temps. Un signe précoce de la maladie est souvent l'oubli d'événements récents, telle une conversation téléphonique, la visite d'un réparateur, alors que le rappel de souvenirs plus anciens reste intact. La maladie progressant, ce sont cependant les mémoires tant à long terme qu'à court terme qui disparaissent progressivement, jusqu'à ce que la personne atteinte ne reconnaisse plus ses proches. La crainte devant la maladie d'Alzheimer n'est pas tant l'anticipation de douleurs et de souffrances physiques, mais la perte inexorable des souvenirs de toute une vie, qui constituent l'identité même d'une personne.

La comparaison avec l'ordinateur s'arrête là : on ne peut pas réinitialiser le cerveau humain et recharger les fichiers et les programmes. La maladie d'Alzheimer n'efface pas seulement les informations, elle détruit le support physique qui les stockait, le cerveau, constitué de 100 milliards de neurones reliés entre eux par 1 000 fois plus de connexions. La plupart des médicaments actuels contre la maladie d'Alzheimer sont fondés sur le fait qu'un grand nombre des neurones perdus libère de l'acétylcholine : ces médicaments bloquent une enzyme, l'acétylcholinestérase, responsable de la dégradation de ce neurotransmetteur, et en augmentent ainsi la durée de vie. Il en résulte une stimulation des neurones et une pensée plus claire, mais ces médicaments deviennent inefficaces après 6 à 12 mois, car ils ne préviennent pas la destruction des neurones. La mémantine ralentirait le déclin cognitif de certains malades en diminuant l'activité excessive d'un autre neurotransmetteur, le glutamate, mais on ignore encore si les effets du médicament durent plus d'un an.

Au début des années 1990, les perspectives de vaincre la maladie d'Alzheimer n'incitaient guère à l'optimisme. On en savait peu sur la biologie de la maladie et l'on pensait ses causes et son traitement désespérément complexes. Toutefois, ces dernières années, des progrès notables ont été accomplis dans la compréhension des événements moléculaires sous-jacents à la maladie. La plupart de ces avancées ont conduit à diverses stratégies dont on espère qu'elles ralentiront (voire supprimeront) ces mécanismes destructeurs. Ce sont ces pistes explorées aujourd'hui que nous détaillerons ici. Peut-être que l'un de ces traitements – ou une combinaison de plusieurs – sera suffisamment efficace pour traiter la maladie d'Alzheimer. Divers essais cliniques sont en cours et quelques résultats encourageants ont été obtenus. Ils ont redonné l'espoir de vaincre un jour la maladie d'Alzheimer.

1. La maladie d'Alzheimer détruit le « disque dur » du cerveau : les mémoires à court et à long termes s'effacent irrémédiablement.

tiront (voire supprimeront) ces mécanismes destructeurs. Ce sont ces pistes explorées aujourd'hui que nous détaillerons ici. Peut-être que l'un de ces traitements – ou une combinaison de plusieurs – sera suffisamment efficace pour traiter la maladie d'Alzheimer. Divers essais cliniques sont en cours et quelques résultats encourageants ont été obtenus. Ils ont redonné l'espoir de vaincre un jour la maladie d'Alzheimer.

Les deux caractéristiques principales de la maladie, identifiées pour la première fois par le neurologue allemand Aloïs Alzheimer au début du XX^e siècle, sont des plaques et des amas de protéines dans le cortex cérébral et les régions du mésencéphale, qui sont le siège des fonctions cognitives supérieures. Les plaques sont des dépôts situés à l'extérieur des neurones et constitués essentiellement d'une petite protéine nommée bêta-amyloïde. Quant aux amas, dits neurofibrillaires, ils sont présents dans les ramifications (les axones et les dendrites) des neurones : ils sont composés de filaments d'une protéine nommée tau. Ces dépôts ont longtemps été au cœur d'un débat : les plaques et les amas neurofibrillaires sont-ils la cause ou la conséquence de la dégénérescence des neurones ? Sont-ils de simples marqueurs des régions où la mort cérébrale s'est déjà produite ? Divers résultats obtenus depuis une dizaine d'années font pencher la balance en faveur de l'hypothèse de la cascade amyloïde, selon laquelle les deux protéines, bêta-amyloïde et tau, participent au déclenchement de la maladie d'Alzheimer, la protéine bêta-amyloïde étant la première à entrer en scène dans la chronologie de la maladie.

L'hypothèse de la protéine amyloïde

La protéine bêta-amyloïde est un petit peptide, isolé et caractérisé pour la première fois en 1984 par George Glenner et Cai'ne Wong, de l'Université de Californie, à San Diego. Ce peptide dérive d'une protéine plus grande, la protéine précurseur de la protéine bêta-amyloïde, enclavée dans la membrane (voir la figure 2). Deux protéases (des enzymes qui coupent les protéines), la bêta-sécrétase et la gamma-sécrétase, excisent la protéine bêta-amyloïde de la protéine précurseur, un processus qui se déroule normalement dans presque toutes les cellules du corps. On ignore pourquoi les cellules fabriquent la protéine bêta-amyloïde, mais des indices révèlent que le processus ferait partie d'une voie de signalisation. La maladie d'Alzheimer surviendrait quand la protéine bêta-amyloïde est produite en trop grande quantité ou bien sous la forme d'un peptide particulièrement prompt à s'agréger.

Une partie de la région bêta-amyloïde de la protéine précurseur est dans la membrane cellulaire. Les membranes étant constituées de lipides hydrophobes, les régions des protéines qui traversent les membranes contiennent souvent des acides aminés hydrophobes. Lorsque la protéine bêta-amyloïde est détachée de la protéine précurseur par les sécrétases et libérée dans le milieu aqueux extérieur, les régions hydrophobes des différentes molécules s'associent et conduisent à la formation de petits assemblages solubles, ceux-ci se réunissant ensuite en filaments insolubles.

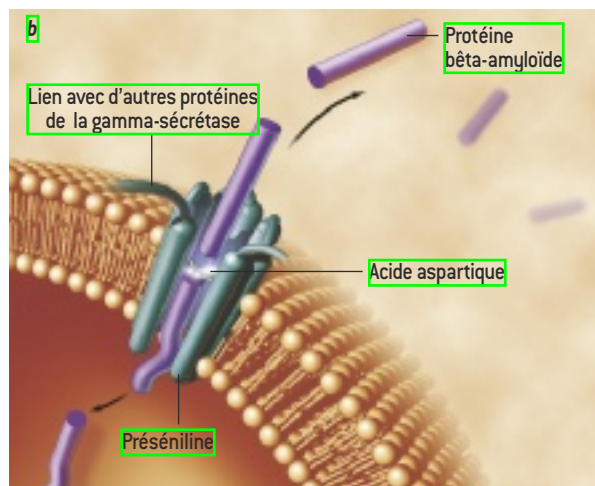
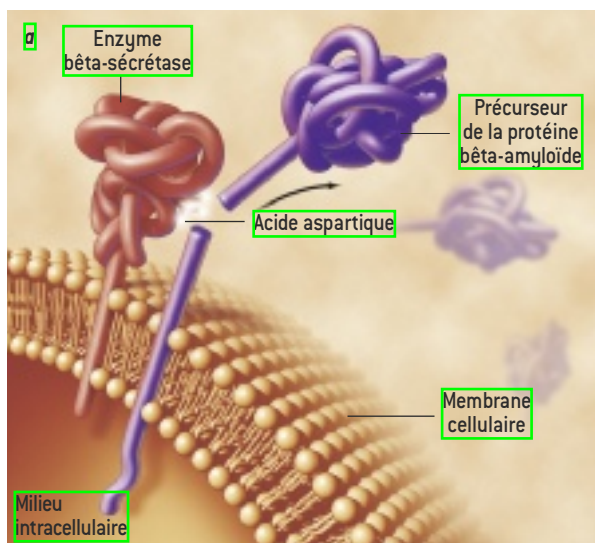
Au début des années 1990, on a montré qu'à des concentrations suffisamment élevées, les molécules de protéine bêta-amyloïde se réunissent, *in vitro*, en structures fibreuses semblables à celles trouvées dans les plaques caractéristiques de la maladie d'Alzheimer. Les assemblages solubles, ainsi que les fibres de protéine bêta-amyloïde sont toxiques

pour les neurones, du moins en culture, et les premiers interfèrent avec l'apprentissage et la mémoire chez les souris.

Ces résultats ont étayé l'hypothèse de la cascade amyloïde, mais l'indice le plus fort a été fourni par des études menées chez des familles où le risque de la maladie d'Alzheimer est accru. Des membres de ces familles sont porteurs de mutations génétiques rares qui les prédisent à la maladie à un âge relativement jeune, le plus souvent avant 60 ans. En 1991, on a découvert que de telles mutations sont situées sur le gène de la protéine précurseur de la protéine bêta-amyloïde, en particulier dans les régions qui codent la protéine bêta-amyloïde mature, et à proximité. Ces mutations augmentent la production soit de la protéine bêta-amyloïde normale, soit du variant qui forme facilement des dépôts. En outre, les trisomiques (leurs cellules sont dotées de trois exemplaires du chromosome 21 au lieu de deux) contractent inévitablement la maladie d'Alzheimer s'ils vivent jusqu'à 50 ans. Le chromosome 21 contenant le gène de la protéine précurseur de la protéine bêta-amyloïde, les trisomiques fabriquent plus de protéine bêta-amyloïde dès la naissance et l'on peut trouver des dépôts amyloïdes dans leur cerveau dès l'âge de 12 ans.

D'autres liens entre la maladie d'Alzheimer et les gènes qui participent à la production de la protéine bêta-amyloïde ont été mis au jour. En 1995, Peter St George-Hyslop et ses collègues de l'Université de Toronto ont identifié des mutations dans deux gènes, *Préséniline 1* et 2, responsables de formes précoces et fulgurantes de la maladie d'Alzheimer : elle apparaît le plus souvent vers la trentaine ou la quarantaine. D'autres études ont montré que ces mutations augmentent la quantité de la protéine bêta-amyloïde qui s'assemble en amas. Nous savons aujourd'hui que les protéines codées par les gènes *Préséniline* sont intégrées dans l'enzyme gamma-sécrétase.

Ainsi, parmi les trois gènes dont les mutations favorisent la maladie d'Alzheimer à un âge précoce, l'un code le précurseur de la protéine bêta-amyloïde et les deux autres des composants d'une enzyme qui contribue à la fabrication du peptide nocif. De plus, les porteurs d'un certain variant du gène codant l'apolipoprotéine E (une protéine qui favorise les assemblages de protéines bêta-amyloïde) ont un risque élevé d'être atteints de la maladie d'Alzheimer. Divers facteurs génétiques jouent probablement un rôle dans l'apparition de la maladie, chacun y contribuant pour une petite part, et des études menées chez la souris montrent que des facteurs environnementaux, tel l'exercice, peuvent aussi modifier la sensibilité des individus.

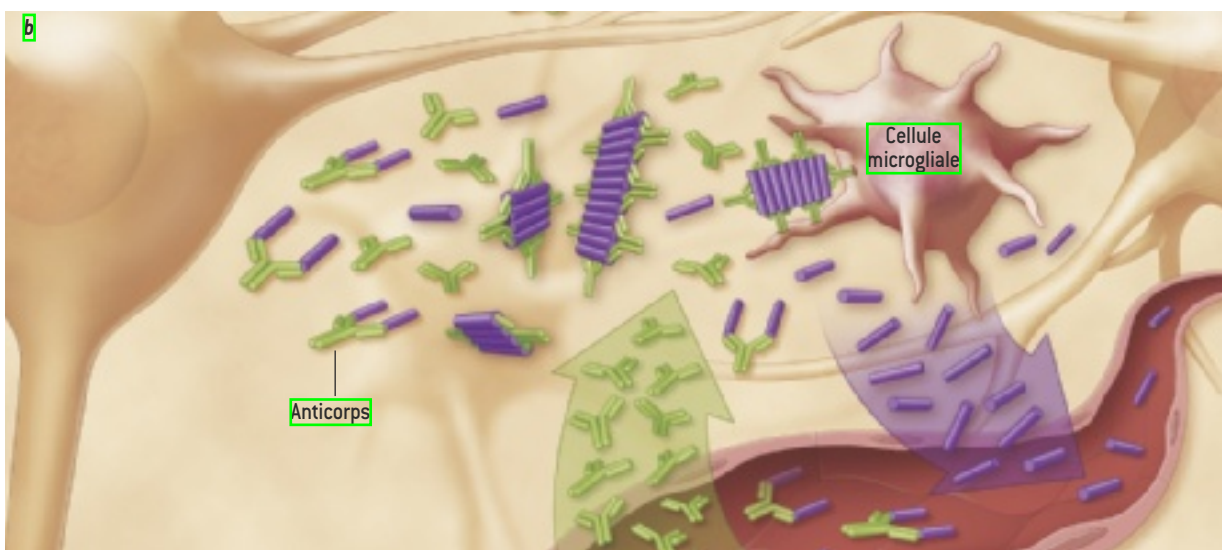
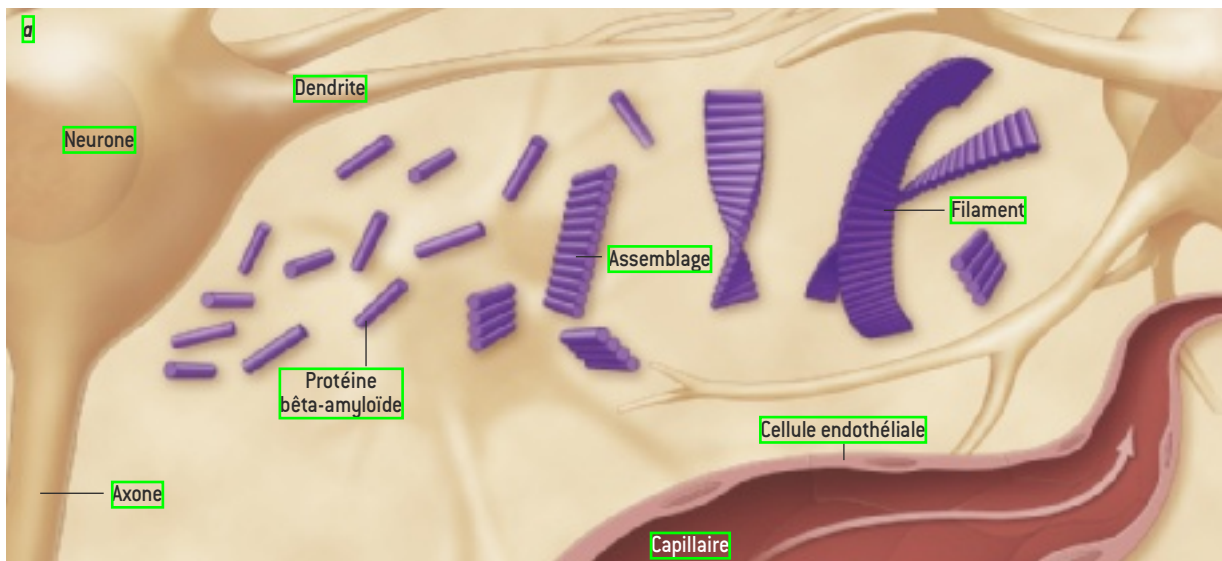


SAUL LOEB/CONTRASTO. TOULAS LES ILLUSTRATIONS SONT DE TAMI TOUBA

2. La cascade amyloïde est une hypothèse selon laquelle la maladie d'Alzheimer commence par la production excessive de protéine bêta-amyloïde (ou d'un variant qui s'agrège facilement) à partir de son précurseur (*en violet*) enchâssé dans la membrane. Lors de la première étape (*a*), une enzyme, nommée bêta-sécrétase (*en marron*), coupe la protéine précurseur de la protéine bêta-amyloïde à l'extérieur de la membrane, à l'aide de deux molécules d'acide aspartique. Ensuite, la protéine préséniline (*en vert*), un élément de la gamma-sécrétase, coupe le « moignon restant » à l'intérieur de la membrane, libérant ainsi la protéine bêta-amyloïde (*b*). Là encore, cette opération s'effectue grâce à deux molécules d'acide aspartique.

Les premiers ciseaux moléculaires

On ignore encore comment les assemblages solubles et les filaments insolubles de protéines bêta-amyloïde perturbent les neurones et les détruisent. Néanmoins, des indices montrent que les agrégats de protéines bêta-amyloïde en dehors des neurones déclencheraient une cascade d'événements conduisant notamment à l'altération des protéines tau à l'intérieur des cellules. Les agrégats de protéines bêta-amyloïde modifieraient l'activité d'enzymes, des kinases, qui ajoutent

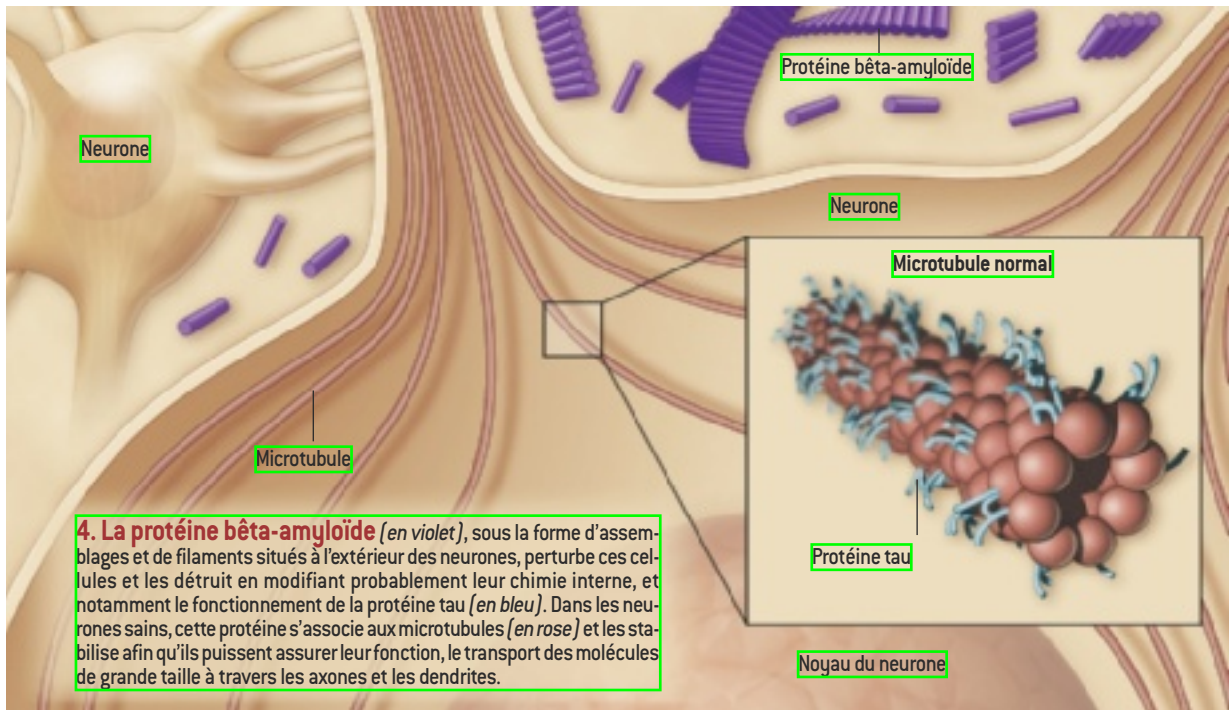


3. La protéine bêta-amyloïde (en violet) libérée dans le milieu extracellulaire constitue progressivement des assemblages solubles, puis de longs filaments insolubles [a] qui détruisent les neurones. Un traitement possible de la maladie d'Alzheimer serait une molécule qui ralentit, voire empêche, l'agrégation de la protéine bêta-amyloïde. Une approche prometteuse [b] consiste à introduire des anticorps (en vert) reconnaissant la protéine bêta-amyloïde. Ces anticorps, une fois dans

le cerveau [flèche verte], stimuleraient les cellules immunitaires du système nerveux central, les cellules de la microglie, à attaquer les agrégats de protéine bêta-amyloïde. Les anticorps n'ont peut-être pas besoin de pénétrer dans le cerveau : l'élimination de la protéine bêta-amyloïde dans le reste du corps [ici dans un vaisseau sanguin] obligerait le peptide à diffuser [flèche violette] des régions où il est abondant, le cerveau, vers celles où il est plus rare, car détruit.

des groupes phosphate aux protéines. Ici, les kinases ajouteraient trop de groupes phosphate aux protéines tau, altérant leurs propriétés chimiques : elles s'organiseraient en filaments torsadés, les amas neurofibrillaires. Les protéines tau modifiées détruisent les neurones, peut-être parce qu'elles ne remplissent plus leur rôle consistant à stabiliser les microtubules (voir la figure 4) qui transportent des protéines et d'autres molécules de grande taille à travers les axones et les dendrites. Des mutations dans le gène tau lui-même entraînent également la formation d'amas de protéines tau, source d'autres types de maladies dégénératives, différentes de la maladie d'Alzheimer (il n'y a pas de plaques amyloïdes). Ainsi, la formation d'amas neurofibrillaires de protéines tau serait un événement plus général conduisant à la mort des neurones, alors que la protéine bêta-amyloïde serait le déclencheur spécifique de la maladie d'Alzheimer.

Compte tenu du rôle essentiel de la protéine bêta-amyloïde dans le processus de la maladie, les protéases qui fabriquent ce peptide sont des cibles privilégiées pour d'éventuels médicaments. En outre, les inhibiteurs de protéases sont efficaces pour traiter d'autres maladies, telles que le SIDA et l'hypertension. La première étape de la formation de la protéine bêta-amyloïde est effectuée par la bêta-sécrétase, une protéase qui coupe la partie globuleuse de la protéine précurseur, juste à l'extérieur de la membrane. En 1999, cinq groupes différents ont découvert indépendamment cette enzyme, qui est particulièrement abondante dans les neurones du cerveau. Bien que la bêta-sécrétase soit insérée dans la membrane, elle ressemble beaucoup à plusieurs protéases trouvées, à l'état soluble, dans les milieux intra- et extracellulaires, dont celle nécessaire à la réplication du VIH. Ces enzymes sont des aspartylprotéases, c'est-à-dire qu'elles



utilisent de l'acide aspartique, un acide aminé, pour couper les protéines. Toutes les protéases utilisent de l'eau pour couper leurs protéines cibles et les aspartylprotéases mettent en jeu deux molécules d'acide aspartique pour activer une molécule d'eau et effectuer l'hydrolyse.

La bêta-sécrétase appartenant à cette famille, les biologistes ont exploité les nombreuses connaissances relatives à ces protéases afin d'en comprendre les mécanismes détaillés et la façon dont on peut les bloquer. Les cristallographes ont élucidé la structure tridimensionnelle de la bêta-sécrétase qui a été utilisée comme guide pour la conception informatisée d'inhibiteurs. Des études révèlent que le blocage de l'activité de l'enzyme n'aura pas d'effets secondaires nocifs : l'élimination du gène codant la bêta-sécrétase chez la souris supprime la formation de la protéine bêta-amyloïde dans le cerveau des rongeurs sans entraîner de conséquences négatives apparentes. Toutefois, les inhibiteurs de la bêta-sécrétase ne sont pas encore prêts pour les essais cliniques.

Le principal défi à relever est la conception de molécules efficaces suffisamment petites pour franchir la barrière hémato-encéphalique et pénétrer dans le cerveau. En effet, à l'inverse des vaisseaux sanguins des autres parties de l'organisme, les capillaires du cerveau sont tapissés de cellules endothéliales serrées. En l'absence d'espaces entre ces cellules, les inhibiteurs de la protéase doivent traverser les cellules pour atteindre les tissus cérébraux, ce dont la plupart des molécules de grande taille sont incapables.

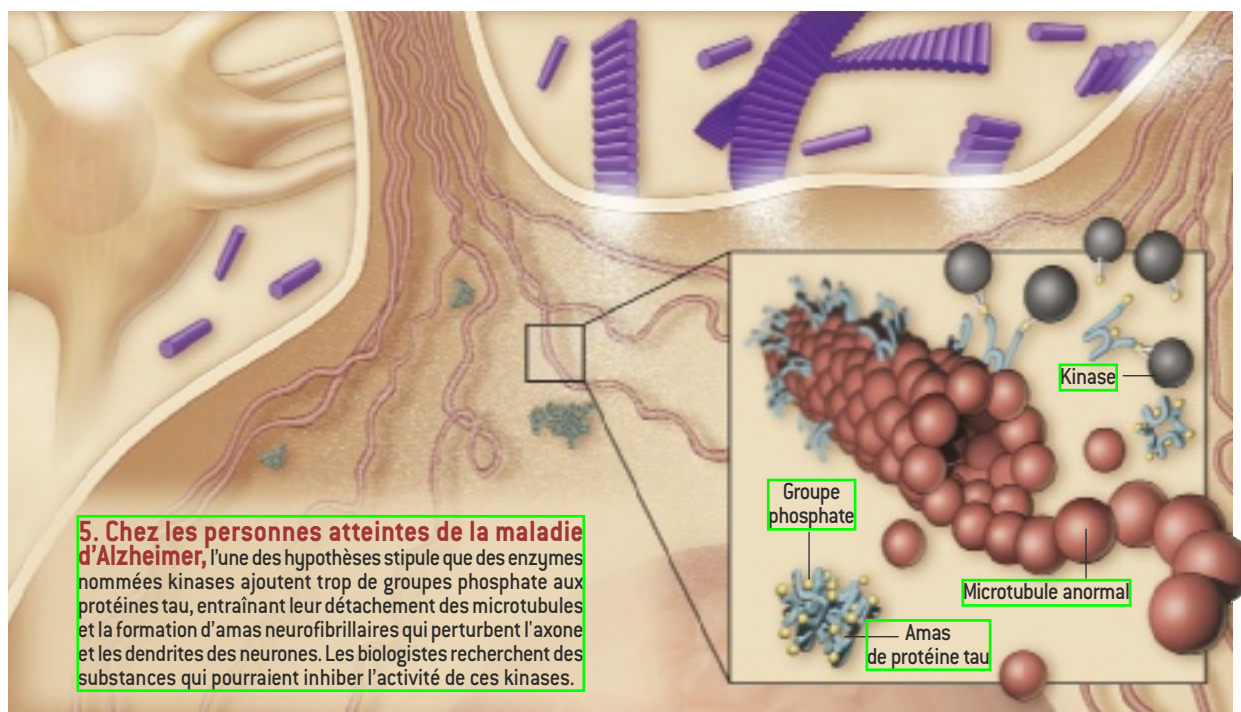
La gamma-sécrétase est l'enzyme qui accomplit la seconde étape de la formation de la protéine bêta-amyloïde : elle coupe le « moignon » de la protéine précurseur après le clivage par la bêta-sécrétase. La gamma-sécrétase effectue cette opération en utilisant de l'eau bien qu'elle soit dans un environnement normalement hydrophobe, la membrane cellulaire. Deux indices importants ont été essentiels pour

comprendre cette protéase. D'abord, l'élimination des gènes *Préséniline* chez la souris supprime le découpage de la protéine précurseur de la protéine bêta-amyloïde par la gamma-sécrétase, confirmant que la protéine codée par ces gènes est indispensable au fonctionnement de l'enzyme. Ensuite, nous avons montré que des composés apparentés aux inhibiteurs classiques des aspartylprotéases pouvaient bloquer le découpage de la protéine précurseur par la gamma-sécrétase dans les cellules. La gamma-sécrétase, comme la bêta-sécrétase, a donc aussi recours à une paire de molécules d'acide aspartique pour accomplir sa fonction.

Seconds ciseaux moléculaires

Nous avons proposé que la préséniline soit une aspartyl-protéase inhabituelle insérée dans la membrane cellulaire. Peu après, nous avons identifié deux acides aspartiques dans la préséniline dont nous avons montré qu'ils sont tous deux indispensables au clivage par la gamma-sécrétase aboutissant à la protéine bêta-amyloïde. Ensuite, nous-mêmes et d'autres équipes avons mis en évidence que les inhibiteurs de la gamma-sécrétase s'associent à la préséniline et que trois autres protéines insérées dans la membrane sont recrutées par la préséniline pour qu'elle puisse exercer son action catalytique. Aujourd'hui, la gamma-sécrétase est reconnue comme le prototype d'une nouvelle classe de protéases, qui utiliseraient de l'eau à l'intérieur des membranes cellulaires pour remplir leur rôle. Enfin, les inhibiteurs de la gamma-sécrétase sont des molécules plutôt petites qui traversent les membranes : elles ne sont pas retenues par la barrière hémato-encéphalique.

Le blocage des enzymes qui fabriquent la protéine amyloïde est une piste que nous explorons pour mettre au point de nouveaux médicaments contre la maladie d'Alzheimer.



Cependant, que se passera-t-il si ces enzymes jouent un rôle normal essentiel? Le problème est réel: les possibilités que la gamma-sécrétase offre en tant que cible thérapeutique sont tempérées par le fait que cette enzyme joue un rôle crucial dans la différenciation cellulaire, par exemple, celle des cellules souches de la moelle osseuse en plaquettes sanguines et en lymphocytes. La gamma-sécrétase coupe spécifiquement une protéine de surface, le récepteur Notch, dont la partie détachée de la membrane et libérée à l'intérieur de la cellule envoie un signal au noyau qui contrôle le destin de la cellule. Des doses élevées d'inhibiteurs de la gamma-sécrétase ont des effets toxiques chez la souris, dus à la perturbation du signal Notch. Néanmoins, un médicament candidat développé par la Société Eli Lilly a passé les tests de sécurité chez des volontaires sains. Le composé est désormais prêt pour les essais cliniques de phase II, chez des patients atteints de la maladie d'Alzheimer. En outre, des biologistes ont identifié des molécules qui contrôlent la gamma-sécrétase de façon à bloquer la production de la protéine bêta-amyloïde sans perturber le clivage de Notch. Ces molécules n'interagissent pas avec les molécules d'acide aspartique de la gamma-sécrétase, mais se lient à un autre endroit de l'enzyme et modifient sa forme.

D'autres inhibiteurs diminuent la fabrication de la version de la protéine bêta-amyloïde qui s'agrège facilement, et seul un peptide plus court et moins toxique est libéré. L'un de ces médicaments, le flurizan, s'est révélé prometteur chez des patients au premier stade de la maladie d'Alzheimer et est aujourd'hui en phase III d'essais cliniques qui incluront au total plus de 1000 personnes.

Une autre stratégie pour combattre la maladie d'Alzheimer consiste à débarrasser le cerveau des assemblages toxiques de la protéine bêta-amyloïde. L'une des méthodes est l'immunisation active, où le propre système immuni-

taire du malade est sollicité pour attaquer la protéine bêta-amyloïde. En 1999, Dale Schenk et ses collègues de la Société Elan Pharmaceuticals montrèrent que l'injection de protéine bêta-amyloïde dans la circulation sanguine de souris génétiquement modifiées pour développer des plaques amyloïdes déclenche une réaction immunitaire empêchant les plaques de se former dans le cerveau de jeunes souris, et élimine les plaques déjà présentes chez des souris plus âgées. Les souris produisent des anticorps qui reconnaissent la protéine bêta-amyloïde et stimulent les cellules immunitaires du cerveau, les cellules de la microglie, lesquelles attaquent les agrégats de peptide (voir la figure 3). Ces résultats obtenus chez la souris ont conduit à des essais chez l'être humain.

Supprimer les plaques amyloïdes

Malheureusement, bien que l'injection de protéine bêta-amyloïde ait passé les tests de sécurité, plusieurs malades à un stade plus avancé ont développé lors des essais de phase II une encéphalite (une inflammation du cerveau) entraînant un arrêt prématuré de l'étude en 2002. Des travaux complémentaires ont indiqué que le traitement pourrait avoir causé l'inflammation en incitant les lymphocytes T à attaquer la protéine bêta-amyloïde dans les vaisseaux sanguins du cerveau. Néanmoins, de nombreux malades produisent des anticorps contre la protéine bêta-amyloïde et, lorsque c'est le cas, leur mémoire, leur attention et leur concentration s'améliorent.

Les inquiétudes relatives à l'immunisation active ont amené certains biologistes à se tourner vers l'immunisation passive, qui vise à éliminer le peptide en injectant aux malades des anticorps produits par des cellules hybrides

créées par fusion de cellules humaines et murines. Ces anticorps, génétiquement conçus pour éviter le rejet par l'organisme humain, ne devraient pas causer d'encéphalites, parce qu'ils ne devraient pas déclencher de réaction immunitaire nocive dans les vaisseaux sanguins. Un traitement par immunisation passive est aujourd'hui au stade d'essais cliniques de phase II.

Que ce soit pour l'immunité active ou passive, on ignore encore comment les anticorps traversent la barrière hémato-encéphalique, ni même s'ils le font. En effet, des résultats récents indiquent que la pénétration dans le cerveau pourrait être superflue : l'absorption de la protéine bêta-amyloïde dans le reste du corps peut entraîner un exode du peptide hors du cerveau, car les molécules migrent spontanément des régions où elles sont en grande quantité vers celles où elles sont moins nombreuses.

Bien que l'immunisation passive semble tenir la plupart de ses promesses, l'immunisation active n'est pas hors course. Des études préliminaires montrent que l'immunisation à partir de certaines parties de la protéine bêta-amyloïde au lieu du peptide entier favoriserait la production d'anticorps par les lymphocytes B du système immunitaire, sans stimuler les lymphocytes T responsables de l'encéphalite.

D'autres biologistes étudient des stratégies non immunitaires pour empêcher l'agrégation de la protéine bêta-amyloïde. Plusieurs équipes ont identifié des composés qui interagissent directement avec la protéine bêta-amyloïde pour maintenir le peptide à l'état dissous dans le liquide extracellulaire, empêchant ainsi la formation d'agrégats nocifs. C'est le cas de l'alzhemed, une petite molécule qui imite l'héparine, un anticoagulant qui empêche les plaquettes de s'assembler en caillots. En effet, lorsque l'héparine se lie à la protéine bêta-amyloïde, elle favorise la formation de dépôts de peptide. L'alzhemed, en occupant les sites de liaison de l'héparine sur la protéine bêta-amyloïde, l'empêche d'agir et réduit l'agrégation du peptide. Le composé est quasi dépourvu de toxicité même à haute dose, et le traitement améliore les fonctions cognitives des malades atteints d'une forme modérée de la maladie d'Alzheimer. Les essais cliniques de phase III sont déjà en cours.

Haro sur la protéine tau

Les plaques amyloïdes ne sont pas les seules responsables de la maladie d'Alzheimer. Les autres, les amas neurofibrillaires de protéine tau, constituent aussi une cible prometteuse pour empêcher la dégénérescence des neurones du cerveau. Les biologistes s'intéressent notamment à des inhibiteurs qui bloqueraient les kinases plaçant un nombre excessif de groupes phosphate sur la protéine tau (voir la figure 5). Ces efforts n'ont pas encore débouché sur des médicaments candidats, mais de telles molécules, si elles voyaient le jour, renforceraient l'action des substances qui ciblent la protéine bêta-amyloïde.

Les chercheurs étudient également les médicaments hypocholestérolémiants nommés statines, couramment utilisés pour diminuer le risque de maladies cardio-vasculaires. Ces molécules seraient aussi utiles pour le traitement de la maladie d'Alzheimer, car des études épidémiologiques ont montré que les personnes prenant des statines ont un

risque significativement plus faible de développer la maladie d'Alzheimer. Cette corrélation est encore mal comprise : en abaissant les quantités de cholestérol sanguin, ces médicaments réduiraient la production de protéine précurseur de la protéine bêta-amyloïde, ou bien inhiberaient l'activité des sécrétases en cause dans la fabrication de protéine bêta-amyloïde. Des essais de phase III testent l'efficacité des statines contre la maladie d'Alzheimer.

Les promesses de la thérapie cellulaire

Un autre champ d'investigation récent est celui de la thérapie cellulaire. Mark Tuzynski et ses collègues de l'Université de San Diego ont prélevé des biopsies de peau sur des patients peu atteints et ont inséré dans ces cellules le gène codant le facteur de croissance du tissu nerveux, le NGF. Les cellules ainsi génétiquement modifiées ont ensuite été placées chirurgicalement dans le cerveau antérieur de ces malades afin qu'elles y sécrètent du NGF et empêchent la perte de neurones cholinergiques. La thérapie cellulaire est une stratégie ingénieuse, car elle permet d'administrer le NGF, une protéine de grande taille et insoluble, c'est-à-dire incapable de passer la barrière hémato-encéphalique. Cette étude, bien qu'effectuée sur un petit nombre de sujets, a montré un ralentissement notable du déclin cognitif chez les malades. D'autres essais cliniques sont en cours.

Même si certaines des pistes décrites ici ne tiendront pas leurs promesses, les biologistes espèrent trouver au moins un composé capable de ralentir ou d'arrêter efficacement la perte progressive de neurones dans le cerveau. Une telle molécule ouvrirait la voie à une médecine régénérative restaurant les fonctions mentales perdues. Cependant, la difficulté réside dans la détermination du moment où la maladie a dépassé le point de non-retour, quand tout traitement est voué à l'échec.

Les traitements visant la protéine bêta-amyloïde peuvent bloquer l'apparition de la maladie d'Alzheimer ou la retarder au stade précoce de son évolution, mais on ignore si cette stratégie pourra traiter ou guérir les patients à des stades plus avancés de la maladie. Les biologistes ont néanmoins de bonnes raisons d'afficher un optimisme prudent. Les récentes découvertes ont convaincu bon nombre d'entre eux que la maladie d'Alzheimer n'est pas invincible.

Michael WOLFE est professeur de neurologie à l'École de médecine de l'Université de Harvard.

A. KORNILOVA et al., *Deducing the transmembrane domain organization of presenilin-1 in gamma-secretase by cysteine disulfide cross-linking*, in *Biochemistry*, vol. 45(24), pp. 7598-7604, 2006.

V. LAZAROV et al., *Electron microscopic structure of purified, active gamma-secretase reveals an aqueous intramembrane chamber and two pores*, in *PNAS*, vol. 103(18), pp. 6889-6894, 2006.

P. FRAERING et al., *gamma-Secretase substrate selectivity can be modulated directly via interaction with a nucleotide-binding site*, in *J. Biol. Chem.* vol. 280(51), pp. 41987-41996, 2005.

M. WOLFE, *Therapeutic strategies for Alzheimer's disease*, in *Nat. Rev. Drug. Discov.*, vol. 1(11), pp. 859-866, 2002.

■ POUR LA SCIENCE

Offre spéciale été !
15 numéros pour 54€ seulement
soit 3 mois de lecture offerts !*



***Offre Valable jusqu'au 25 Août 2006**

ABONNEMENT

à retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements - Pour La Science
8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06

☐ **Oui, Je m'abonne à Pour La Science pour 1 an (12 N°)**
et je reçois en cadeau trois numéros supplémentaires,
pour 54€ seulement ! au lieu de 95,65€.**

**Prix de vente au numéro

Mes Coordonnées (à remplir) :

Nom, Prénom : _____
Adresse : _____

Code Postal : _____
Ville : _____
Pays : _____
E-mail (facultatif) : _____

Je règle par :

☐ Chèque ci-joint à l'ordre de Pour La Science

☐ Carte bancaire
Numéro de la carte

** _____ Date d'expiration _____

Signature obligatoire

PLS15MO

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de Pour La Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffit de nous prévenir par simple courrier.

**Inscrire les trois derniers chiffres de la série de 7 figurant au dos de votre carte dans la bande où figure votre signature.

Locomotion : une même loi

La course, le vol et la nage correspondent à des mouvements et à des organismes très différents. Pourtant, certaines lois communes, explicables par un principe physique d'optimisation, les caractérisent.

Adrian Bejan • James Marden

Stephen Jay Gould, l'un des grands paléontologues et biologistes de l'évolution du XX^e siècle, affirmait que si l'on pouvait remonter l'horloge de la vie jusqu'à ses débuts et si on laissait l'évolution se dérouler à nouveau sur la même durée, les animaux qui en résulteraient seraient très différents de ceux connus aujourd'hui. Gould soulignait ainsi l'importance du hasard dans la sélection des organismes qui survivent et évoluent. Il avait probablement raison, mais on peut tout de même se demander s'il n'existe pas quelques règles générales et constantes auxquelles se conforment les organismes vivants. Il en est ainsi pour la locomotion des animaux : qu'ils nagent, courent ou volent, il est possible de dégager des lois quantitatives communes aux différents modes de locomotion et indépendantes de l'espèce considérée. Qui plus est, ces lois peuvent s'expliquer sur la base d'une idée unificatrice. C'est ce que nous montrerons dans cet article.

Les principaux modes de locomotion que sont la course, la nage et le vol diffèrent par nombre de caractéristiques. Les animaux qui courent ou qui volent sont soumis à leur

poids, tandis que celui des animaux nageurs est compensé par l'action porteuse de l'eau, c'est-à-dire par la poussée d'Archimède. Les ailes des oiseaux, les pattes des antilopes et les nageoires des poissons ont des structures différentes. Les battements d'ailes des oiseaux ne ressemblent pas aux foulées des animaux coureurs ni aux ondulations du corps d'un poisson. En régime de croisière, les oiseaux et les poissons sont à altitude et profondeur constantes, tandis que le corps des coureurs monte et descend alternativement (leur trajectoire est cycloïdale dans un plan vertical). Le choc sur le sol lors de la course diffère beaucoup du frottement avec l'air et l'eau lors du vol et de la nage. Et pour compliquer les choses, une forme de locomotion donnée correspond à des tailles corporelles, des anatomies et des vitesses très diverses ; le vol, par exemple, concerne des oiseaux aussi bien que des insectes et des mammifères (les chauves-souris).

Malgré toutes ces différences, de nombreux chercheurs ont noté d'intrigantes convergences. On constate que la fréquence de foulée des vertébrés coureurs est, *grosso modo*, proportionnelle à l'inverse de leur masse corporelle M élevée à la puissance $1/6$, c'est-à-dire proportionnelle à $M^{-1/6}$; or la fréquence de nage des poissons est aussi





Jim Zipp/Photo Researchers, Inc.

proportionnelle à $M^{-1/6}$. De même, la vitesse des animaux coureurs est approximativement proportionnelle à $M^{1/6}$, tout comme celle des oiseaux qui volent. Et la force par unité de masse déployée par les muscles des animaux coureurs, nageurs ou volants reste remarquablement proche de 60 newtons par kilogramme. D'autres corrélations analogues ont été constatées à travers plusieurs groupes zoologiques, par exemple entre la taille du corps et le rythme de respiration, ou entre la taille et les pertes de chaleur par le corps.

Des lois d'échelle à expliquer

Pour tenter d'expliquer de telles lois – des lois dites d'échelle –, approximativement valables pour tout un ensemble d'organismes, les biophysiciens se sont concentrés sur des contraintes éventuellement communes, telles que la vitesse de contraction des muscles ou les efforts maximaux supportables par la structure corporelle. La plupart de leurs analyses étaient fondées sur des relations empiriques, partant des observations pour trouver un modèle qui corresponde aux résultats. Peut-on adopter une démarche différente, qui se fonde sur un principe théorique unique afin de déduire et prédire des grandeurs diverses telles des vitesses maximales de déplacement, des fréquences de foulée ou de battement d'ailes ?

Nos travaux indiquent que oui. À certains égards, les systèmes naturels et les machines conçues par les ingénieurs relèvent d'une même problématique. Qu'il s'agisse d'un animal, d'un bâtiment ou d'une machine, l'un des principaux objectifs du système est d'optimiser ses performances par rapport à l'énergie investie. Des exemples d'une telle optimisation sont la forme cylindrique des tuyaux, la structure arborescente des cours d'eau d'un bassin fluvial (voir la figure 2), la structure arborescente des poumons ou de la circulation sanguine, ou celle des surfaces boueuses qui craquent en séchant.

Toutes ces architectures optimisent le débit des fluides en écoulement, en minimisant la résistance rencontrée. Ainsi, le bassin hydrographique d'un fleuve se modifie au cours du temps de façon que l'eau atteigne l'embouchure en rencontrant de moins en moins de résistance. Ce principe d'optimisation des écoulements peut-il se généraliser et s'appliquer à d'autres systèmes naturels, qu'ils soient inanimés ou vivants ? Telle est l'idée de la théorie dite constructale, proposée dès 1996 par l'un d'entre nous (A. Bejan). Exprimée de façon

1. Avec le vol, la course et la nage, la nature semble avoir développé trois formes très différentes de locomotion. Cependant, en invoquant un principe d'optimisation – selon lequel la masse d'un animal parcourt la plus grande distance possible pour une dépense d'énergie utile donnée –, il est possible de dégager des lois approximatives communes aux trois modes de locomotion, lois qui avaient aussi été établies empiriquement.

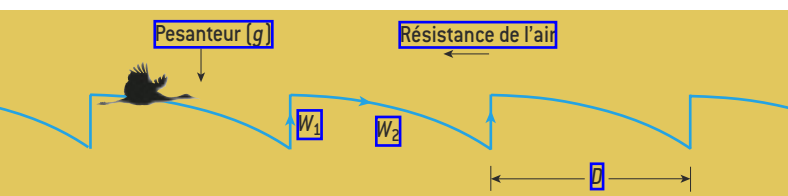


Pete Atkinson/Alamy

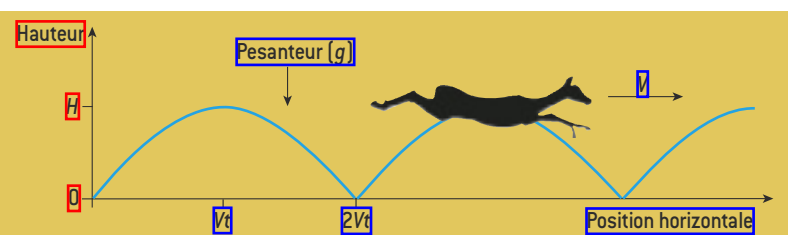


WASH. LANSSET Project Science Office et USGS National Center for EROS

2. Selon la « théorie constructale » proposée par A. Bejan depuis 1996, pour qu'un système de taille finie persiste dans le temps, il doit évoluer de façon à fournir un accès de plus en plus aisé aux courants qui le traversent. Cette optimisation se traduit dans de nombreux systèmes par l'adoption d'une structure arborescente, comme dans le cas d'un réseau hydrographique (ici le delta du fleuve Lena, en Russie, vu par satellite et en fausses couleurs).



3. En vol de croisière, un oiseau décrit une trajectoire approximativement en dents de scie où chaque segment vertical correspond à un coup d'ailes qui fait regagner l'altitude perdue. Il s'agit alors d'évaluer, en fonction de la vitesse et de la masse de l'oiseau, le travail $W_1 + W_2$ effectué par l'animal pour voler sur chaque cycle de longueur D , W_1 étant la dépense d'énergie pour le mouvement vertical et W_2 la dépense d'énergie pour vaincre la résistance de l'air sur une distance horizontale D . Cela fait, on peut calculer, en fonction de la masse de l'oiseau, la vitesse optimale qui minimise la dépense d'énergie totale. Dans ces calculs, on utilise notamment le fait que la hauteur de chute dans chaque cycle est du même ordre que la dimension linéaire de l'animal.



4. Le centre de masse d'un animal qui court s'élève et s'abaisse alternativement d'une hauteur H dans un plan vertical. La longueur de chaque foulée est un multiple du produit de la vitesse V de l'animal par la durée t de la chute sur la hauteur H . Cette durée t est, à un facteur proche de un près, égale à la racine carrée de H/g où g est l'accélération de la pesanteur. Mises bout à bout, des relations de ce type permettent d'exprimer l'énergie dépensée en fonction de la masse de l'animal et de sa vitesse, d'où l'on déduit une relation entre la vitesse optimale (qui minimise l'énergie dépensée) et la masse.

concise, cette théorie stipule que, pour qu'un système de taille finie perdure, il doit évoluer de façon à fournir un accès de plus en plus aisé aux flux qui y circulent.

Malgré son apparente simplicité, cette idée se révèle puissante et pourrait s'appliquer avec profit dans de nombreux domaines, notamment en biologie. En particulier, on peut considérer la locomotion comme un déplacement de masse d'un point à un autre, c'est-à-dire comme un flux. Les animaux se déplacent de diverses façons et à des fins différentes. Cependant, au cours de l'évolution, la plupart d'entre eux ont probablement adopté des trajectoires et des rythmes qui leur permettent de déplacer leur masse en maximisant la distance parcourue par rapport à l'énergie dépensée. En d'autres termes, le système de locomotion des animaux devrait optimiser la distance parcourue pour un coût énergétique donné.

En appliquant un tel principe d'optimisation à la question de la locomotion, on ne part pas des contraintes comme dans l'approche habituellement suivie, mais des objectifs généraux de la structuration – ce qui n'exclut pas la prise en compte d'autres hypothèses, telles les contraintes communes aux différents organismes. Notre démarche constructale est en mesure de prédire, d'expliquer et d'organiser un ensemble croissant de connaissances empiriques, en réunissant dans un même cadre théorique les vitesses de croisière, les fréquences et les forces impliquées dans la course, la nage et le vol.

Soulignons qu'il ne s'agit pas de rendre compte de façon précise de toutes les formes offertes par la diversité biologique, mais seulement de déterminer des tendances centrales et approximatives que devraient suivre des animaux d'espèces et de tailles diverses. Des facteurs écologiques particuliers peuvent conduire à s'écarter de ces tendances, par exemple en favorisant des espèces plutôt immobiles là où l'énergie est abondante et où le risque d'être capturé par des prédateurs actifs est élevé.

Dépenser le minimum d'énergie

Examinons pour commencer le cas du vol. L'énergie utile dépensée par un oiseau en vol se compose de deux parties. Il y a d'abord une perte d'énergie verticale : le corps ayant un poids, il tend à chuter, et l'oiseau doit effectuer un travail pour se maintenir à son altitude de croisière. Il y a aussi une perte horizontale, car l'oiseau déploie de l'énergie pour surmonter la résistance de l'air et avancer horizontalement. Ces deux dépenses d'énergie sont nécessaires au vol de l'animal et ne peuvent être éliminées. Cependant, leurs parts relatives peuvent être ajustées afin que l'énergie totale dépensée soit minimale.

Un oiseau qui vole n'effectue pas un mouvement à altitude constante. Sa trajectoire ressemble plutôt à une ligne en dents de scie, la taille de ces dents de scie étant déterminée par le battement des ailes (voir la figure 3). Pour minimiser l'énergie investie, le travail nécessaire pour conserver l'altitude et le travail nécessaire à la progression horizontale doivent s'ajuster de façon à ce que leur somme soit minimale. Cela permet de calculer une vitesse optimale. On montre en effet que le travail vertical et le travail horizontal se comportent de façon inverse vis-à-vis de la vitesse : alors que le

travail vertical décroît quand la vitesse augmente, l'énergie horizontale croît. L'énergie totale investie atteint donc un minimum pour une certaine valeur de la vitesse, qui correspond aussi à une certaine fréquence de coups d'ailes.

Les calculs fondés sur ces considérations prédisent que la vitesse de vol devrait être proportionnelle à la masse corporelle élevée à la puissance $1/6$, et la fréquence de battement d'ailes devrait être proportionnelle à la masse corporelle élevée à la puissance $-1/6$. Les résultats de ces calculs, qui prédisent aussi la valeur approximative des constantes multiplicatives, sont en assez bon accord avec les observations recueillies sur l'ensemble des animaux ou engins volants (voir la figure 6).

Pour obtenir ces relations, il nous a fallu examiner avec soin les relations de proportionnalité entre diverses grandeurs et faire de l'analyse dimensionnelle, c'est-à-dire établir des relations entre grandeurs de même dimension (masses, longueurs, énergies, etc.). De plus, par souci de simplification, nous avons assimilé à l'unité toute constante multiplicative dont l'ordre de grandeur est 1 (autrement dit, on considère que toute constante valant entre 0,1 et 10 est approximativement égale à 1).

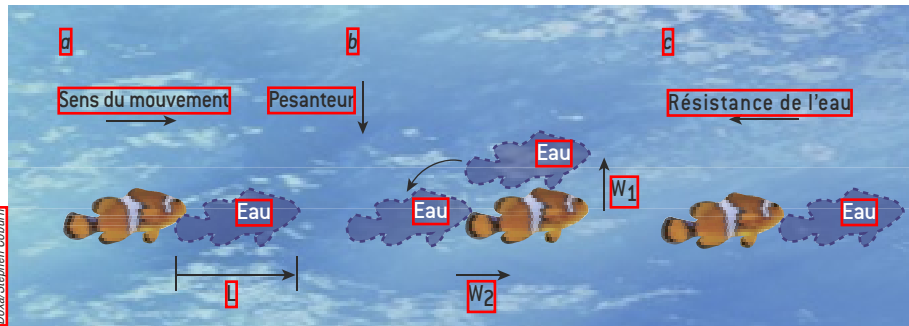
Pour donner une idée des méthodes employées, considérons la minimisation de l'énergie dépensée en un cycle de battement d'ailes, rapportée à la distance horizontale parcourue D . Cette distance est égale à la vitesse V multipliée par la durée T de vol ; or cette durée T est égale à la racine carrée de la hauteur de chute H du corps sous l'effet de la gravité, divisée par l'accélération de la pesanteur g (à un facteur constant près, qui vaut à peu près un). Par ailleurs, la hauteur H est également la hauteur acquise par l'animal en un coup d'ailes et est à peu près égale à l'envergure L des ailes. Cette taille L est elle-même approximativement égale à la puissance $1/3$ du volume de l'animal, c'est-à-dire à la masse du corps divisée par sa densité puis élevée à la puissance $1/3$. En effectuant toutes ces substitutions et en considérant que la densité corporelle vaut approximativement un gramme par centimètre cube pour toutes les espèces, on trouve pour l'énergie MgH dépensée pour regagner la hauteur H , et rapportée à la distance parcourue D , une expression où les seules quantités variables sont la vitesse V et la masse M .

Des raisonnements du même type permettent d'exprimer l'énergie dépensée pour avancer horizontalement et vaincre la résistance de l'air sur la distance D . On obtient ainsi l'énergie totale dépensée exprimée en fonction de V et de M , et il s'agit alors de trouver la valeur de la vitesse V (en fonction de la masse M) qui minimise cette énergie. C'est ainsi que nous avons établi que la vitesse optimale est proportionnelle à la masse corporelle, la seule grandeur non constante, élevée à la puissance $1/6$. On peut montrer de façon analogue que la force nette produite par un animal pour voler à la vitesse optimale est un multiple (le double environ) de son poids, un résultat en très bon accord avec les données d'observation (voir l'encadré page 72).

Des résultats robustes

En traitant la course de façon similaire, nous pouvons également prédire les relations auxquelles obéissent les vitesses et fréquences de foulée. La course est une succession de cycles faisant chacun intervenir deux dépenses d'énergie (voir la figure 4). L'une sert à soulever le corps à une hauteur correspondant approximativement à la longueur des membres. Ce travail est de l'énergie perdue, car quand le corps retombe, l'énergie potentielle acquise lors de la montée se dissipe presque entièrement dans les jambes et dans le sol. La seconde dépense d'énergie est liée au déplacement horizontal : un travail est effectué pour compenser les frottements avec le sol, avec l'air ambiant et à l'intérieur du corps (pour simplifier, nous négligeons cette friction interne, mal connue qui plus est).

En réalisant des calculs similaires à ceux utilisés pour le vol, on trouve que la course est à nouveau caractérisée par une vitesse proportionnelle à $M^{1/6}$ et une fréquence de foulée proportionnelle à $M^{-1/6}$, où M est la masse de l'animal. Les prédictions relatives à la course sont robustes, que la dépense d'énergie horizontale soit dominée par des frottements secs sur une surface dure, par la déformation permanente d'un sol mou comme du sable, de la boue ou de la neige, ou bien par la résistance de l'air. Tous ces effets jouent sur la vitesse et la fréquence, mais à peu près de la même façon. Si la résistance de l'air est le facteur dominant dans les pertes d'énergie associées au mouvement horizontal, la vitesse et la fréquence ne s'écartent que de dix pour cent des valeurs qu'elles

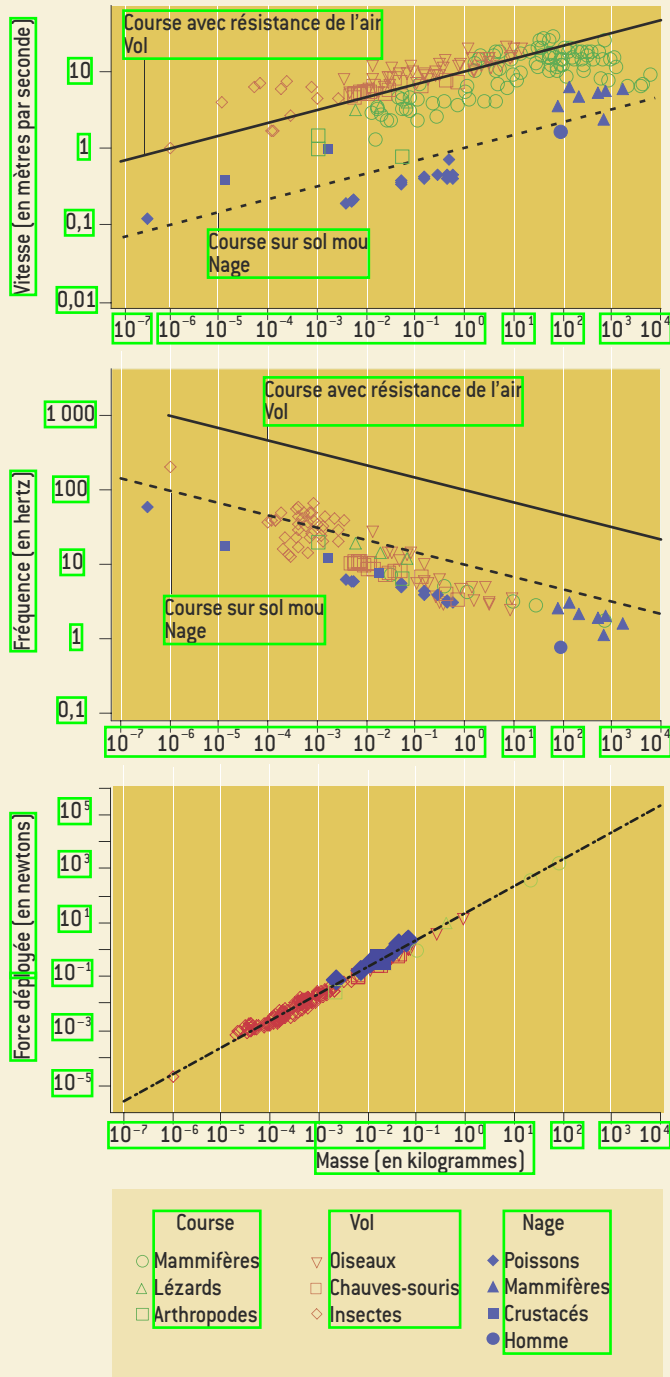


5. Pour avancer, un poisson doit écarter l'eau de son passage. Or *in fine*, la seule direction dans laquelle l'eau peut aller est vers le haut, où se trouve la seule surface libre de se déformer. Ce déplacement net d'eau vers le haut est perceptible lorsque le poisson nage à faible profondeur (voir la photographie). Pour se déplacer de la longueur de son corps, un poisson de masse M doit déplacer une masse d'eau M' correspondant au même volume (a). Tout se passe comme si cette masse d'eau était sou-

levée pour se retrouver au-dessus du poisson, avant de redescendre et d'occuper l'espace libéré par l'animal qui a avancé (b). Puis un nouveau cycle commence (c). Le travail W_1 nécessaire pour soulever la masse d'eau est approximativement égal au produit de la masse M par la taille L du poisson et par l'accélération g de la pesanteur. En même temps, le poisson doit effectuer un travail W_2 pour se déplacer horizontalement ; ce travail est le produit de la force de résistance de l'eau par la distance parcourue L .

Prévisions et observations

Les données empiriques sur la locomotion des animaux sont en bon accord avec les prévisions théoriques fondées sur l'optimisation de l'énergie dépensée. Les trois graphiques ci-dessous indiquent comment, pour divers animaux et en fonction de leur masse, se comportent la vitesse, la fréquence de battement d'ailes ou de foulée, et la force déployée. Les droites figurant sur ces graphiques à échelle logarithmique représentent les prévisions théoriques et correspondent à une loi d'échelle (la grandeur en ordonnée est égale à une certaine puissance de la masse, multipliée par un coefficient constant; la pente de la droite correspond à l'exposant de la loi d'échelle, et son intersection avec l'axe des ordonnées indique le coefficient).



auraient pour des coureurs soumis principalement aux frottements avec un sol dur ou avec un sol mou déformable.

Une autre surprise nous est venue en calculant le travail fourni pour soulever le corps du sol. Comme dans le cas du vol, nous avons trouvé que la force moyenne exercée au cours du cycle de foulée devrait être égale au double du poids de l'animal. Un résultat en accord avec les mesures force-masse pour toutes les tailles d'animaux, qu'ils volent ou qu'ils courent (voir l'encadré ci-contre). Ainsi, notre démarche fondée sur l'optimisation de la dépense d'énergie conduit à la conclusion que la course et le vol obéissent à des relations semblables.

Qu'en est-il de la nage ? S'apparente-t-elle à la course et au vol ? La réponse qui paraît évidente est non, parce que les poissons semblent échapper à la gravité, en raison de la poussée d'Archimède exercée par le liquide environnant. La course n'est pourtant pas radicalement différente de la nage ou du vol. En dépit du fait qu'un oiseau ou un poisson ne touche pas le sol, celui-ci soutient en fin de compte le poids de tous les corps situés au-dessus. Sans lui, aucun mouvement ne serait possible.

Un poisson déplace son corps relativement au fond immobile de l'étendue d'eau. Il effectue un travail pour contrer la gravité et les frottements, exactement comme un oiseau ou une antilope. Pour avancer horizontalement sur une distance égale à la longueur de son corps, un animal immergé doit fournir un travail équivalent à celui qu'il faut pour soulever un volume d'eau de sa propre taille à une hauteur approximativement égale à la dimension de son corps (voir la figure 5). Pourquoi cette eau est-elle soulevée et non juste chassée sur les côtés ? Parce qu'un déplacement vertical net est le seul moyen pour l'eau de s'écouler autour d'un animal ou d'un objet évoluant dans une rivière, un lac ou une mer : l'eau étant incompressible et le fond étant solide et immobile, seule la surface libre de l'eau est déformable. Cela s'observe facilement sous la forme de la lame d'étrave qui se soulève à l'avant d'un corps immergé se déplaçant près de la surface de l'eau ; mais ce travail vertical était auparavant considéré comme négligeable, alors qu'il est fondamental dans la physique de la nage, à quelque profondeur que ce soit.

Le nageur soulève de l'eau

Pourquoi ne voyons-nous pas la déformation de la surface libre produite par chaque poisson qui soulève de l'eau lors de sa progression horizontale ? Parce que la plupart des poissons sont petits et nagent en profondeur. Le volume d'eau soulevée se répartit sur une surface d'autant plus grande que le poisson nage en profondeur, et la déformation de la surface libre est généralement imperceptible. On remarque cependant le soulèvement de la surface lorsqu'un gros poisson nage à proximité de la surface. L'élévation de la surface de l'eau a également été mise en évidence et utilisée en marine de guerre, certains systèmes de radars étant capables de détecter le passage d'un sous-marin en mesurant la variation de hauteur de l'eau.

Ainsi, même si certains animaux ne sont pas directement en contact avec le sol, ce support solide leur est nécessaire pour se mouvoir. Les battements d'ailes de l'oiseau engendrent des tourbillons d'air qui finissent par atteindre le sol et y augmentent la pression. Le déplacement d'eau dû à

un poisson en train de nager élève localement la surface libre et accroît la pression au fond du lac. Le sol soutient tout ce qui se déplace et il y réagit mécaniquement, quel que soit le milieu dans lequel l'animal évolue.

Compte tenu de ces considérations, on peut refaire pour la nage le même type de calculs d'optimisation que ceux réalisés pour la course ou pour le vol. Les prédictions obtenues concernant la vitesse de déplacement et la fréquence des mouvements natatoires sont les mêmes que celles relatives à la course sur sol déformable, et elles sont en accord avec de nombreuses données.

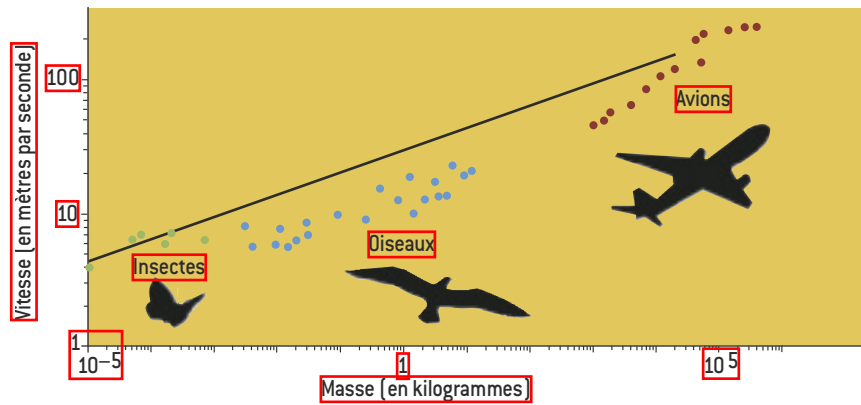
Tous les exposants qui apparaissent dans les lois d'échelle que nous avons obtenues en fonction de la masse reposent sur une hypothèse de similitude géométrique : nous caractérisons la taille d'un animal par une seule longueur, ce qui revient à supposer que l'animal est approximativement de forme sphérique. Cependant, des écarts petits mais statistiquement significatifs à cette hypothèse semblent être la règle plutôt que l'exception. C'est en particulier le cas pour les ailes des oiseaux : les gros oiseaux ont des ailes relativement plus longues que ne l'impliquerait une simple proportionnalité (longueur proportionnelle à la puissance $1/3$ de la masse), et la loi d'échelle décrivant la fréquence de battement d'ailes en fonction de la masse de l'animal devrait être caractérisée par un exposant inférieur à la valeur $-1/6$ prédite par notre modèle.

Locomotion : une théorie unifiée ?

En général, les exposants des lois d'échelle empiriques varient selon les espèces échantillonnées, selon les différences des proportions corporelles, selon la méthodologie utilisée, selon les hypothèses statistiques adoptées. Bien que les valeurs des exposants de nos lois d'échelle théoriques ne soient pas étayées statistiquement à tous les niveaux, ces valeurs correspondent assez bien aux données, à un facteur dix près. C'est un résultat remarquable sachant que l'analyse dimensionnelle à la base de nos calculs assimile à 1 les constantes multiplicatives comprises entre 0,1 et 10, et que nous ne faisons intervenir que des grandeurs telles que la densité, l'accélération de la pesanteur et la masse, sans aucune constante à ajuster.

Nous avons ainsi montré qu'une approche théorique de type thermodynamique, où une certaine grandeur (l'énergie dépensée) doit être minimisée, permet de mettre au jour quelques lois remarquables auxquelles se conforment les animaux. Il nous semble avoir fourni des arguments convaincants indiquant que si l'évolution devait repartir de zéro, et que si des animaux qui courent, volent ou nagent réapparaissaient, ces formes de locomotion obéiraient aux mêmes lois qu'aujourd'hui, alors même que les espèces concernées seraient probablement très différentes. On pourrait même appliquer ce modèle théorique pour prédire les caractéristiques de la locomotion sur d'autres planètes, où la pesanteur et la densité des environnements fluides sont différentes des nôtres.

Nous autres humains nous déplaçons souvent sur divers terrains, et nous ajustons notre vitesse et la fréquence de nos pas pour en tenir compte. Consciemment ou non, nous prêtons attention à l'efficacité de nos mouvements, et nous



6. La relation entre vitesse et masse prévue par les auteurs s'applique aussi bien aux animaux qu'aux machines. Dans ce graphique à échelle logarithmique, la droite correspond à la relation prévue théoriquement (vitesse proportionnelle à la puissance $1/6$ de la masse), tandis que les points (verts pour les insectes, bleus pour les oiseaux, rouges pour les avions) correspondent à des valeurs mesurées.

pourrions bien être programmés pour adopter des allures optimales. Quand les astronautes ont marché sur la Lune, ils se sont trouvés confrontés à une pesanteur bien différente de la pesanteur terrestre ; il serait intéressant de voir dans quelle mesure leur vitesse privilégiée et la fréquence de leurs bonds concordaient avec les prédictions de notre théorie.

Les prédictions de la théorie constructale sont valables non seulement pour les animaux, mais aussi pour les machines construites par l'homme. La relation entre force et masse des moteurs est la même que celle qui s'applique aux êtres qui courent, volent ou nagent. L'étude du vol animal par notre approche prédit également les vitesses des machines volantes, et fait ainsi le lien entre le vivant et l'inanimé.

De telles analyses théoriques aideraient, par exemple, à concevoir des robots efficaces pour explorer d'autres planètes ou des environnements terrestres difficilement accessibles. Elles pourraient servir à concevoir tout nouveau système de locomotion, ou à améliorer ceux qui existent déjà. Par exemple, les pneus d'automobiles se déforment à chaque tour et entraînent des pertes d'énergie verticale, tout en subissant des pertes horizontales par frottement. Il serait intéressant de voir si la conception des pneus a déjà été optimisée, ou si de nouvelles améliorations sont envisageables. Sur un plan plus ludique, nos prédictions pourraient aider, dans le domaine de l'animation, à choisir les vitesses et la démarche de créatures telles que des dinosaures pour montrer avec « réalisme » à quoi ressemblerait, par exemple, une course-poursuite entre un tyrannosaure et un véhicule.

Nous remercions la revue *American Scientist* de nous avoir autorisés à publier cet article.

Adrian BEJAN est professeur de génie mécanique à l'Université Duke, à Durham, aux États-Unis. **James MARDEN** est professeur de biologie à l'Université d'État de Pennsylvanie, aux États-Unis.

A. BEJAN et J. H. MARDEN, *Unifying constructal theory for scale effects in running, swimming and flying*, in *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, pp. 238-248, 2006.

J. H. MARDEN, *Scaling of maximum net force output by motors used for locomotion*, in *J. Exp. Biol.*, vol. 208, pp. 1653-1664, 2005.

A. BEJAN et S. LORENTE, *La loi constructale*, L'Harmattan, 2005.

<http://www.constructal.org/>

Les ravages



des supervolcans

Tous les 100 000 ans en moyenne, des éruptions colossales dévastent tout sur des milliers de kilomètres à la ronde. De nouveaux indices minéralogiques aident les géologues à comprendre et à prévoir ces catastrophes.

Ilya Bindeman

Enfouis sous la Californie et le Wyoming, deux volcans en hibernation pourraient un jour se réveiller dans une fureur difficile à imaginer. S'ils entraient en activité, ils enseveliraient sans doute la moitié Ouest des États-Unis sous une couche de cendres de deux mètres d'épaisseur en quelques heures. Cela s'est déjà produit au moins à quatre reprises lors des deux derniers millions d'années. Ces volcans dévastateurs sont qualifiés de supervolcans.

L'éruption d'un supervolcan libère une énergie de l'ordre d'un milliard de tonnes de TNT, l'équivalent de celle dégagée par l'impact d'un astéroïde de plus de 300 mètres de diamètre sur Terre, et elle survient plus souvent – ce qui fait potentiellement d'une telle explosion l'une des catastrophes naturelles les plus dangereuses pour l'humanité. Outre une destruction immédiate due à la libération de cendres brûlantes, les supervolcans perturbent considérablement le climat global durant des années à cause des gaz qu'ils émettent.

Les géologues aimeraient comprendre ce qui déclenche l'explosion des supervolcans, pouvoir prédire leur réveil, et évaluer les conséquences d'un tel événement. L'analyse de cristaux microscopiques dans les dépôts de cendres d'anciennes éruptions a apporté récemment de nouveaux éléments de réponse. Associés à une amélioration de la surveillance des sites cataclysmiques potentiels, ces nouveaux indices confortent l'idée qu'il sera bientôt

1. L'explosion d'un supervolcan entraîne la formation d'un gigantesque anneau de cheminées éruptives qui vomissent des nuages de gaz et de cendres brûlants dévastant le paysage sur des dizaines de kilomètres à la ronde.

possible de repérer les signes précurseurs de la prochaine grande éruption. Des travaux en cours suggèrent cependant qu'à cause des rejets dans l'atmosphère, les mois qui suivraient une superéruption seraient plus critiques qu'on ne l'estimait auparavant.

La majeure partie des volcanologues s'accordent sur le fait que nous avons très peu de chances de vivre une explosion supervolcanique aujourd'hui. Ces éruptions catastrophiques ne surviennent que tous les 100 000 à 500 000 ans environ. Néanmoins, l'impact planétaire de ces événements a alerté les scientifiques depuis les années 1950.

L'une des premières découvertes des géologues, à la fin du XIX^e siècle, fut celle de gigantesques vallées circulaires – de 30 à 60 kilomètres de diamètre et de plusieurs kilomètres de profondeur – ressemblant en tout point aux caldeiras en forme de bol qui surmontent de nombreux volcans. Les caldeiras se forment lorsque la chambre magmatique (des roches en fusion) située sous une cheminée volcanique se vide et provoque l'effondrement du sol en surface. Ayant remarqué que ces vallées en forme de caldeiras se trouvent près de certains des plus grands dépôts de roches volcaniques formés d'un seul jet, les chercheurs en ont conclu qu'il s'agissait des vestiges de volcans plusieurs milliers de fois plus grands qu'un volcan tel que le célèbre mont Saint Helens, dans l'État de Washington. Les dimensions de ces caldeiras et le volume estimé de matériau rejeté indiquent également que les chambres magmatiques situées en profondeur devaient être monstrueuses.

Les phénomènes engendrant la chaleur nécessaire pour créer des chambres magmatiques aussi massives étant rares, les supervolcans sont eux-mêmes des formations géologiques peu répandues. Durant les deux derniers millions d'années, seules quatre régions ont connu des explosions qui ont libéré en une seule fois plus de 750 kilomètres cubes de débris : le parc national de Yellowstone, dans le Wyoming, la Long Valley, en Californie, le lac Toba, à Sumatra, et Taupo, en Nouvelle-Zélande. La recherche d'éruptions de tailles comparables se poursuit dans d'autres régions où la croûte continentale est suffisamment épaisse pour accueillir des chambres magmatiques géantes, notamment dans l'Ouest de l'Amérique du Sud et dans l'extrême Est de la Russie.

Au milieu des années 1970, des mécanismes susceptibles de créer de vastes chambres magmatiques ont été découverts. À l'aplomb de Yellowstone, la plaque tectonique nord-américaine se déplace au-dessus d'un panache de roche visqueuse remontant à travers le manteau (la couche de 2 900 kilomètres d'épaisseur située sous la mince croûte terrestre). Fonctionnant comme un colossal bec Bunsen, ce « point chaud » a fait fondre une part suffisamment importante de la croûte pour alimenter des éruptions catastrophiques durant les 16 derniers millions d'années. À Toba, l'origine de la chambre est différente. Cette région se trouve au-dessus d'une zone de subduction, où une plaque tectonique glisse sous une autre. Cette convergence produit un échauffement, principalement par le biais de la fusion partielle du manteau surplombant la plaque descendante.

Quelle que soit la source de chaleur, la pression régnant dans une chambre magmatique augmente à mesure que le magma s'accumule sous la masse de roche qui la surplombe. Une superéruption se produit lorsque le magma atteint

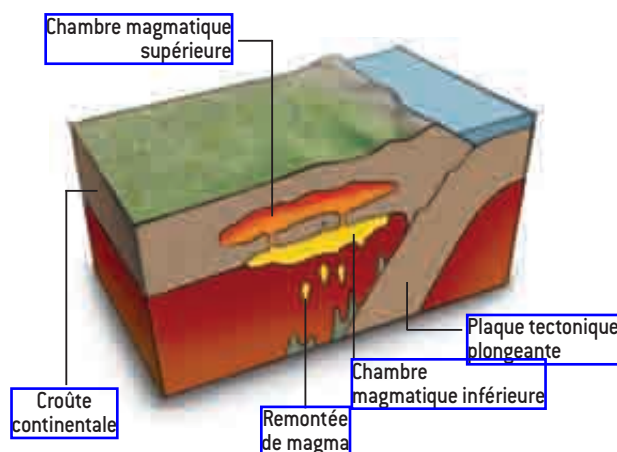
une pression telle qu'il soulève la roche qui l'emprisonne et crée des fractures verticales qui courent jusqu'à la surface. Le magma remonte le long de ces failles pour former un anneau de cheminées éruptives. Lorsque ces cheminées fusionnent les unes avec les autres, la portion de sol délimitée par cet anneau n'est plus portée, elle s'effondre alors d'un bloc ou comme un piston, soit par morceaux, dans ce qui reste du magma sous-jacent. Cet effondrement expulse violemment vers l'extérieur, par les bords de l'anneau, un surplus de laves et de gaz (voir l'encadré ci-dessous).

La signature des zircons

Des zones d'ombres entachaient néanmoins ce scénario. En particulier, les chercheurs se sont vite rendu compte que toutes les chambres magmatiques de grandes dimensions ne provoquent pas nécessairement une éruption catastrophique. Yellowstone, par exemple, abrite les caldeiras de trois des plus jeunes supervolcans du monde – formés il y a 2,1 millions d'années, 1,3 million d'années et 640 000 ans, l'un pratiquement au-dessus de l'autre –, mais entre ces événements explosifs, la chambre sous-jacente a libéré lentement et tranquillement des volumes de magma similaires. On ne sait toujours pas avec certitude pourquoi le magma s'écoule parfois lentement vers la surface.

L'examen de minuscules cristaux piégés dans la lave et les cendres rejetées à Yellowstone a offert un regard nou-

Les vastes chambres de magma en fusion qui alimentent les supervolcans se forment au-dessus de points chauds (des panaches de roches qui remontent des profondeurs



1. La chaleur dégagée par la descente de la plaque océanique fait fondre la roche du manteau, créant une remontée de magma qui vient s'accumuler à la base de la croûte continentale. Cette chambre magmatique inférieure agit comme un immense bec Bunsen qui fait fondre les parties de la croûte continentale dont le point de fusion est le moins élevé. Une partie du magma remonte aussi le long de conduits verticaux reliant les deux chambres.

veau sur le mécanisme de formation du magma. Durant des décennies, les géologues ont supposé que la chambre magmatique se comporte pendant des millions d'années comme un réservoir de roche liquéfiée, et qu'à chaque fois qu'une fraction de magma s'en échappe vers la surface, du fluide neuf remonte immédiatement d'en dessous pour remplir la chambre. Si cette vision était correcte, on devrait observer un nombre bien plus élevé d'éruptions catastrophiques, car il est mécaniquement et thermiquement impossible que des corps magmatiques monstrueux se maintiennent dans la croûte sans se vider fréquemment.

Cette idée reposait sur une technique dite « d'analyse globale des roches », qui permet d'obtenir un ensemble de mesures chimiques associé aux cendres collectées. Ces données révélaient les grandes lignes de l'évolution du magma, mais ne permettaient pas de déterminer l'âge du magma éjecté et la profondeur à laquelle il s'était formé.

Chaque fragment de roche est constitué de milliers de minuscules cristaux, chacun ayant une composition et une histoire propres. Aussi, lorsque des progrès techniques ont permis, à la fin des années 1980, d'analyser avec précision des cristaux individuels, ce fut comme si l'on pouvait lire les chapitres d'un livre plutôt que de se fier à la seule quatrième de couverture. Les chercheurs découvrirent par exemple que certains cristaux – et donc les magmas dans lesquels ils se sont initialement formés – apparaissent plus tôt que d'autres et que certains se for-

ment à de grandes profondeurs, tandis que d'autres se forment près de la surface.

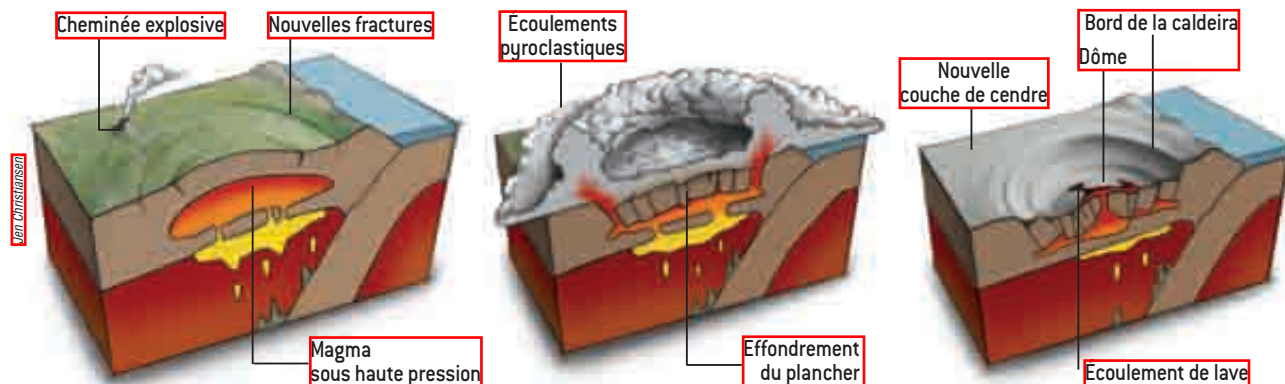
Au cours de ces dix dernières années, les géochimistes ont accordé une attention particulière à un cristal volcanique nommé zircon. Comme les zircons résistent à d'importantes variations de température et de pression sans que leur composition originelle soit affectée, plusieurs chercheurs, dont John Valley, de l'Université de Wisconsin-Madison, les ont utilisés pour étudier l'évolution initiale de la croûte terrestre. Quand j'ai intégré l'équipe de J. Valley, en 1998, nous avons reconstitué l'histoire du magma d'origine de Yellowstone par le biais des zircons, histoire qui a livré à son tour nombre d'indices sur le comportement à venir du volcan.

La première étape fut de mesurer les rapports des divers isotopes de l'oxygène dans les zircons issus de la dernière superéruption survenue à Yellowstone – il y a 640 000 ans, elle donna naissance au tuf de Lava Creek, un dépôt de cendres fossilisées atteignant par endroits 400 mètres d'épaisseur – et de dépôts plus récents formés lors d'éruptions ultérieures moins violentes. Les premières analyses achevées, nous avons eu la surprise de constater que la composition en oxygène de ces zircons ne concordait pas avec celle du manteau profond et brûlant, comme cela aurait été le cas si les chambres magmatiques se remplissaient toujours par le bas tandis qu'elles se vidaient. Les zircons nés dans le manteau auraient dû avoir une signature distinctive : lorsque les éléments dissous dans les magmas s'assemblent

Supercycles

de la Terre), et au-dessus de zones de subduction (régions où une plaque tectonique glisse sous une autre). Dans les deux cas, les supervolcans évoluent selon un cycle éruptif qui est peut-être plus pré-

visible qu'on ne le pensait autrefois. Voici les quatre grandes étapes de ce cycle qui commence par la formation de la chambre magmatique, représenté ici dans le cas d'une zone de subduction.



2. Le volume de la chambre magmatique supérieure augmentant, le sol qui la surplombe gonfle et se fissure. Le magma, plus riche en silice et moins chaud que celui du manteau, est très résistant à l'écoulement, si bien que l'eau et les gaz peinent à s'échapper. Ainsi, lorsqu'un bouchon de ce magma visqueux atteint la surface par une faille verticale, le matériau sous pression explose violemment plutôt que de s'écouler lentement.

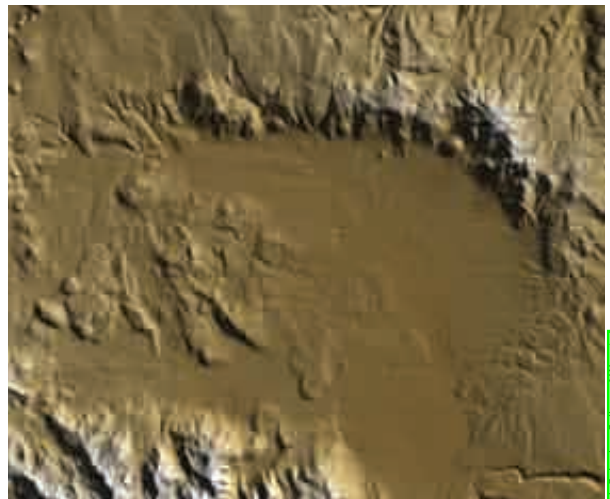
3. De nouvelles cheminées explosives apparaissent et se rejoignent le long d'un anneau aussi large que la chambre magmatique. La surface terrestre, contrainte et privée de soutien, finit par se fragmenter et plonger dans la chambre. Une masse énorme de magma est alors brutalement éjectée par le bord de l'anneau. La libération soudaine de ce magma provoque la création d'immenses nuages de cendres, de gaz et de roches brûlants, les écoulements pyroclastiques, qui dévastent la région environnante.

4. Après l'éruption, une dépression en forme de cratère, la caldeira, se forme au-dessus de la chambre magmatique partiellement vidée. Avec le temps, le sol effondré dans la chambre fond par-dessous, créant une masse de magma plus modeste qui, associée à d'autres forces, fait s'élever un dôme au centre de la caldeira. Avant que cette masse n'enfle suffisamment pour alimenter une nouvelle superéruption, de la lave peut s'écouler calmement et par intermittence de cette région.



U.S. Department of Energy

2. Des dépôts volcaniques massifs affleurent sur les versants escarpés du site de Yucca Mountain, dans le Nevada. Les deux strates sont les vestiges des pluies de cendres brûlantes accompagnant deux superéruptions survenues il y a 12,8 et 12,7 millions d'années.



U.S. Geological Survey

3. Les supervolcans endormis, tel celui de Long Valley, en Californie, ne se présentent pas sous forme de cheminées coniques, mais se signalent par d'énormes caldeiras, des dépressions formées par l'effondrement du sol dans la chambre magmatique sous-jacente.

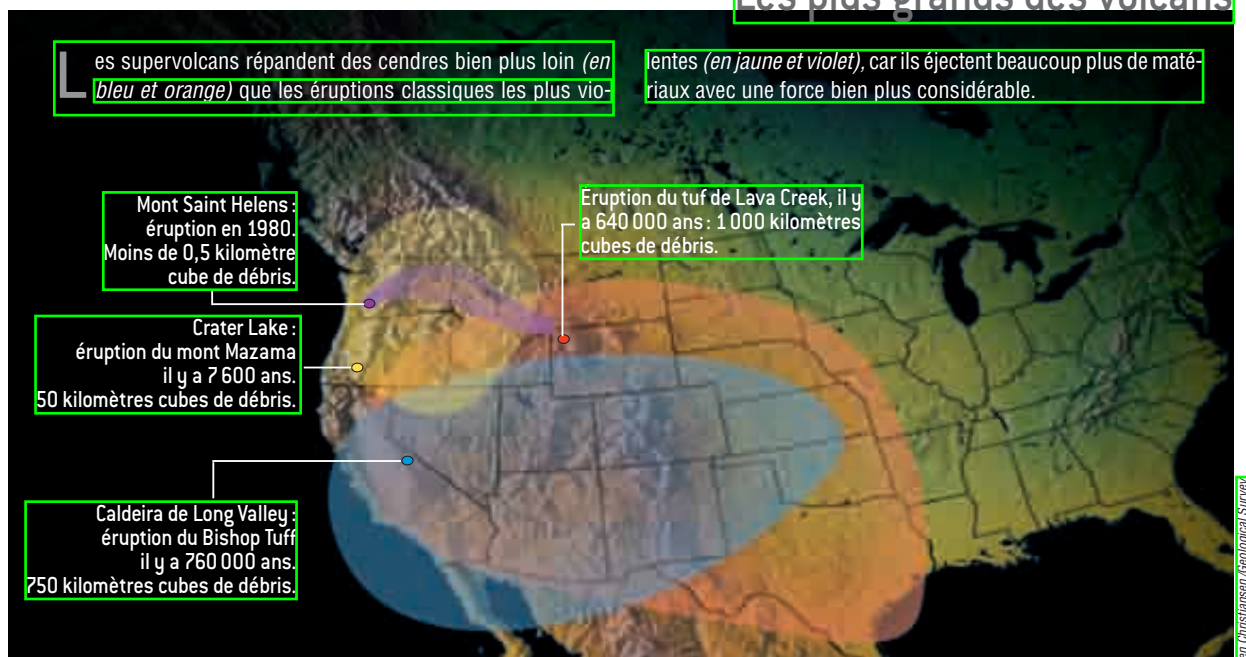
pour former un zircon, ce cristal intègre une proportion élevée d'oxygène 18, un isotope lourd de l'oxygène. Or, comparés à ceux du manteau, les zircons que nous avons étudiés étaient pauvres en oxygène 18.

Nous avons alors compris que le magma devait en fait provenir de roches autrefois situées près de la surface. La déficience en oxygène 18 apparaît uniquement lorsque les roches abritant les cristaux ont été en contact avec la pluie ou l'eau de mer. Cela suggère que le toit de roches qui s'est effondré lors de l'une des deux plus anciennes superéruptions de Yellowstone a fondu pour former la majeure partie du magma rejeté lors de la catastrophe plus récente de Lava Creek et d'éruptions survenues depuis. Cette hypothèse s'est trouvée confortée lorsque nous nous sommes aperçus que l'âge des zircons provenant d'éruptions pos-

térieures à Lava Creek s'étendait sur l'ensemble des deux millions d'années qu'a duré le volcanisme à Yellowstone. Des zircons aussi âgés ne peuvent exister dans les cendres les plus récentes que s'ils étaient présents dans le matériel éjecté lors des anciennes éruptions, matériel qui a été réenglouti ensuite dans la chambre magmatique et qui a contribué à alimenter les éruptions les plus récentes.

Cette découverte apporte des indications sur le comportement futur du supervolcan de Yellowstone et d'autres. Si une série de petites éruptions commençait à Yellowstone – signe précurseur d'une explosion catastrophique quelques semaines à quelques centaines d'années plus tard, l'analyse de l'oxygène contenu dans ces laves et la datation de leurs zircons révéleraient le type de magma dont est remplie la chambre en dessous. Des laves pauvres en oxy-

Les plus grands des volcans



gène 18 trahiraient alors une éruption alimentée par des restes recyclés du magma originel, qui tiendrait sans doute plus d'une bouillie cristalline épaisse que d'un liquide explosif. Inversement, si la lave nouvelle portait la signature d'un magma frais issu du manteau et dépourvu de vieux zircons, elle proviendrait certainement d'un grand volume de magma nouveau qui aurait empli la chambre par le bas. Un tel cas de figure signifierait qu'un nouveau cycle volcanique a débuté et que la chambre magmatique risquerait davantage d'exploser dans une superéruption.

Dévastation dans un grand rayon

Les cristaux et leurs signatures isotopiques ont également dévoilé des surprises sur les conséquences des superéruptions. L'un des exemples les mieux étudiés est le Bishop Tuff, une strate volcanique d'épaisseur allant de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres, qui forme ce que l'on nomme les Plateaux volcaniques de l'Est californien. Ce dépôt massif représente les restes de 750 kilomètres cubes de magma éjectés lors de la formation de la caldeira supervolcanique de Long Valley, il y a quelque 760 000 ans.

Avant les années 1970, de nombreux géologues supposaient que le Bishop Tuff résultait d'une série d'éruptions distinctes étalées sur plusieurs millions d'années. L'étude minutieuse de microscopiques bulles de magma piégées dans des cristaux de quartz a cependant conduit à imaginer un tout autre scénario. La vitesse à laquelle le magma s'échappe d'une chambre dépend essentiellement de deux facteurs : la viscosité du magma et la pression dans la chambre magmatique. La pression à l'intérieur d'une bulle de magma étant égale à celle de la chambre dans laquelle s'est formé le magma, cette bulle est en quelque sorte une version réduite de la chambre. Partant de cette analogie, Alfred Anderson et ses collègues de l'Université de Chicago ont étudié les bulles dans les cristaux de quartz afin d'estimer le temps mis par le magma pour s'en échapper. Cette étude et plusieurs autres réalisées dans les années 1990 suggèrent que le Bishop Tuff – et sans doute la plupart des débris de superéruptions – a été expulsé lors d'un seul événement, en moins d'une centaine d'heures.

Cette découverte a contraint les chercheurs à revoir leurs scénarios de superéruptions. Voici comment l'on imagine aujourd'hui le déroulement d'un tel événement : au lieu d'un lent écoulement de lave liquide comme à Hawaï, ces éruptions prennent la forme d'explosions supersoniques qui projettent une mousse de cendres et de gaz brûlants jusque dans la stratosphère, à 50 kilomètres d'altitude. Lorsque le sol situé au-dessus de la chambre magmatique s'effondre, d'immenses nuages gris, nommés écoulements pyroclastiques, fusent au ras du sol tout autour de la caldeira. Ce mélange de pierres ponce, de cendres et de gaz en suspension dans l'air, atteignant 700 degrés, progresse jusqu'à 400 kilomètres par heure, brûlant tout sur leur passage et à des dizaines de kilomètres alentour.

Aussi dévastateurs que puissent être les écoulements pyroclastiques, les cendres injectées dans l'atmosphère peuvent avoir un impact encore plus considérable. Dans un rayon de plusieurs centaines de kilomètres autour de l'éruption et pendant des jours, voire des semaines, des cendres



« Chercher, Soigner, Défendre »

La Fondation Jérôme Lejeune, reconnue d'utilité publique, a pour objectif la recherche sur les maladies génétiques de l'intelligence (déficiences intellectuelles).

SUBVENTIONS

La Fondation Jérôme Lejeune appelle les équipes et chercheurs intéressés à soumettre à son Conseil scientifique des projets de recherche fondamentale ou appliquée (génétique, biologie moléculaire, neurosciences, cellules souches adultes ou du cordon, clinique, thérapeutique, comportement, etc.), destinés à conduire à la découverte de traitements améliorant les symptômes des maladies génétiques de l'intelligence, dont la trisomie 21. Une partie des subventions de cet appel d'offres sera dédiée à la recherche sur le syndrome de Smith-Magenis. L'organisation de congrès est aussi subventionnée.

RENSEIGNEMENTS PRATIQUES

Formulaire à remplir « en ligne » sur

www.fondationlejeune.org

ou à demander à :

conseilscientifique@fondationlejeune.org

(à valider avant le 22 septembre 2006) :

Conseil Scientifique-Fondation Jérôme Lejeune

48, rue Galande – 75005 PARIS - France

Tél : +33 (0)1 53 10 08 30

Fax : +33 (0)1 53 10 85 98

retomberaient comme d'épais flocons de neige. Dans un rayon de 200 kilomètres autour de la caldeira, la lumière du Soleil serait pratiquement étouffée, si bien que le ciel à midi rayonnerait d'une lueur crépusculaire. Les maisons, les habitants et les animaux seraient enterrés. À 300 kilomètres de la caldeira, la couche de cendre atteindrait encore 50 centimètres d'épaisseur ; mélangée à l'eau de pluie, son poids suffirait pour provoquer l'effondrement des toitures. Une épaisseur moindre bloquerait le fonctionnement des centrales et des relais électriques. Une épaisseur de quelques millimètres seulement, qui pourrait recouvrir la moitié de la planète, provoquerait la fermeture des aéroports et réduirait dramatiquement la production agricole.

C'est seulement progressivement que les pluies (rendues acides par les gaz volcaniques) nettoieraient cette épaisse couche de cendre. Comme la cendre flotte, elle bloquerait le trafic sur la plupart des voies fluviales. De fait, de

récents forages pétroliers dans le golfe du Mexique ont rencontré une couche épaisse de débris supervolcaniques dans le delta du Mississippi, à plus de 1600 kilomètres de leur source dans le Yellowstone. C'est seulement en descendant à la surface du Mississippi, puis en s'agrégeant aux sédiments qui se déposent au fond de l'océan, que cette masse de débris a pu s'accumuler aussi loin de sa source.

Des dégâts dans l'atmosphère

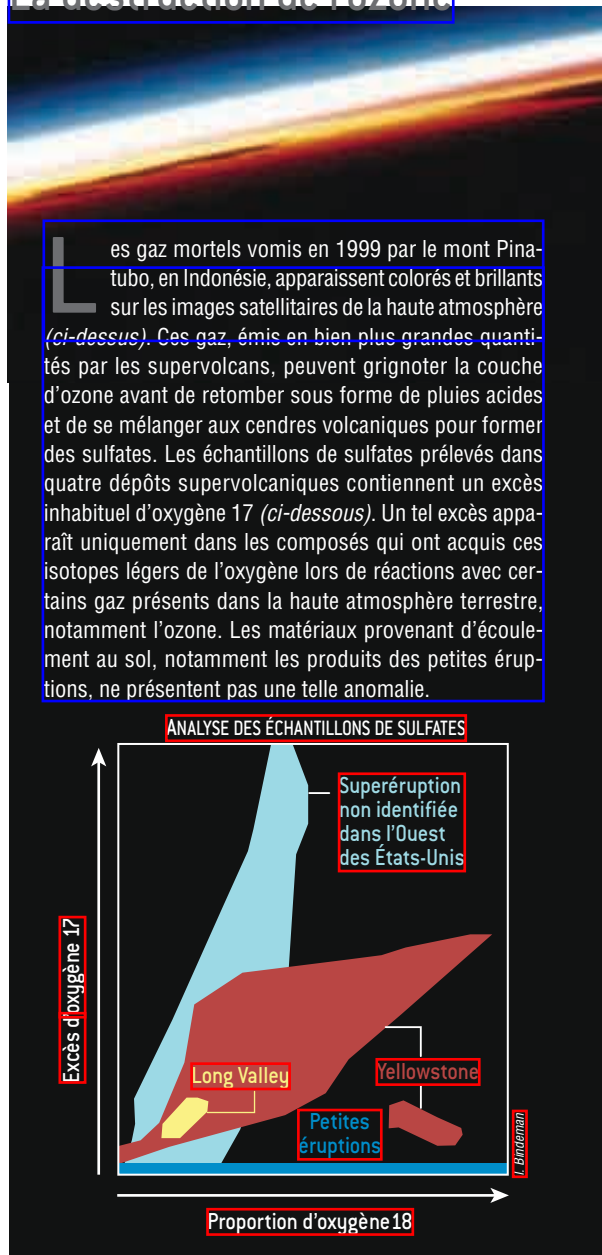
Les chercheurs ont de bonnes raisons de penser que le rejet de grands volumes de gaz dans la haute atmosphère aurait d'autres conséquences visibles durant de nombreuses années. Si certaines de ces conséquences ne sont pas aussi dramatiques qu'on le redoutait, d'autres en revanche seraient pires. L'examen de la composition de petits sous-produits des éruptions passées a été une fois de plus très éclairant à ce sujet.

Des divers gaz qui participent à toute éruption volcanique, le dioxyde de soufre est celui qui cause les plus graves atteintes à l'environnement ; il réagit avec l'oxygène et l'eau pour produire des gouttelettes d'acide sulfurique (H_2SO_4). Ces gouttelettes seraient la principale cause de l'atténuation de la lumière solaire à la suite d'une superéruption, et provoqueraient un spectaculaire refroidissement climatique. Sachant que le cycle hydrologique de la planète met des années pour évacuer totalement ces gouttelettes d'acide, de nombreux chercheurs ont parlé d'« hivers volcaniques » apocalyptiques susceptibles de durer des siècles. Ces dernières années cependant, d'autres chercheurs ont revu à la baisse ces estimations alarmistes.

L'acide sulfurique produit après de grandes éruptions volcaniques se retrouve presque toujours piégé à l'état de trace dans la neige et dans la glace lorsqu'il précipite à partir de l'atmosphère contaminée. En 1996, des chercheurs étudiant des carottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique ont localisé le pic d'acide sulfurique qui a suivi l'éruption du Toba, il y a 74000 ans. Cette éruption éjecta 2800 kilomètres cubes de lave et de cendre et fit chuter la température moyenne de la planète de 5 à 15 degrés Celsius. Les conséquences d'un tel refroidissement furent certainement dramatiques, mais pas aussi longues qu'on le pensait : les carottes glaciaires montrent que l'acide sulfurique a disparu au bout de six années. Certains chercheurs suggèrent même que cette disparition a pris un ou deux ans seulement.

Cette résorption plus rapide que prévu des hivers volcaniques est une nouvelle rassurante. De nouvelles méthodes développées ces dernières années pour étudier la composition isotopique de l'oxygène dans les pluies acides d'origine volcanique ont néanmoins fait apparaître une image inquiétante des effets à long terme du dioxyde de soufre dans l'atmosphère. Pour que le dioxyde de soufre (SO_2) se transforme en acide sulfurique (H_2SO_4), il faut qu'il s'oxyde, c'est-à-dire qu'il doit acquérir deux atomes d'oxygène d'un autre composé présent dans l'atmosphère. La nature précise des composés intervenant dans ce processus fait actuellement l'objet d'un intense débat. Aussi, lorsque j'ai commencé à travailler avec John Eiler à l'Institut de technologie de Californie en 2003, nous avons cherché à identifier ces composants dans les échantillons de cendres provenant des superéruptions de Yellowstone et de Long Valley.

La destruction de l'ozone



Nous avons commencé nos analyses en nous concentrant sur un oxydant particulièrement efficace, l'ozone (O_3). Ce gaz est connu pour protéger la Terre du rayonnement ultraviolet émis par le Soleil. En raison des transformations chimiques subies par certains gaz en présence de cet intense rayonnement solaire, l'ozone se caractérise par une anomalie de sa signature isotopique en oxygène qui, en termes simples, peut être vue comme un excès d'oxygène 17.

Lorsque l'ozone ou toute autre molécule stratosphérique riche en oxygène interagit avec le dioxyde de soufre SO_2 , elle transfère sa signature isotopique en oxygène à l'acide résultant – autrement dit, l'anomalie de l'oxygène 17 persiste dans l'acide nouvellement formé. En 2003, des géochimistes de l'Université de Californie, à San Diego, ont trouvé des preuves que cette signature est également préservée dans les pluies acides et dans les composés sulfatés qui se forment lorsque ces pluies réagissent avec des cendres sur le sol.

L'excès d'oxygène 17 et d'autres signatures chimiques que nous avons découverts dans les sulfates des cendres de Yellowstone et de Long Valley signifient ainsi que de grandes quantités d'ozone stratosphérique ont participé aux réactions impliquant les gaz issus des superéruptions survenues dans ces régions. D'autres chercheurs étudiant les cendres d'éruptions géantes plus anciennes dans le Colorado et le Nebraska ont démontré que ces événements ont également grignoté l'ozone stratosphérique. Les superéruptions volcaniques endommageraient ainsi la couche d'ozone pendant un laps de temps plus long que ne dure leur impact sur les températures.

Une perte significative d'ozone stratosphérique se traduirait par une intensification du rayonnement ultraviolet à la surface de la Terre et, *in fine*, par une augmentation des cancers et autres dégâts génétiques. L'ampleur et la durée de cette destruction de l'ozone sont encore controversées. L'examen de carottes glaciaires montre que l'éruption du mont Pinatubo, en 1999, a entraîné une diminution de trois à huit pour cent de la quantité d'ozone. Que se serait-il passé après un événement des centaines de fois plus violent ? La réponse n'est pas simple, car les processus d'oxydation atmosphérique sont fort complexes et encore mal compris.

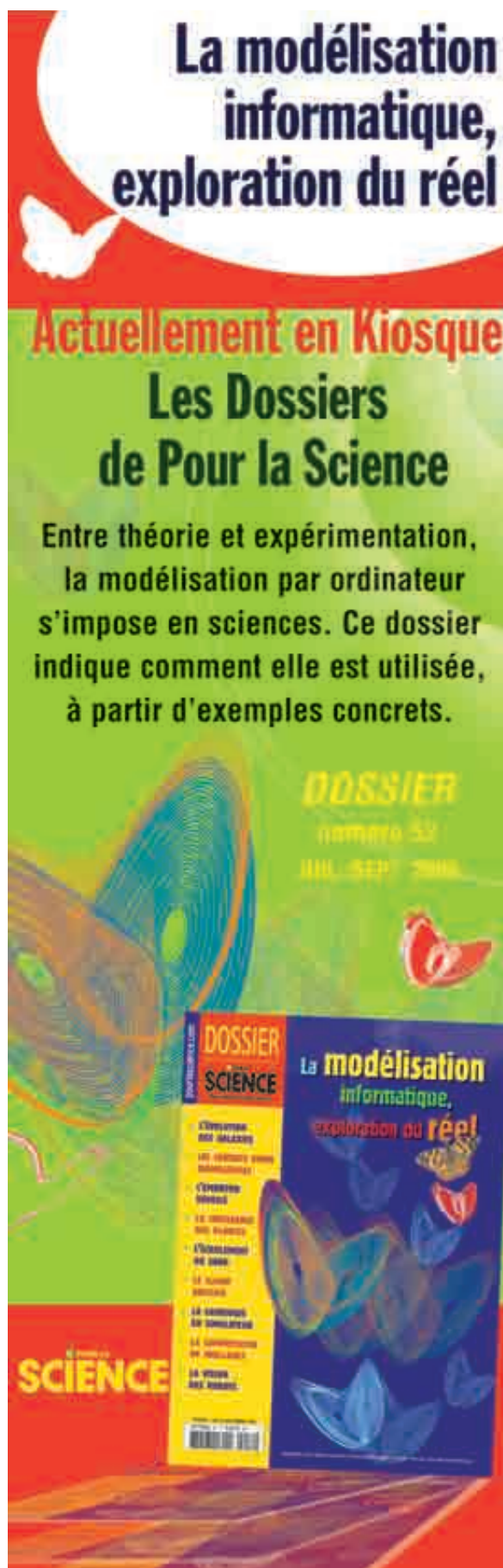
Les techniques d'étude et de surveillance des volcans se développent lentement, mais sûrement. En l'état actuel des connaissances, nous sommes incapables de parer à une superéruption, et ce que nous pouvons dire sur les conséquences d'une telle catastrophe reste encore de l'ordre de la spéculation. Seule certitude : une telle catastrophe ne surviendra pas avant longtemps.

Ilya BINDEMAN est professeur de géochimie à l'Université de l'Oregon, aux États-Unis.

I. BINDEMAN, J. EILER, B. WING et J. FARQUHAR, *Rare sulfur and triple oxygen isotope geochemistry of volcanologic sulfate aerosol*, in *Earth and planetary science letters*, à paraître.

B. HUIMING, M. THIEMENS, D. LOOPE et X.-L. YUAN, *Sulfate oxygen-17 anomaly in an oligocene ash bed in mid-north america : was it the dry fogs ?*, in *Geophysical research letters*, vol. 30, pp. 1843-1848, 2003.

I. BINDEMAN et J. VALLEY, *Magmatic evolution based on analyses of zircons and individual phenocrysts*, in *Journal of petrology*, vol. 42, pp. 1491-1517, 2001.



La vie d'une marée à

Les organismes de la zone littorale soumise aux marées affrontent des variations considérables de leurs conditions de vie selon que la mer est haute ou basse.

Le plus grand inventaire de ces espèces jamais mené en France commence : c'est l'occasion d'examiner les stratégies qu'elles déploient pour survivre.

François Lallier • André Toulmond

Cet été, peut-être fréquentez-vous les plages de nos côtes, notamment celles de l'Atlantique et de la Manche où, deux fois par jour, la mer se retire et découvre une large zone. Là, sur et sous le sable, sur et sous les rochers, vivent des animaux marins tels le crabe vert ou le bigorneau, qui doivent affronter chaque jour la disparition de leur milieu naturel, l'eau (voir la figure 1). Ces animaux qui subissent les marées suscitent un regain d'intérêt et font aujourd'hui l'objet de l'inventaire le plus exhaustif jamais réalisé sur le littoral français. Il a été lancé après le naufrage de l'*Erika*, quand les biologistes se sont rendu compte qu'il n'existait pas, pour évaluer avec exactitude l'impact de la pollution, de description suffisamment précise de la faune et de la flore colonisant les zones touchées.

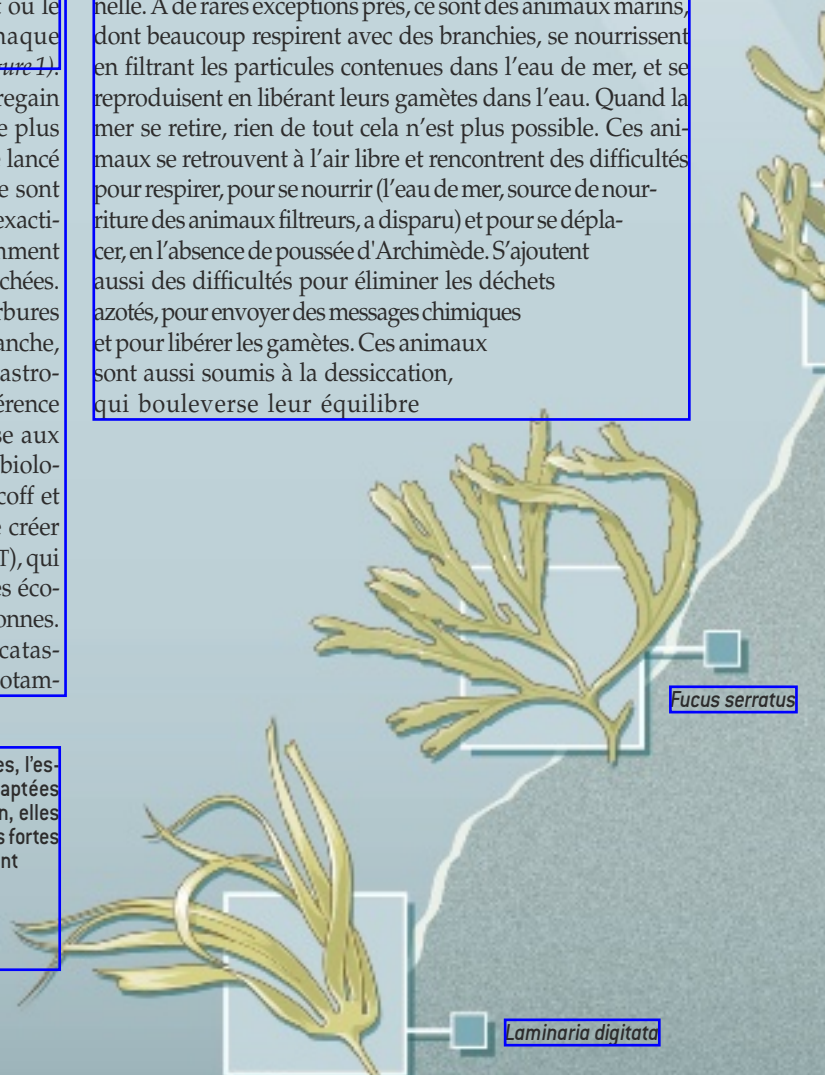
Suite à un naufrage, tant que la nappe d'hydrocarbures flotte, les dégâts qu'elle cause restent modérés. En revanche, dès qu'elle se dépose sur la côte, les effets sont catastrophiques, mais difficiles à expertiser sans état de référence fiable. Or les dernières études sur la faune soumise aux marées sont éparpillées et datent des années 1960. Les biologistes de l'IFREMER, de la Station biologique de Roscoff et des Universités de Brest et de Rennes ont décidé de créer un réseau de surveillance, le réseau benthique (REBENT), qui a pour objectif d'établir un état des lieux complet des écosystèmes benthiques sur plus de 70 sites des côtes bretonnes. Il servira à estimer l'impact d'éventuelles futures catastrophes, mais aussi à suivre l'évolution des espèces, notam-

ment de leur répartition en fonction des changements climatiques (voir la figure 2). Cette année, le réseau va être étendu au reste des côtes françaises.

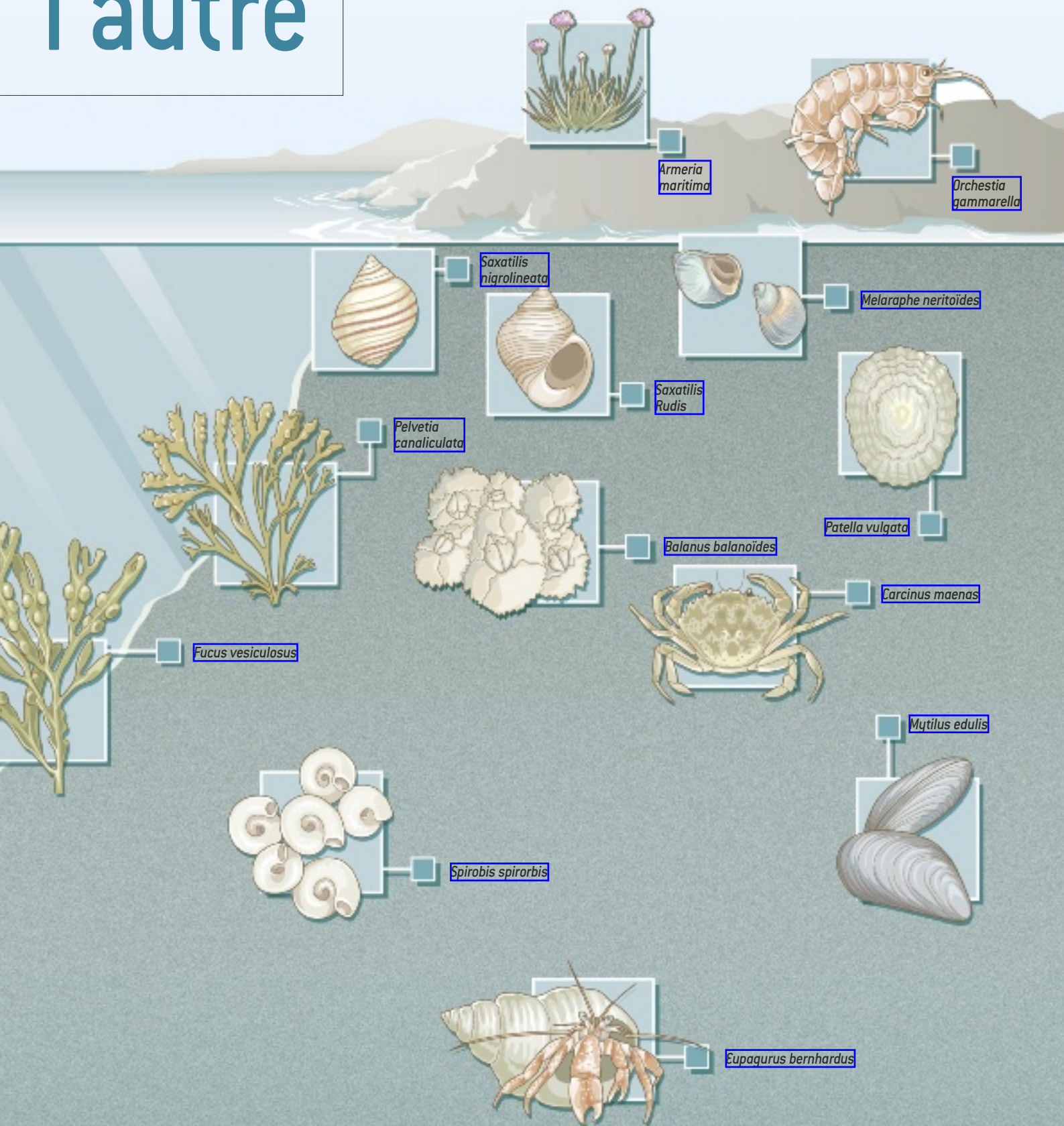
Les animaux qui vivent dans la zone soumise aux marées (zone intertidale ou estran) sont d'une richesse exceptionnelle. À de rares exceptions près, ce sont des animaux marins, dont beaucoup respirent avec des branchies, se nourrissent en filtrant les particules contenues dans l'eau de mer, et se reproduisent en libérant leurs gamètes dans l'eau. Quand la mer se retire, rien de tout cela n'est plus possible. Ces animaux se retrouvent à l'air libre et rencontrent des difficultés pour respirer, pour se nourrir (l'eau de mer, source de nourriture des animaux filtreurs, a disparu) et pour se déplacer, en l'absence de poussée d'Archimède. S'ajoutent aussi des difficultés pour éliminer les déchets azotés, pour envoyer des messages chimiques et pour libérer les gamètes. Ces animaux sont aussi soumis à la dessiccation, qui bouleverse leur équilibre

1. Les espèces qui vivent dans la zone soumise aux marées, l'estran, sont, pour la majorité, des espèces marines, qui se sont adaptées à des conditions aériennes passagères. Dans le bas de l'estran, elles sont à l'air libre pendant seulement quelques heures lors des plus fortes marées basses de l'année. En revanche, plus haut, elles doivent affronter des conditions extrêmes (disparition de l'eau, chocs thermiques...) d'autant plus longtemps qu'elles se situent à proximité de la frange supérieure. Là, les espèces deviennent plus rares.

Delphine Babin



l'autre



hydrominéral, au risque d'insolation, à des chocs thermiques, notamment lors de l'émersion, et à une salinité variable. Enfin, la marée basse expose les habitants de la zone intertidale aux prédateurs, le plus souvent des oiseaux ou des crabes « terrestres ». Même dans les quelques endroits où l'eau de mer subsiste (flaques, écoulements, eau résiduelle dans les sédiments meubles), les animaux conservent un peu de leur milieu aquatique, mais ils s'y retrouvent confinés : l'oxygène vient donc à manquer et l'équilibre acido-basique du milieu est perturbé, notamment lorsque la biomasse végétale ou microbienne est importante...

Les animaux de la zone intertidale sont confrontés à des conditions de vie extrêmes, plus contraignantes à mesure que l'on se rapproche de la partie haute de la zone intertidale, celle qui est sèche le plus longtemps. Seules des espèces sélectionnées et tolérantes (euryèces), adaptées à une certaine forme de vie amphibie, peuvent y vivre. Ces espèces sont peu nombreuses, mais comptent une grande densité d'individus, ce phénomène s'accroissant en haut de l'estran. Trouver sa place, respirer, lutter contre la dessiccation et se reproduire requièrent des adaptations hors du commun, parfois uniques en leur genre.

Le plus souvent, les animaux intertidaux sont adaptés aux conditions régnant à un niveau bien précis de l'estran. Cela est surtout vrai pour les espèces du haut de l'estran dont beaucoup sont paradoxalement incapables de supporter une immersion continue. Parmi elles, figurent quelques espèces terrestres qui supportent d'être aspergées régulièrement par l'eau de mer, par exemple la ligie (*Ligia oceanica*), un arthropode proche des cloportes. On trouve

également des espèces marines qui ne supportent plus d'être continuellement immergées, telle la petite littorine *Melaraphe neritoides* (une cousine du bigorneau) qui, placée dans un récipient d'eau de mer, en gravit « rapidement » les parois pour se placer hors de l'eau.

Trouver et garder sa place

Les espèces intertidales conservent un positionnement optimal grâce à des adaptations anatomiques et comportementales, notamment lors du passage de la vie larvaire ou juvénile à la vie adulte. C'est le cas des balanes des niveaux supérieurs, ces petits crustacés (Cirripèdes) enfermés dans leur muraille calcaire, solidement et définitivement fixée au rocher. Leurs larves évoluent dans le plancton marin jusqu'au stade où, lors d'une marée haute, elles sont attirées par les phéromones sécrétées par les adultes et par les propriétés physico-chimiques du substrat. Elles se fixent alors sur le rocher adéquat grâce à une glande adhésive et commencent une mue pour se métamorphoser en jeune balane. Ainsi, dans les zones favorables, chaque millimètre carré est colonisé et les individus, tassés les uns contre les autres, grandissent en hauteur, ce qui leur confère une morphologie différente de celle des individus isolés. De même, les spirorbes, des petits vers Annélides vivant dans un tube calcaire enroulé en spirale, ont des larves attirées par les pierres ou par les frondes des *Fucus*, des algues brunes abondantes dans la zone intertidale, quand celles-ci sont couvertes d'un film bactérien. Les ascidies coloniales (des organismes filtreurs également fixés au substrat) ont elles

Un tremplin vers la vie terrestre ?

L'origine de la vie est sans conteste marine, mais deux voies sont possibles pour coloniser le milieu terrestre : directement de la mer à la terre, via la zone intertidale, ou indirectement après un passage par les eaux douces des fleuves ou des marais. Ce changement radical de milieu de vie modifie d'abord la respiration, l'équilibre hydrique et ionique, ainsi que l'excrétion azotée, puis la régulation thermique, la locomotion, et enfin, la reproduction. En fait, seuls deux grands groupes ont réussi cette colonisation du milieu aérien : les vertébrés et les arthropodes. Deux autres groupes ont eu un succès plus limité : les annélides et les mollusques.

Pour les vertébrés, la transition de « poisson » à « tétrapode » s'est probablement déroulée en partie dans l'eau douce. Les épis-tostégaliens, un groupe fossile de sarcoptérygiens (la classe de poissons osseux comprenant les coelacanthes et les dipneustes), vivant en eau douce il y a 370 millions d'années, constituent sans doute le groupe frère des tétrapodes. Par ailleurs, tous les téléostéens actuels (les poissons osseux) ont eu un ancêtre vivant en eau douce : en effet, la concentration osmotique de leur milieu intérieur est trois fois inférieure à celle de l'eau de mer, alors que celle des autres espèces marines est équivalente. Cela laisse supposer pour les téléostéens marins un retour à la mer, après un passage en eau douce.

Les insectes sont probablement issus de crustacés et seraient sortis de l'eau encore plus tôt (plus de 400 millions d'années), grâce à des « inventions » originales : la respiration trachéenne (les tra-

chées sont de fins canaux qui assurent le transport de l'air jusqu'aux cellules) et l'osmorégulation par une glande rectale qui évacue les excès de sels.

Chez certains crabes, nous assistons actuellement à un passage de la vie marine à la vie terrestre : les crabes terrestres, communs en zone intertropicale, ne sont pas encore complètement indépendants du milieu aquatique, notamment pour la reproduction, comme en témoignent les migrations massives des forêts vers le rivage des crabes rouges de Christmas Island. Ces crabes terrestres sont, pour la plupart, d'origine marine, transformant leur chambre branchiale, de plus en plus étanche, en véritable poumon avec des branchies réduites et une vascularisation accrue des parois. Leur excrétion azotée évolue également vers la production d'acide urique, qu'ils éliminent sous forme de cristaux, au lieu de l'ammoniac, rapidement toxique en l'absence d'eau.



aussi des larves capables de se diriger dans les zones propices à l'espèce et de s'y établir. Elles sont soit photophobes (*Dendrodoa*) et se fixent sur les adultes, à l'abri des grottes et des surplombs rocheux, soit phototropes (*Distomus*) et préfèrent alors la surface des algues nommées laminaires (voir la figure 3).

Un autre hôte, omniprésent sur les rochers du médio-littoral, la patelle (ou bernique) est, malgré les apparences, capable de se déplacer, mais elle retourne toujours vers le même site, dit de repos. Dans l'eau, à marée haute, elle rampe doucement pour se nourrir, par broutage, autour de son site de repos, où le bord de sa coquille coïncide exactement à la microtopographie du rocher. La patelle présente ainsi une résistance à toute épreuve face aux vagues. Elle retrouve son site en repérant les substances chimiques libérées lors du trajet aller, lors de trajets antérieurs ou par le site de repos.

À l'inverse, d'autres espèces se déplacent au cours de la marée. Ainsi, les talitridés *Talitrus saltator* et *Orchestia gammarella*, de petits crustacés amphipodes communément nommés puces de mer, vivent respectivement dans le sable ou entre les blocs rocheux des hauts de plage pendant la marée haute. En effet, ce sont des espèces marines, mais elles ne supportent plus une immersion prolongée. Quand la mer descend, elles retournent vers la source de nourriture bien localisée que constituent les laisses de mer, ces franges de débris végétaux laissées par la mer en se retirant. Dès que la mer monte, elles fuient devant l'eau et se mettent à l'abri à l'étage supralittoral, à la limite du milieu continental. Elles s'orientent par rapport au soleil, et en se fiant à des stimulus hygrométriques et chimiques pour évaluer l'état de dessiccation du lieu où elles se trouvent.

Respirer

Quand la mer descend, la grande majorité des animaux doit se mettre à l'abri et se protéger. Ceux qui vivent dans le sable ou la vase s'enfouissent au fond d'une galerie ou d'un tube, évitant ainsi la dessiccation et d'autres situations inconfortables, mais ils s'en créent de nouvelles : ils n'ont pas accès à l'oxygène et doivent résister aux substances toxiques émises par certaines bactéries, par exemple le sulfure d'hydrogène, qui s'accumulent dans leur abri. Pour les espèces des milieux rocheux, l'abri dans le substrat étant impossible, elles se protègent sous les blocs et les cailloux, ou sous les ceintures d'algues. Les étrilles, les bouquets et les ormeaux, des espèces ne supportant pas une émergence prolongée, ne peuvent survivre qu'en se mettant ainsi à couvert.

Les animaux vagiles, c'est-à-dire capables de se déplacer, maintiennent le plus souvent une position adéquate grâce à un phototropisme positif ou négatif (ils se dirigent vers la lumière ou dans la direction opposée), ou à un géotropisme (selon la gravité). Par exemple, les crabes, les crevettes et les ormeaux s'orientent surtout par phototropisme. L'odorat, ou chimiotaxisme, est aussi un sens majeur pour les animaux fouisseurs, qui peuvent déterminer la salinité de l'eau ou la présence d'éléments tel le sulfure d'hydrogène. Ainsi, grâce à ces stratégies de phototropisme ou de traçage chimique, les espèces se maintiennent au niveau de l'estran le plus favorable à leur survie et y supportent les va-et-vient de l'eau de mer.



2. En Bretagne, certaines espèces de laminaires qui poussent dans l'estran ont été retrouvées plus au Nord (ici, *Laminaria digitata* et *Fucus* à marée basse). Des espèces étendent leur zone de colonisation vers le Nord de la côte finistérienne, conséquence du réchauffement climatique. Ce résultat est l'un des premiers de l'inventaire mis en place suite au naufrage de l'Erika.

Tous les animaux de la zone intertidale ont besoin d'oxygène pour vivre, à l'exception de très rares espèces de vers nématodes. Certains en ont besoin en permanence, d'autres peuvent s'en passer pendant plusieurs heures d'affilée, mais pour la majorité d'entre eux, la marée basse constitue une période difficile. Ils survivent de plusieurs façons : les uns utilisent l'oxygène de l'air ; d'autres parviennent à extraire jusqu'à la dernière molécule d'oxygène présent dans l'eau de mer résiduelle ; beaucoup réduisent leur activité afin de diminuer leurs besoins en oxygène ; enfin, certaines espèces utilisent transitoirement des voies métaboliques anaérobies.

Les animaux de l'estran ont souvent des structures respiratoires hors du commun, qui ont évolué pour s'adapter à l'absence quotidienne de l'eau. Un cas extrême est celui d'*Orchestia* et de *Talitrus*, les puces de mer, ainsi que de *Ligia*, qui ont en permanence une respiration aérienne grâce à des branchies à parois plus rigides que celles des espèces voisines uniquement marines : les branchies ne s'affaiblissent pas. Toutefois, ils ne peuvent quitter que quelques heures le microenvironnement saturé en vapeur d'eau que constituent les laisses de mer (ou les fissures exposées au Nord) sous peine de déshydratation. À l'inverse, certaines littorines des hauts niveaux (bigorneaux) respirent grâce à un poumon qui s'est développé dans la cavité

Des algues en étages

En bord de mer, les roches immobiles sont colonisées non seulement par des animaux, mais aussi par des algues. Dépourvus de racines, ces végétaux solidement arrimés par des sortes de crampons tirent de l'eau de mer, par toute leur surface, les éléments nutritifs leur permettant, grâce à la photosynthèse, de fabriquer leur propre matière organique. Ces producteurs primaires, s'ils colonisent la zone de balancement des marées, sont soumis à des stress nombreux pendant la marée basse : disparition de l'accès aux nutriments, augmentation de l'intensité lumineuse, stress thermique, dessiccation, agressions osmotiques liées à l'évaporation ou, à l'inverse, aux précipitations. Le retour brutal de la marée est synonyme de chocs inverses tout aussi néfastes, auxquels s'ajoute l'effet d'arrachement lié à l'action des vagues. L'agressivité de ces éléments dépend de la saison, mais elle est d'autant plus forte que la roche colonisée est située dans les parties les plus élevées de la grève : la répartition des algues en étages mono-spécifiques parallèles aux différents niveaux de la marée ne fait que traduire la capacité différente des espèces à supporter ces agressions.

Les mécanismes adaptatifs mis en jeu sont multiples : production de composés neutralisant le rayonnement ultraviolet (bêta-carotène, acides aminés aromatiques...) ou, à l'inverse, favorisant l'absorption de la lumière verte (phycocérythrine, fucoxanthine, siphonoxanthine) ; intensité de la photosynthèse identique dans l'air et dans l'eau, par exemple chez le *Fucus* ; tolérance des cellules à la perte d'eau ou aux variations de salinité externe grâce notamment à la fabrication et à la dégradation de composés osmotiquement actifs, tels le mannitol ou certains acides aminés.

Un cas extrême, l'algue brune *Pelvetia canaliculata* (*ci-dessous*), implantée aux plus hauts niveaux de l'estran, est tellement adaptée aux longues périodes d'émersion qu'elle ne survit pas à une immersion de plus de six heures. La dessiccation liée à l'émersion aiderait l'algue à contrôler le développement du champignon endophyte dont elle est généralement infestée.

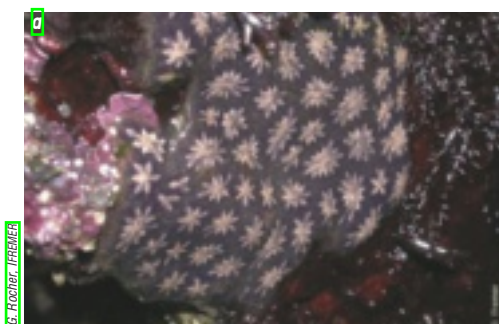


palléale (le pallium est le manteau des mollusques). Plus encore, leurs branchies présentent différents stades de régression selon le niveau où vit l'espèce : en haut de la zone intertidale, *Melaraphe neritoides* n'a presque plus de branchies, tandis que *Littorina saxatilis* et *Littorina nigrolirineata* en ont toujours des résidus.

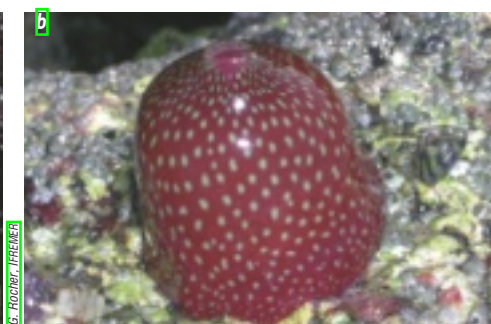
Rappelons que, contrairement à une idée reçue, les poumons et les branchies ne sont pas caractéristiques d'espèces respectivement terrestres et marines. Par définition, le poumon est un organe respiratoire interne, dans lequel l'air ou l'eau pénètre (il existe des poumons aquatiques, par exemple chez les holothuries), tandis que les branchies sont des expansions de l'organisme dans le milieu extérieur et, par conséquent, soumises à la gravité. De ce fait, en milieu aérien, les branchies se collent les unes aux autres et perdent leur efficacité, comme chez la moule, où les filaments branchiaux sont plaqués les uns contre les autres sous l'effet de la pesanteur. Les branchies restent fonctionnelles quand elles ont évolué et quand les animaux se maintiennent dans des conditions d'humidité suffisantes. Par exemple, comme nous l'avons dit plus haut, les parois des branchies des puces de mer se sont rigidifiées. Les patelles (bernaclées) sont aussi capables de respiration aérienne grâce à des pseudobranchies palléales, mais, à l'air libre, elles réduisent leur consommation d'oxygène. Le crabe vert est capable de faire circuler de l'air dans sa cavité branchiale (quand il y reste un peu d'eau) et ses lamelles branchiales sont constellées de petits « boutons intercalaires » qui évitent qu'elles ne se collent complètement les unes aux autres. Chez les balanes et la moule, les valves s'entrouvrent à marée basse lorsque l'air est suffisamment saturé en vapeur d'eau et des échanges respiratoires se produisent à travers l'ensemble des téguments. Des poissons, tels la blennie et le périophtalme (un poisson de la mangrove), survivent à l'air, à condition que leurs branchies et leur peau enduite de mucus soient régulièrement humectées. La peau est alors un organe respiratoire accessoire.

Une vie sans oxygène

Lorsque l'utilisation de l'oxygène de l'air est impossible, il faut savoir vivre en son absence. Certaines espèces peuvent survivre en anaérobiose pendant plusieurs heures. L'arénicole excelle dans cet exercice. Pendant la marée basse, elle utilise d'abord l'oxygène de l'eau contenue dans sa galerie ainsi que la réserve d'oxygène combiné à son hémoglobine très concentrée. Toutefois, ces réserves sont épuisées en moins de 30 minutes et son métabolisme devient anaérobie. Elle puise alors dans ses réserves de glycogène et d'aspartate, et produit plusieurs acides (acétique, propionique, succinique) qui ne sont pas réutilisés, mais éliminés pendant la marée haute suivante. L'acidose métabolique due à cette accumulation est compensée chez l'arénicole par le fort pouvoir tampon de son hémoglobine. Ainsi, bien qu'elle ne serve plus à transporter de l'oxygène à marée basse, elle n'en reste pas moins indispensable. Les mollusques bivalves adoptent une autre stratégie : ils remettent en solution des carbonates de leur coquille pour augmenter le pouvoir tampon de leurs liquides internes. Plus tard, pendant la marée haute, ils éliminent les sous-produits acides dans l'eau.



a G. Hocher, IPHES



b G. Hocher, IPHES



c G. Hocher, IPHES



d A. Le Marquès, IPHES



e A. Le Pichon et C. Motron, HabitusOnline



f A. Le Marquès, IPHES

3. Les animaux de l'estran disposent de stratégies variées pour résister aux marées. Les ascidies coloniales ont des larves photophobes qui se fixent dans les zones sombres protégées du soleil (a, *Botryllus schlosseri*). Les anémones de mer colonisent les flaques qui subsistent à marée basse (b, *Actinia fragacea*). Le crabe vert a de petits « boutons intercalaires » entre ses lamelles branchiales qui les empêchent de se coller en l'absence d'eau (c, *Carcinus maenas*, ici sous sa forme juvénile). La patelle

résiste à l'émersion en emprisonnant de l'eau dans sa cavité palléale et sous sa coquille, qu'elle plaque contre le rocher (d, avec des littorines). L'anémone *Anemonia viridis* tire une partie de son énergie de la lumière solaire grâce à sa symbiose avec des algues unicellulaires (e). *Ligia oceanica* (f), descendant d'isopodes terrestres (de la famille des cloportes), alterne entre les débris végétaux laissés par la mer où elle se nourrit à marée basse et le haut de la plage qu'elle rejoint dès que la mer monte pour se protéger.

Le plus souvent, pendant cette période sans oxygène, les espèces intertidales réduisent leur activité, y compris la circulation sanguine. Cette stratégie est celle de l'arénicole et des lamellibranches (huîtres, coques, moules...).

Coup de chaud et digestion

La plupart des espèces intertidales supportent des variations importantes de la température ambiante (elles sont dites eurythermes), surtout quand elles vivent fixées sur la roche et en haut de l'estran. Les espèces qui résistent aux températures les plus élevées sont aussi celles qui limitent le mieux leur dessiccation grâce à différentes stratégies impliquant, le plus souvent, de fortes capacités osmorégulatrices. En effet, elles survivent à condition de maintenir constants le volume et l'osmolarité (les proportions en éléments dissous, tels les ions, dans les différents compartiments liquidiens) du milieu intracellulaire. Le contrôle de l'osmolarité constitue donc une clé vitale. Pour ce faire, certaines espèces dégradent des protéines en acides aminés : le milieu intracellulaire devient osmotiquement plus concentré que l'environnement (on parle d'hyperosmoticité) et les cellules conservent leur eau.

Les espèces intertidales résistent mieux aux températures extrêmes élevées qu'aux températures extrêmes basses. C'est pourquoi les coups de froid hivernaux provoquent des hécatombes pendant les marées basses. Cependant, quelques espèces intertidales survivent alors que 40 à 80 pour cent de l'eau qu'elles contiennent est gelée. Dans le cas de la moule, cette congélation est contrôlée par les protéines, dites de nucléation, présentes dans l'hémolymph et qui entraînent une hyperosmoticité générale, du même type que celle

mise en œuvre en été pour lutter contre la déshydratation, qui protège de la congélation les fluides biologiques restés à l'état liquide. Dans certains cas, la résistance au froid des espèces intertidales résulterait de substances « antigel », comme chez certains poissons arctiques ou antarctiques.

Les mécanismes moléculaires mis en jeu dans l'adaptation au chaud et au froid restent à découvrir. En effet, le changement d'un paramètre de l'environnement (la température par exemple) entraîne des réactions en cascade, à la fois dans le milieu et dans l'organisme : difficile de démêler les fils ! Par exemple, quand la température de l'eau augmente, la concentration en oxygène dissous diminue, le métabolisme et les besoins en oxygène de l'organisme augmentent, alors qu'en général l'efficacité des transporteurs d'oxygène diminue, ce qui normalement devrait aggraver le problème initial. Toutefois, chez certaines espèces intertidales, par exemple l'arénicole, l'efficacité du pigment respiratoire, une hémoglobine géante, dépend moins de la température que celle des hémoglobines des mammifères. L'arénicole résiste ainsi mieux à une hausse de la température de l'eau. Chez le pagure *Eupagurus bernhardus* (le bernard-l'ermite), l'efficacité des pigments est même totalement indépendante de la température. Les modifications de ces pigments sont sans nul doute le fruit d'un processus de sélection positive au cours de l'évolution.

Pour découvrir les mécanismes de résistance aux variations de température, par exemple le rôle de familles de protéines telles les HSP (pour *Heat shock proteins*), les outils de la génomique seront précieux : ils révéleront les gènes et les protéines qui participent aux plus importantes de ces adaptations. Les premières puces à ADN spécialement

conçues pour la moule seront bientôt disponibles et mettront en évidence les cascades de réactions déclenchées par différents types de stress.

Pour tous les organismes qui filtrent l'eau de mer et en extraient les particules nutritives, la marée basse constitue une période de jeûne forcé. Cependant, quelques-uns, tels le crabe *Emerita* et certains bivalves du genre *Donax*, continuent à se nourrir en se maintenant dans la zone de déferlement où ils profitent des vagues qui mélangent le sable. Ils migrent donc vers le bas de la grève à chaque marée. Pour les organismes psammivores, tel l'arénicole, qui ingèrent le sédiment pour en extraire leur nourriture, la marée basse est aussi une période difficile, car lorsque l'eau se retire, le sable moins humide devient difficile à manipuler. Les prédateurs fixés, comme les cnidaires (anémones, tomates de mer...), sont aussi à la diète sauf s'ils se trouvent dans les flaques laissées par la marée descendante.

En revanche, dans les zones exposées aux vagues, les « brouteurs » de surface, telles la patelle et les littorines, profitent de la marée basse pour se nourrir quand l'atmosphère est suffisamment humide (notamment la nuit). De même, la marée basse constitue une période privilégiée pour les prédateurs capables de se déplacer, même en plein jour, à condition qu'ils supportent la lumière et une certaine déshydratation, leurs proies ayant des défenses amoindries. C'est le cas de l'annélide *Eulalia viridis*, qui explore la moulière en plein midi, ou de la pourpre qui se fixe sur les balanes et perce leur coquille pour les dévorer. Pour les détritivores du haut de la plage, les puces de mer ou les liges, la marée basse représente le seul moment pour manger. Dans tous les cas, la prise de nourriture pendant l'émergence sera d'autant plus active qu'il fera nuit, que le vent sera faible et l'humidité atmosphérique importante.

Symbiose et prédation

Notons que quelques espèces intertidales vivent en symbiose avec des algues unicellulaires et tirent une partie de leur énergie directement de la lumière solaire : l'éponge *Haliclondria panicea*, toute lisse et qui doit sa couleur brun vert à la présence d'algues symbiotiques ; l'anémone *Anemonia viridis* dont les dizaines de tentacules verts abritent aussi des algues ou le minuscule *Convoluta roscoffensis*, un ver plat, dépourvu de tube digestif, mais dont les tissus hébergent des milliers d'algues vertes unicellulaires. L'animal ne se nourrit plus, mais utilise les molécules produites par la photosynthèse de l'algue. *C. roscoffensis* vit dans les espaces séparant les grains de sable. Pendant la marée basse, il remonte à la surface du sédiment et expose ses algues à la lumière solaire, puis il s'enfouit à quelques millimètres de profondeur lorsque la marée remonte.

Les animaux de l'estran se nourrissent, mais servent aussi de nourriture. Le cycle de marée correspond ainsi à une alternance de dangers : ils sont menacés par les prédateurs marins pendant la marée haute, et terrestres pendant la marée basse. De très nombreux oiseaux (goélands, mouettes, échassiers) exploitent l'estran pendant la marée basse, chassent les hôtes des laisses de mer, les annélides et petits crustacés sous les pierres et dans le sable, ainsi que les bivalves et les poissons. Contre ces chasseurs, la

seule défense est la dissimulation (dans le sable, sous les pierres et sous les algues) ou l'homochromie dissimulatrice, si bien illustrée par les poissons plats.

Assurer la descendance

La reproduction des espèces intertidales diffère finalement assez peu de celle des autres animaux marins. Notons toutefois que, lorsqu'on s'élève du bas de l'estran vers le haut (et que le nombre d'espèces diminue !), la multiplication asexuée devient plus rare, l'incubation des œufs est plus fréquente, et le nombre des espèces ayant des larves planctoniques diminue. En réalité, tous les cas de figure sont possibles. Tous les petits crustacés des hauts niveaux (talitres, gammare, liges...) incubent leurs œufs et donnent naissance à de jeunes individus semblables aux parents. C'est aussi le cas de *Littorina saxatilis*, mais pas celui de *Melaraphe neritoides*, pourtant située plus haut sur l'estran. Les balanes, même les espèces situées en haut de l'estran, ont toutes des larves planctoniques, ainsi que la plupart des annélides. Cependant, l'œuf de l'arénicole évolue dans la galerie de la femelle et donne naissance à une larve, enveloppée d'une gangue de mucus, qui sera entraînée vers les plus hauts niveaux par la marée montante.

Dans le cas d'un développement direct (la larve ressemble aux adultes), l'établissement des juvéniles au bon niveau de la zone intertidale est assuré, mais le brassage génique des populations est faible, favorisant la sélection de populations adaptées au micromilieu local. Dans le cas d'un développement passant par une phase planctonique, la durée de vie de la larve est souvent courte. La libération des larves se produit pendant la marée haute, la ponte d'une population étant synchronisée. Ces larves ont des tropismes positifs ou négatifs favorisant un positionnement adéquat, facilité parfois par des substances émises par les adultes.

Ainsi, vivre à la plage est l'apanage d'une minorité d'espèces. Plus on s'approche du haut de la zone intertidale, plus elles deviennent rares. Celles qui s'y trouvent sont extraordinairement bien adaptées à leurs conditions de vie si changeantes, au point parfois de ne pouvoir subsister ailleurs, comme les talitres. Il existe donc bel et bien une faune typiquement intertidale, dont les stratégies de survie uniques justifient l'intérêt qu'on leur porte. Cette faune est régulièrement menacée par les marées noires. L'inventaire de sites de référence permettra aux biologistes d'estimer comment et à quelle vitesse la faune intertidale se restaure dans les sites touchés par la marée noire et de mesurer avec précision les dégâts causés, si jamais une autre catastrophe devait se produire.

François LALLIER est professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et directeur du Laboratoire Adaptation et diversité en milieu marin de la Station biologique de Roscoff. **André TOULMOND** est professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie et fut directeur de la Station biologique de Roscoff de 1994 à 2003.

P. HOCHACHKA et G. SOMERO, *Biochemical adaptation : mechanism and process in physiological evolution*, Oxford University Press, 2002.

C. LITTLE et J. KITCHING, *The biology of rocky shores*, Oxford University Press, 1996.

Y. TURQUIER et M. LOIR, *Connaître et reconnaître la faune du littoral*, Éditions Ouest-France, 1981.



1906-2006

INSTITUT OCÉANOGRAPHIQUE

Fondation Albert I^{er}, Prince de Monaco

Les activités de la Fondation

À Monaco



Le Musée océanographique, à travers les richesses de ses collections (plus de 300 000 objets), retrace l'histoire de l'océanographie et présente des expositions consacrées aux questions actuelles en sciences de la mer.

L'exposition "Monaco en Arctique" commémore le centenaire des expéditions du Prince Albert I^{er} au Spitzberg.

Les aquariums sensibilisent les visiteurs à la biodiversité du monde marin. Ils reconstituent des écosystèmes méditerranéens et tropicaux. Un grand bac de 400 m³ associe la faune luxuriante du lagon à celle de la passe récifale.



À Paris



L'Institut océanographique a pour vocation la diffusion des connaissances en sciences de la mer. L'enseignement scientifique comprend des cours, des séminaires et des colloques.

Le Centre de la mer, musée pédagogique, propose expositions, animations et visites guidées.

Une exposition et un cycle de conférences intitulés "100 ans d'océanographie" participent aux manifestations du centenaire de la Fondation.



À Monaco et à Paris



Une bibliothèque ouverte au public, dispose d'un fonds spécialisé d'ouvrages, de revues, de rapports d'expédition, de cartes et d'atlas.

Les Editions publient la revue Universitaire Océanis, des manuels de cours, des beaux livres de référence et de vulgarisation et des guides des formations aux métiers de la mer.



Vivre serein dans un monde cruel

Dans un univers où certains groupes adoptent une attitude agressive systématique, une communauté coopératrice peut-elle survivre et s'imposer ?

L'intérêt collectif est souvent opposé à l'intérêt individuel. Ce type de situation est magnifiquement illustré par le *dilemme du prisonnier* dont les règles sont explicitées sur la figure 1 et qui semble condamner les participants à l'égoïsme agressif. À long terme toutefois, l'intérêt collectif peut l'emporter. En effet, si les mêmes situations se répètent (*dilemme itéré du prisonnier*), la rationalité peut consister à faire confiance à autrui, même si nous ne sommes pas certains qu'il ne profitera pas de notre main tendue : la perspective de futures rencontres fructueuses rend acceptable le risque de se faire temporairement exploiter. Les expérimentations, menées par Robert Axelrod et ses continuateurs, l'ont établi : même sans contrainte policière, même sans motivation morale, les individus choisissent majoritairement de s'entendre et de coopérer à long terme.

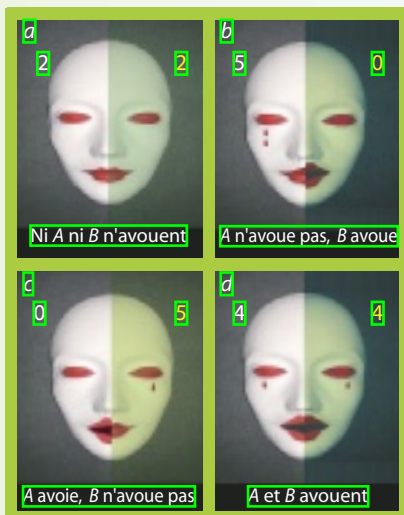
Qu'en est-il cependant des situations où la tactique de chacun est immuable, soit par volonté pacificatrice, soit par ignorance du statut du partenaire ? Nous verrons par des simulations informatiques que dans certaines confi-

gurations géométriques d'interaction entre communautés, l'intérêt collectif peut être préservé et que des attitudes de coopération peuvent dominer.

Miraculeuse coopération

Le *dilemme du prisonnier* nous fait mieux comprendre les mécanismes coopératifs en général, notamment de nombreux phénomènes observés par les psychologues, les sociologues, les spécialistes de stratégie politique et militaire, les économistes et les théoriciens de l'évolution. Le mécanisme qui amende ou élimine les individus agressifs est la réactivité des stratégies de type *donnant-donnant* qui coopèrent si vous coopérez, qui punissent votre agressivité si vous tentez de les exploiter. En revanche, si personne n'a le temps de nouer de relation suivie avec ses vis-à-vis et d'en tirer des leçons, le *donnant-donnant* et les stratégies réactives du même type n'ont aucun effet dissuasif. Ne devient-il pas alors évident que ne survivront que ceux qui saisissent toute occasion de bénéfice, aussi durs et intransigeants que soient leurs comportements ?

Nous observerons, en analysant les effets des « réseaux de communautés », qu'il existe d'autres mécanismes de mise



Deux malfaiteurs A (représenté par la moitié de visage de gauche) et B (représenté par la moitié de visage de droite) sont arrêtés et placés dans deux cellules différentes. Le juge leur propose un marché : « Si aucun de vous n'avoue (a), vous ferez deux ans de prison chacun ; si l'un avoue que vous prépariez une attaque de banque et que l'autre ne dit rien (b et c), celui qui avoue sera libéré, celui qui n'a rien dit fera 5 ans de prison. Si vous avouez tous les deux (d), vous ferez 4 ans de prison chacun. »

Nous utiliserons ces coefficients dans nos modèles. L'aveu est assimilé à l'attitude agressive (on trahit la confiance de son compère) et la coopération est assimilée au refus d'avouer (on reste solidaire).

Ce jeu est le prototype des relations où l'intérêt personnel s'oppose à l'intérêt collectif : chacun est tenté

1. Le dilemme du prisonnier

de trahir, mais pourtant l'intérêt collectif est que chacun se taise. Dans des expériences menées par Robert Axelrod, on propose plusieurs fois de suite à deux individus de jouer à ce jeu (*dilemme itéré du prisonnier*). Les joueurs ne connaissent que les choix passés de l'autre joueur et ils peuvent en tenir compte.

La stratégie de jeu *donnant-donnant* est : « Je coopère la première fois, puis les autres fois, je joue au coup n ce que l'autre joueur a joué au coup $n - 1$ ». C'est une très bonne méthode de jeu et lors d'un tournoi où de nombreuses stratégies sont confrontées elle obtiendra souvent le meilleur résultat total. La présence de ces stratégies réactives et coopérantes (*donnant-donnant* n'est agressive qu'en réaction à une agression) conduit presque toujours à l'élimination des stratégies agressives.

en place de la coopération, différents de ceux résultant des comportements réactifs. Ces réseaux modélisent des mondes biologiques, sociaux ou économiques habités par des entités n'ayant pas la possibilité de réagir ; et pourtant, des régimes stables de coopération y sont possibles, fondés sur d'autres mécanismes dont il faudra tenir compte pour analyser la mise en place et le maintien de systèmes biologiques, sociaux ou économiques coopératifs. Nos simulations ont été menées à l'aide d'un logiciel développé par Jérémie Briffaut au sein de l'équipe *Systèmes Multi-agents et Comportements* du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

Dans le modèle des réseaux de communautés, l'espace social est un graphe dont les nœuds sont occupés par des ensembles d'individus, les communautés. Chaque nœud est assimilé à un groupe (un village, un pays, une entreprise, une catégorie professionnelle, etc.), possédant une « culture » qui définit le comportement de ses membres.

Chaque individu interagit avec les individus de sa communauté (présents sur le même nœud) et avec tous les individus placés sur les nœuds reliés au sien. Lors de ces interactions, des points sont distribués selon des règles équivalentes à celles du *dilemme du prisonnier* : (1) Quand deux individus coopérants entrent en contact, ils tirent chacun 3 points de leur rencontre ; (2) Quand deux individus agressifs entrent en contact, ils obtiennent chacun 1 point ; (3) Quand un individu agressif rencontre un individu coopérant, l'agressif gagne 5 points et l'autre, qui se fait exploiter, ne gagne rien. Le coefficient 5 est parfois remplacé par un coefficient plus élevé qui favorise les individus agressifs.

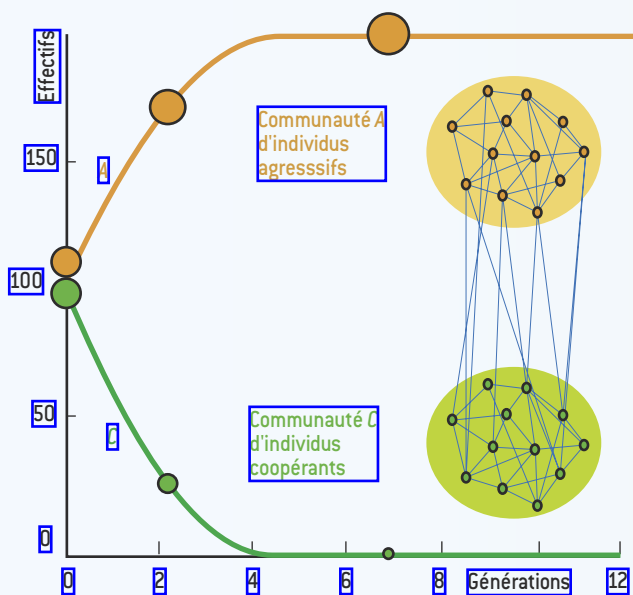
Ce système de rétribution du *dilemme du prisonnier* justifie l'utilisation des adjectifs coopérant et agressif. Il n'incite pas à la coopération, et bien pire, avec ces règles, l'individu agressif gagne plus de points, quel que soit l'individu rencontré :

(a) si l'individu rencontré est agressif, être agressif donne 1 point au lieu de 0 ; (b) si l'individu rencontré est coopérant, être agressif donne 5 points au lieu de 3.

Cependant le problème est plus délicat qu'il n'y paraît, car gagner individuellement à chaque rencontre en adoptant un comportement agressif coûte globalement à la communauté dont on fait partie : en effet, une communauté isolée d'individus coopérants gagne 3 points par individu à chaque rencontre, alors qu'une communauté isolée d'individus agressifs n'obtient qu'un point par individu et par rencontre. L'agressivité est rentable à la condition qu'elle ne se généralise pas et que subsistent toujours de bonnes poires. Dans notre modèle, cet antagonisme entre intérêt personnel et intérêt collectif existe dès que deux individus se rencontrent : chacun a intérêt à être agressif, pourtant si les deux individus coopèrent, ils gagnent collectivement $3 + 3 = 6$ points, ce qui est mieux que s'ils sont tous deux agressifs ($1 + 1 = 2$ points), et même mieux que si l'un se laisse exploiter par l'autre ($0 + 5 = 5$ points).

Les générations successives

Pour évaluer les conséquences des comportements, nous envisagerons une évolution dynamique des communautés : chaque individu totalise le nombre de points qu'il gagne lors de ses rencontres avec les membres de sa communauté et ceux des communautés liées. Ses points comptés, chaque individu se reproduit et a un nombre de descendants proportionnel à la moyenne des points qu'il a tirés de ses échanges (intra-communautaires et extra-communautaires). Si un individu coopérant en rencontre 10 autres et rencontre 20 individus agressifs, il gagne $(10 \times 3 + 20 \times 0) / 30 = 1$ point en moyenne. Cela correspond, par exemple, à un seul descendant.



2. Quand l'agressivité l'emporte

Deux communautés A et C sont liées. La communauté (ou le « nœud ») A est composée de 100 individus agressifs, la communauté (ou le « nœud ») C de 100 individus coopérants. Chaque individu rencontre tous les individus de sa communauté et tous les individus des nœuds voisins.

À chaque rencontre, des points sont distribués (attitudes coopérante contre coopérante donne 3 points à chacune, coopérante contre agressive donne 0 à coopérante et 5 à agressive, agressive contre agressive donne 1 point à chacune). Le nombre de descendants d'un individu à la génération suivante (après toutes les rencontres) est proportionnel à la moyenne de ses gains. Le nombre total d'individus (ici 200) est constant d'une génération à la suivante.

La simulation numérique montre une évolution inéluctable : la communauté agressive l'emporte détruisant l'autre (sur les graphes de cette figure et des figures suivantes, les cercles ont des surfaces proportionnelles aux effectifs des communautés représentées).

Les descendants de chaque individu sont placés sur le même nœud du graphe et constituent la seconde génération. Nous supposons, pour faire les calculs, que le nombre total d'individus sur l'ensemble des nœuds du graphe reste constant d'une génération à la suivante, mais cette hypothèse est sans importance, car ce qui importe est la proportion de coopérants et d'agressifs, proportion qui ne dépend pas du nombre total d'individus présents. Le détail des calculs et des règles d'arrondi est donné sur <http://www.lifl.fr/SMAC/>

Envisageons quelques variantes. (a) Contrairement aux règles de notre modèle, les individus pourraient savoir à qui ils ont affaire avant une rencontre et ajuster leurs réactions en conséquence. (b) Des mutations lors du passage d'un individu à ses descendants pourraient se produire aléatoirement. (c) Des erreurs dans la communication au moment des rencontres pourraient être prises en compte. (d) D'autres « caractères » moins tranchés que « coopérant » et « agressif » méritent aussi l'étude. (e) D'autres règles plus complexes pour le calcul du nombre de descendants seraient intéressantes à étudier. Etc. La compréhension du modèle simple est cependant un premier pas indispensable avant de mener des expérimentations fondées sur des versions plus complexes.

La première génération disparaît donc, remplacée par la deuxième. La deuxième génération engage alors à nouveau un cycle d'interactions – chaque individu rencontrant tous ceux du même nœud et tous ceux des nœuds voisins – ce qui détermine, après bilan comptable des interactions, les effectifs d'une troisième génération se substituant à la deuxième, etc.

Les questions sont : qui des agressives ou des coopérantes va l'emporter, de quelle façon et dans quelles circonstances ? Arrive-t-on toujours à une situation stable ? Quelles seront les propriétés de l'équilibre obtenu quand il y a en un ?

Le conflit à deux

Dans un premier exemple (voir la figure 2), deux communautés A et B sont liées (un graphe à deux nœuds A et B attachés), l'une composée d'individus agressifs, l'autre d'individus coopérants. Pensez à deux pays voisins isolés, le premier possédant une culture telle que ses membres sont agressifs et tirent toujours parti des interactions, alors que l'autre inculque à ses membres une vision confiante qui se traduit par une attitude de coopération systématique et indéfectible.

La simulation numérique dans un tel cas montre une évolution inéluctable : la communauté aggressive l'emporte rapidement et détruit l'autre, la « culture aggressive » absorbe la « culture coopérante ». Le monde résultant fonctionne plutôt médiocrement puisque les interactions entre survivants sont toutes de type aggressive contre aggressive, ce qui donne un revenu moyen de 1 point par interaction, alors qu'un équilibre coopératif donne un revenu moyen de 3 points par individu et par rencontre.

L'évolution de ce monde, en l'absence d'autorité régulatrice ou de motivations morales obligeant à faire passer l'intérêt collectif devant l'intérêt personnel, conduit au dépérissement général. L'avidité incontrôlée d'une partie des individus fait disparaître les tempéraments généreux, ce qui finit par nuire à tous et conduit à une société dure et inefficace, théâtre d'une lutte violente continue.

Un deuxième schéma va nous rassurer (voir la figure 3-1). Nous considérons un graphe où trois nœuds A, C1, C2 sont en ligne : A lié à C1, lui-même lié à C2. Le nœud A n'est habité que par des individus agressifs alors que C1 et C2 sont occupés par des individus coopérants. Les membres de C1 sont exploités par ceux de A, mais pas ceux de C2 qui n'ont aucun contact avec ceux de A et sont « protégés » par ceux de C1.

L'évolution se déroule en deux temps : d'abord le nœud A, profitant des individus de C1, prospère. Puis, lorsque les individus de C1 (exploités par ceux de A) ont perdu la moitié de leur effectif, ceux de A en pâtissent. La communauté C2 profite de la situation et au bout de 20 générations, seuls les individus de C2 persistent : les habitants de C2 continuent à tirer de bons revenus moyens de leurs interactions, qui leur permettent de prospérer, alors que des individus de A, isolés, s'entre-déchirent et disparaissent.

Examinons comment d'autres configurations de communautés déterminent le destin de leurs habitants. Pour une configuration en étoile où une communauté centrale est entourée d'une série de communautés n'ayant de lien qu'avec la communauté centrale (voir les figures 3-2 et 3-3), quand la communauté centrale est aggressive (a), elle élimine les communautés coopérantes ; quand la communauté centrale est coopérante (b) et qu'au moins une autre communauté est coopérante sur une branche de l'étoile, alors celle-ci, protégée, s'impose et, à la stabilisation, est bien plus grosse que les autres (qui dans certains cas persistent à l'état d'embryons).

Graphe aléatoire

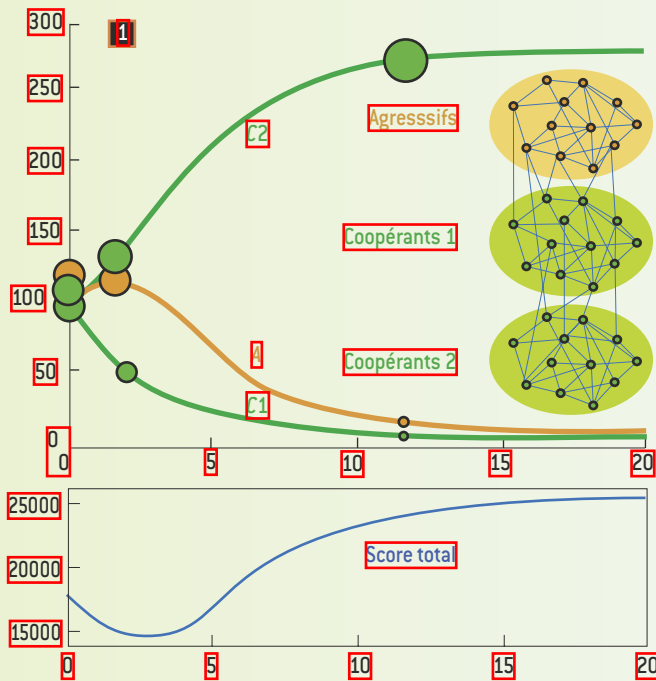
Le monde n'est cependant jamais structuré d'une manière aussi régulière ; aussi avons-nous étudié ce qui se passe lorsque l'on part d'un graphe aléatoire et qu'on place au hasard sur ses nœuds des communautés agressives ou coopérantes.

La figure 3-4 présente l'exemple d'un graphe aléatoire de dix nœuds et son évolution. Chaque nœud est occupé au départ soit par une communauté de 100 individus coopérants (en vert), soit par 100 individus agressifs (en orange). Au total, 1 000 individus sont répartis en 5 communautés coopérantes et 5 communautés agressives.

Les individus agressifs tirent peu de points de leurs interactions internes ; en revanche, ils obtiennent de nombreux points de leurs voisins coopérants qu'ils exploitent de manière éhontée. À la deuxième génération les effectifs des communautés coopérantes ont diminué. Au bout de sept générations, il ne reste plus aucun individu coopérant, certaines communautés agressives qui ont mieux profité de leurs voisins sont plus grosses et le resteront puisque tout est stabilisé. Encore une fois, le monde a évolué vers un système de guerre généralisée entre des individus qui tous se combattent sans merci.

La figure 3-5 montre que l'évolution précédente n'est pas inéluctable. Cette fois, ce sont les coopérants qui l'emportent. Comme dans le cas de l'alignement de trois communautés ou de certaines étoiles, l'existence d'une communauté coopérante isolée, et donc protégée, détermine la quasi-disparition de toutes les communautés agressives. Pour comprendre ces évolutions, d'autres expérimentations étaient nécessaires.

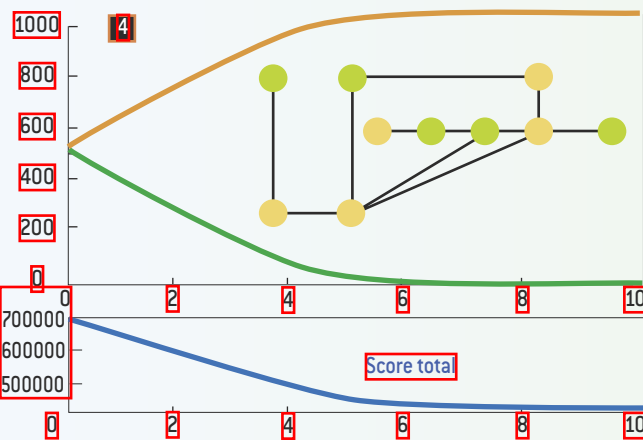
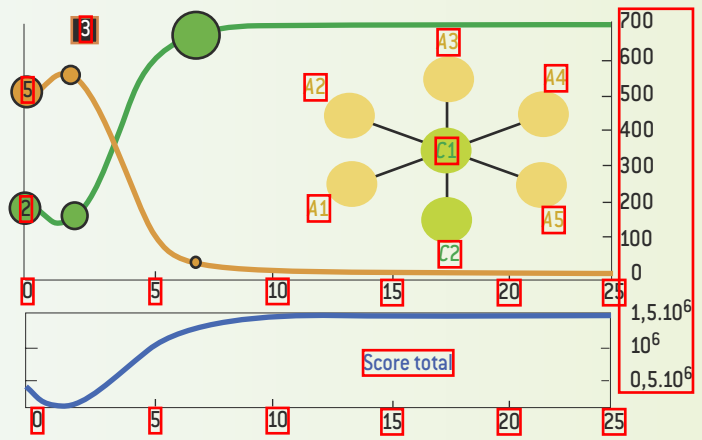
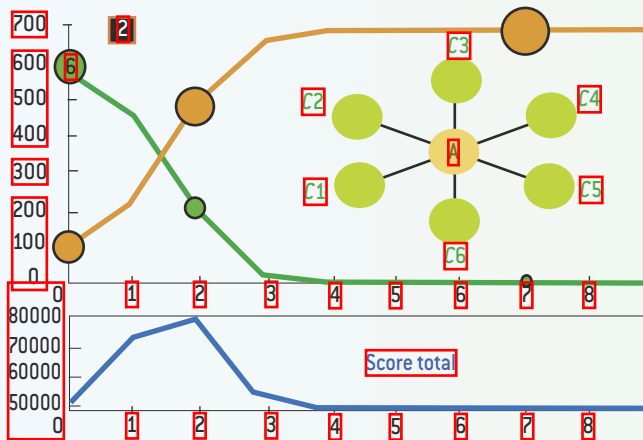
3. Les communautés coopératives font écran



On considère un graphe à trois nœuds A, C1 et C2. Le nœud A est habité par 100 individus agressifs, C1 et C2 sont occupés chacun par 100 individus coopérants. Les règles d'évolution sont les mêmes que sur la figure 2. Dans un premier temps, les individus de C1 sont exploités par ceux de A et leur effectif décroît, alors que le nombre de C2 augmente. Lorsque les C1 exploités sont moins nombreux, les gains de A en population diminuent et son effectif baisse. Le nœud C2 grâce aux bons rapports internes de ses membres poursuit sa progression finissant par s'imposer presque totalement puisque les A s'entre-déchirent et en paient les conséquences. À la fin, ne restent quelques individus sur A et C1, et le nœud C2 domine.

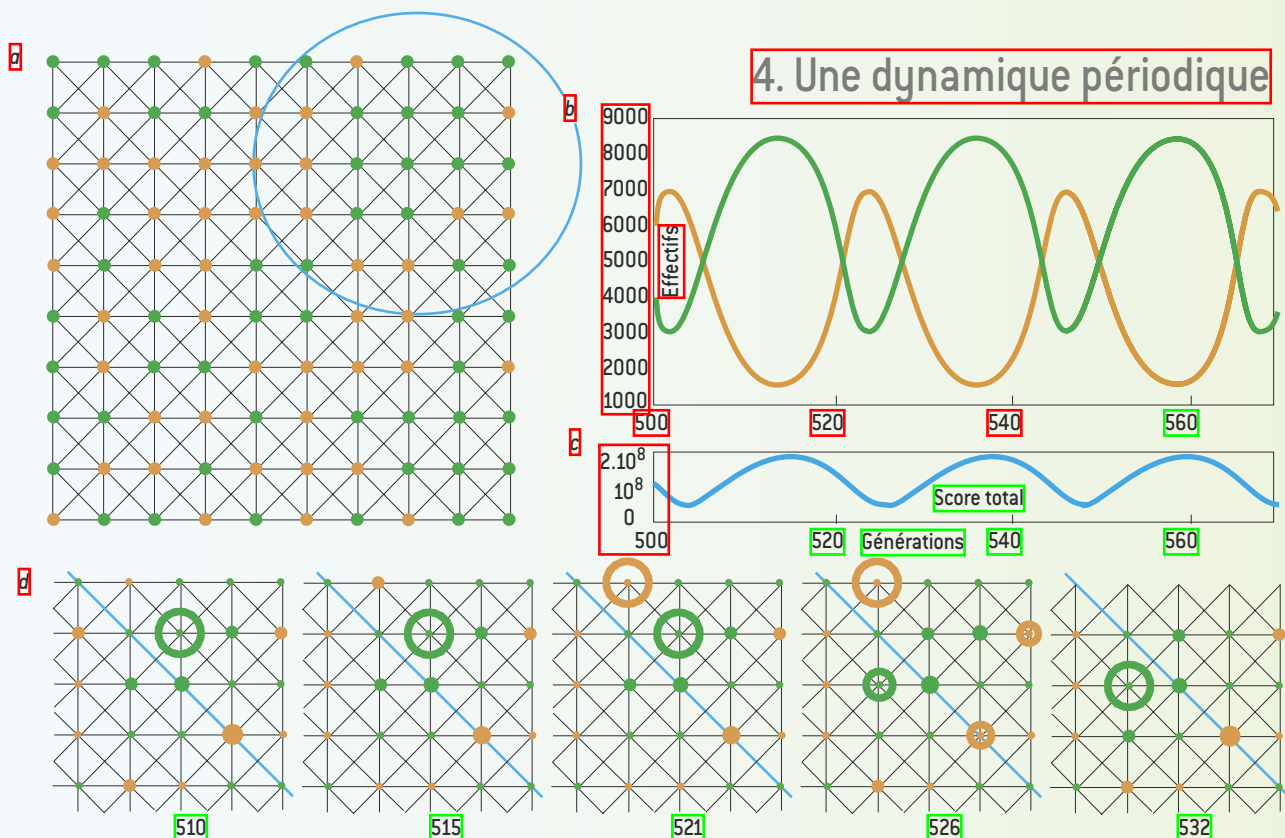
La courbe des scores montre que lors de la première phase, le total des gains (qu'on peut voir comme une mesure de l'efficacité globale du réseau des communautés) baisse, mais qu'ensuite il remonte pour arriver un peu en dessous de ce qu'obtiendrait une communauté de 300 individus coopérants placés sur C2.

Si les effectifs des communautés étaient mesurés par des nombres réels, le nœud C2 atteindrait asymptotiquement un effectif de 300, et les deux autres se videraient entièrement. Avec le système d'arrondi utilisé ici (pour que chaque communauté ait des effectifs entiers), l'évolution s'arrête quand on atteint 12 individus en A, 10 en B.



Occuper la position centrale est déterminant dans les réseaux en étoile. Quand une communauté agressive occupe le centre, elle détruit les autres (2). Quand une communauté coopérante est au centre et qu'au moins une autre se trouve sur une branche (3), celle-ci pros-

père et domine. Lors de la stabilisation de trois communautés, les coopérants prennent le dessus. On a représenté dix communautés, cinq agressives, cinq coopératives à des emplacements aléatoires. La nature de l'équilibre (4 et 5) dépend de la géométrie.



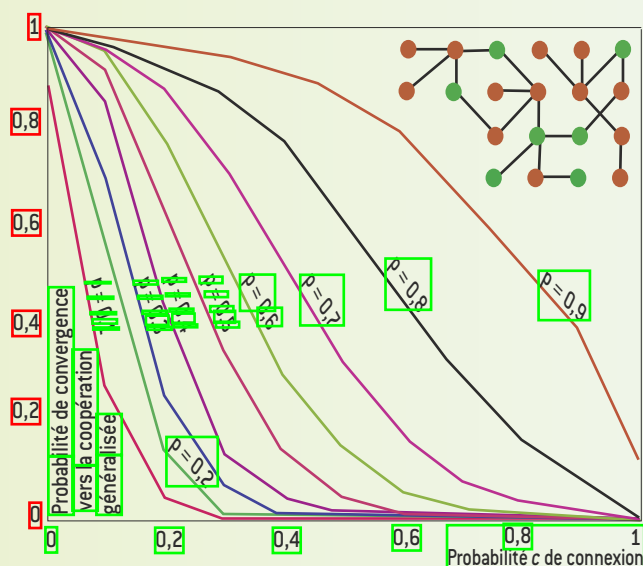
4. Une dynamique périodique

La convergence n'a pas systématiquement lieu vers un état général de coopération ou d'agressivité : dans certaines évolutions les deux types de communautés coexistent. Un autre type de situation se produit parfois : l'évolution vers un état à évolution périodique. Un exemple est décrit ici avec une grille 10×10 , initialisée comme indiqué en (a). Nous obtenons, après 510 générations, une situation périodique dont la période semble de 22 étapes. Le total des individus coopérants oscille sur 22 générations (b) comme celui, complémentaire, des individus agressifs. Une variation des gains totaux en résulte, elle aussi périodique sur 22 générations.

La partie du graphe où se produit l'oscillation (entourée sur le schéma a) est le théâtre d'un subtil phénomène de battement. Au bout de 22 étapes, la situation n'est pas reproduite exactement, mais symétriquement par rapport à une droite oblique (en bleu). Il faut donc, en réalité, 44 étapes pour revenir à la situation de départ. On remarque

que le sous-graphe des communautés non vides qui donnent le cycle possède une structure particulière : chaque communauté coopérante est en contact avec plusieurs communautés coopérantes, mais n'est en contact qu'avec une seule communauté agressive. De plus, chaque communauté agressive n'a qu'un seul contact, bien sûr avec une communauté coopérante qu'elle exploite.

Pendant la première moitié de la période, le deuxième nœud de la première ligne grossit au détriment du gros nœud vert de la génération 510. Celui-ci disparaît presque, ce qui fait fondre le gros nœud rouge. Le groupe central des trois communautés vertes bénéficie alors d'une certaine tranquillité amenant l'expansion d'un nouveau gros nœud vert (symétrique du précédent). Tous les autres nœuds ont évolué symétriquement conduisant à une génération 532 parfaitement symétrique de la génération 510 par rapport à la droite bleue. Cette configuration ramènera, 22 étapes plus loin, au schéma de la génération 510.



5. Résultats des graphes aléatoires

Nous engendrons des graphes aléatoires de 20 nœuds. Pour cela nous plaçons sur chaque nœud une communauté coopérante ou agressive en tirant au hasard : on place une communauté coopérante avec une probabilité p ou une communauté agressive avec une probabilité complémentaire $1 - p$. Les liens entre nœuds du graphe sont aussi choisis au hasard : deux nœuds sont connectés avec une probabilité c : si c est petit, la connectivité du graphe est faible, si c est grand, le graphe comporte de nombreux liens. Nous mesurons alors la probabilité d'évoluer vers un état de coopération généralisée.

Pour une valeur de p (indiquée sur les courbes), plus la connectivité c est grande, plus faible est la probabilité que le graphe évolue vers un état de coopération généralisée. Lorsque p augmente, la probabilité d'évoluer vers un état de coopération généralisée augmente (d'où la succession de courbes de plus en plus hautes).

Nous avons mené une étude statistique de ce type de « monde » sur un graphe en grille de 100 nœuds : chaque nœud est relié à ses huit voisins (horizontaux, verticaux, en diagonal), les bords se rejoignant (grille en forme de tore). On place au hasard des communautés sur les nœuds en faisant varier la proportion p de nœuds occupés par des communautés coopérantes.

Si la proportion initiale p de communautés coopérantes est supérieure à 80 pour cent, alors, dans plus de 95 pour cent des cas, il ne restera au final pratiquement que des coopérants : le monde converge en quelques générations vers un univers de coopération généralisée. Au-dessous de 20 pour cent de communautés coopérantes initiales, l'évolution conduit presque certainement à un monde agressif. Dans un pour cent des essais (p entre 0,4 et 0,7), nous observons des équilibres mixtes où coexistent communautés coopérantes et agressives.

À l'exception de ces équilibres mixtes, la dynamique générale d'évolution est claire : (a) les zones où seuls des individus agressifs sont en contact dépérissent ou ne réussissent pas à croître ; (b) dans les zones où les deux types d'individus se rencontrent, les coopérants disparaissent au profit des agressifs ; (c) les zones où des coopérants ne rencontrent que des coopérants prospèrent. La première phase de l'évolution est une course entre agressifs des zones (b) et coopérants des zones (c) s'il y en a. Cependant, quel que soit l'avantage obtenu par les premiers, s'il y a des individus dans les zones (c), ils finissent par s'imposer et la population finale est composée essentiellement d'individus coopérants localisés dans les zones (c). Bien sûr, en l'absence de zones de type (c), le monde converge vers une guerre généralisée. Un critère permet ainsi de prévoir l'évolution avec un risque d'erreur limité : s'il existe un nœud coopérant protégé (c'est-à-dire en contact seulement avec des nœuds coopérants) alors le monde convergera vers un état de coopération généralisé ; sinon, le monde s'orientera vers un état désastreux d'agressivité tous azimuts.

Les cas d'évolution vers des configurations mixtes échappent à ce schéma. L'un d'eux, décrit sur la figure 4, révèle une complexité inattendue permettant la coexistence dans des conditions subtiles d'équilibre périodique des deux types de communautés dont les effectifs ne se stabilisent jamais.

Erdős-Renyi ou Petit monde ?

Sur une grille, chaque nœud est lié à huit voisins (connectivité 8) et il est probable que cette valeur de la connectivité joue un rôle important. Aussi avons-nous engendré systématiquement des graphes aléatoires dont un exemple et ses conclusions sont indiqués sur la figure 5. Récemment, de nombreux travaux ont montré que les graphes qu'on rencontre dans le monde réel ressemblent rarement aux graphes aléatoires de Erdős-Renyi. Les graphes du monde réel, graphes des liaisons ferroviaires, graphes décrivant les liens entre pages web, graphes des réseaux sociaux, sont en général beaucoup plus contrastés : le nombre de connexions d'un nœud aux autres varie fortement, conduisant en particulier à des nœuds, nommés « hub », qui centralisent un nombre de liens très supérieurs à la connectivité moyenne du graphe. Ces graphes réels, nommés *Petit monde*, ont certaines bon-

nes propriétés : faible distance moyenne entre nœuds, résistance aux pannes, etc. Il est naturel de s'interroger sur leurs capacités à susciter des équilibres coopératifs.

Les expériences donnent un résultat sans appel : pour un nombre donné de nœuds et de liens entre les nœuds et une même proportion initiale de communautés coopérantes, l'évolution sur un graphe de type *Petit monde* conduit plus fréquemment à une situation d'agressivité généralisée que sur un graphe de type Erdős-Renyi. La raison en est sans doute que la structure de *Petit monde* facilite la domination des communautés agressives et nuit à l'existence de nœuds coopérants protégés : des phénomènes sociaux (comme la diffusion rapide d'informations) sont facilités par l'existence des centres dominateurs, mais ils empêchent l'apparition et le maintien d'équilibres efficaces qui ne naissent et ne prospèrent que si certains nœuds se trouvent dans un certain isolement.

Les réseaux de communautés envisagés ici, du fait de leurs simplicités, ne permettent pas de modéliser la formation de groupes fermés et hostiles entre eux (espèces animales, sectes, pays ennemis, etc.) qui sont importants aussi bien dans le monde vivant que social.

Pour modéliser les dynamiques de ces groupes, une méthode consiste à définir deux sortes (ou plus) d'individus capables de se reconnaître : les A et les B. Les A coopèrent avec les A et agressent systématiquement les B. Les B coopèrent avec les B et agressent les A. Partant d'une configuration aléatoire de A et de B placée sur une grille, on assiste à la formation de groupes coopérants composés uniquement de A et de groupes coopérants composés uniquement de B. Ces groupes, bien sûr, se combattent farouchement à leurs frontières, créant des zones désertifiées.

Cette émergence de la coopération « par solidarité de groupes » (récemment étudiée par D. Hruschka et J. Henrich) s'ajoute à l'émergence de la coopération résultant des stratégies réactives du type *donnant-donnant*, et à l'émergence de la coopération du fait des phénomènes que le modèle des réseaux de communautés met en évidence.

Ainsi l'expérimentation informatique aide à découvrir et à comprendre les nombreuses mécaniques collectives dont les groupes d'individus des mondes vivants, sociaux et économiques sont le théâtre et dont l'élucidation détaillée ne peut se passer des simulations réalisées grâce aux calculs massifs que les ordinateurs d'aujourd'hui autorisent.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université de Lille. Rémi DORAT est doctorant au LIFL (CNRS).

R. DORAT et J.-P. DELAHAYE, *Émergence et maintien de comportements coopératifs dans un modèle de communautés en réseau*, Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL), 2006, <http://www.lifl.fr/SMAC/>
J. BRIFFAUT, *Mémoire de DEA*, LIFL, 2004.

D. HRUSCHKA et J. HENRICH, *Friendship. Cliquiness and the emergence of cooperation*, in *Journal of Theoretical Biology*, 239, pp. 1-15, 2006.

R. AXELROD, *The evolution of cooperation*, Basic Books, New York, 1984.

M. NOWAK et R. MAY, *Evolutionary games and spacial chaos*, in *Nature*, 359, pp. 826-829, 29 octobre 1992.

S. BOWLES et H. GINTIS, *Optimal parochialism : The dynamics of trust and exclusion in Network*, 2000 : Santa-Fee Working Paper <http://www.santa-fe.edu/research/publications/wpabstract/200003017>

La cougourdette se dévoile

Les espèces américaines du genre *Cucurbita* étaient connues en France dès 1503, soit à peine dix ans après le voyage de Christophe Colomb.

Environ 19 millions de tonnes de citrouilles, de potirons et de courges sont produits chaque année de par le monde, et pour la plupart en Europe et en Asie. Pourtant, le genre *Cucurbita* (il regroupe les trois végétaux mentionnés) est né sur les continents américains, à l'instar du maïs, et n'a pu traverser l'Atlantique qu'après le voyage de Christophe Colomb en 1492. Avant cette époque, les Européens ne pouvaient pas se régaler de ces fruits, même s'ils connaissaient depuis longtemps les gourdes du genre *Lagenaria*, que Pline nommait... *cucurbita*.

Les botanistes distinguent trois espèces de *Cucurbita*. *Cucurbita pepo*, l'espèce la plus répandue, à laquelle on peut rattacher toutes les variétés de courgettes, ainsi que les pâtissons. *Cucurbita maxima* rassemble les potirons, les potimarrons, et bien d'autres. Enfin, *Cucurbita moschata* et ses variétés telle la courge *Butternut*.

L'iconographie est le meilleur moyen d'établir et de dater la présence d'une espèce dans une région donnée. Ainsi, pour *Cucurbita*, les premières images connues ont longtemps été celles qui apparaissent dans *De historia stirpium* du botaniste Leonhart Fuchs (1501-1566). Ce catalogue de la flore allemande a été publié en 1542, soit 50 ans après la découverte du Nouveau Monde. Plus récemment, des espèces nord-américaines, telle *Cucurbita pepo* et sud-américaines comme *C. maxima*, ont été reconnues dans les ornements de la Villa Farnese, à Rome, réalisés entre 1515 et 1518. S'agit-il de la plus ancienne preuve de *Cucurbita* en Europe ? Non, il y a plus vieux, dans les *Grandes heures d'Anne de Bretagne*.

Anne de Bretagne fut deux fois reine de France, d'abord en épousant Charles VIII, en 1491, puis en épousant son successeur, Louis XII, huit ans plus tard. Elle commanda à l'artiste Jean Bourdichon (1457-1421) de décorer un livre de prières pour son usage personnel. L'ouvrage, réalisé en Touraine entre 1503 et 1508, contient, outre des prières, des calendriers mensuels et des peintures religieuses en pleine page. Chaque prière est ornée d'un décor végétal, parfois accompagné d'insectes ou d'autres petits animaux, faisant des *Grandes heures* un catalogue de plus de 300 espèces végétales. Chaque dessin est complété du nom latin de la plante au-dessus et du nom vernaculaire en dessous.

La prière du folio 161 (voir page ci-contre) est associée à une plante qui se déploie sur un fond doré. On y distingue

trois fleurs ouvertes dont les stigmates (les organes femelles qui reçoivent le pollen) ressemblent à ceux de *Cucurbita pepo*. Les corolles jaune-orangé sont peu évasées, fuselées à la base, et séparées en pétales seulement à l'extrémité terminale. Cette corolle est découpée en six parties. Bien que cinq soit le nombre typique de *C. pepo*, certaines variantes ont six, voire sept, pétales soudés à la base. Le calice est court et constitué de sépales qui s'affinent vers leur pointe. Les ovaires sont situés en dessous de la corolle : ce sont les renflements en forme de poire et qui, après fécondation, donneront les fruits. Ces caractères, ainsi que la forme des feuilles confirment l'identification du végétal : Bourdichon a peint *C. pepo*, dix ans après qu'un Européen l'a vue pour la première fois. Le nom latin, *Colloquitida*, n'a pas survécu aux nouvelles classifications. Le nom français était, à l'époque, *cougourdette*.

Les deux fruits de *Quegourdes de turquie*, le nom vernaculaire inscrit sur le folio (au XVI^e siècle, l'expression « de turquie » traduisait une origine exotique quelconque), sont semblables aux fruits, pourtant protéiformes, de *C. pepo*, mais ressemblent aussi à ceux de *Lagenaria siceraria*. Toutefois, les fleurs de cette dernière plante sont blanches, écartant les *cucurbita* de Pline.

Un examen détaillé révèle que les fruits peints sont rayés longitudinalement : de larges bandes vert-jaune alternent avec de fines bandes bleu-vert. Ce motif n'existe pas chez *L. siceraria*, mais est commun chez les variétés sauvages ou cultivées de *C. pepo*. Le doute n'est plus permis.

Nous pouvons même pousser l'identification jusqu'à la sous-espèce. En effet, la plupart des *Cucurbita* sauvages ont des fruits ronds, à l'exception de *C. pepo texana*, dont certaines variantes ont des fruits rayés en forme de poire. Ces fruits restent néanmoins non comestibles. Aussi, le plant représenté dans les *Grandes heures d'Anne de Bretagne* ne trahit pas un échange transatlantique entre agriculteurs, mais peut-être la cueillette d'un matelot de la *Santa Maria* pendant que le capitaine se croyait aux Indes.

Harry PARIS travaille au Centre de recherches Neveh Ya'ar, en Israël. Michel PITRAT et Marie-Christine DAUNAY travaillent à l'INRA, à Montfavet. Jules JANICK travaille à l'Université Purdue, aux États-Unis.

H. PARIS et al., *First known image of Cucurbita in Europe, 1503-1508*, in *Annals of Botany*, vol. 98, pp. 41-47, 2006.

De nostre Dame de pitie.

Dame trespiteuse vierge
 marie. Je recommande
 au iourduy au sem de ta pitie. mo
 corps et mon ame mes conseilz
 mes desirs mes voluutes et cogita
 tions mes locutions et toutes o
 perations. Aussi les douleurs de
 mon cuer. et toutes mes angoi
 ses et necessites toute mon esp
 rance et ma consolation et tout
 le cours de ma vie et la fin. Et te
 prie tressainte dame et tousiour
 vierge pitieuse que par ta sainte
 intercession ma vie s'adrecisse et se
 dispose selon ta clemence et volute
 de ton filz huaine de rechief te



Quarante de Turquie.

Clac végétal et uppercut de crevette

Certains animaux ou plantes effectuent des mouvements étonnamment rapides, en mettant à profit la mécanique de surfaces courbes semi-rigides.

Pour capturer sa proie ou la tuer, il faut agir vite et fort. Comment le faire lorsqu'on est une plante carnivore, dépourvue de muscles, ou une crevette ? En stockant l'énergie sous forme élastique et en la libérant d'un coup. La dionée attrape-mouches (*Dionaea muscipula*) ferme ainsi ses mâchoires végétales en un dixième de seconde, tandis que la crevette-mante *Odontodactylus scyllarus* assène son « coup de poing » en deux millisecondes (voir les figures 1 et 2). Point commun de ces deux champions de rapidité : ils stockent l'énergie en déformant une paroi élastique courbée.

Dionée : une fermeture... éclair !

Le piège de la dionée se compose de deux feuilles se faisant face. Quand un insecte se pose sur l'une des faces internes de ces mâchoires végétales, celles-ci se referment brusquement et capturent la proie – qui sera ensuite lentement digérée. Comment cette plante produit-elle un mouvement, aussi rapide de surcroît ? Par un mécanisme analogue à celui à l'œuvre dans les fleurs qui s'ouvrent le matin pour se refermer le soir.

Grâce au phénomène d'osmose, les cellules végétales contrôlent leur teneur en eau et leur pression interne en modi-

fiant la concentration intracellulaire de certains ions. Lorsque la concentration ionique à l'intérieur d'une cellule augmente, de l'eau est aspirée vers l'intérieur de la cellule à travers ses parois : la cellule se gonfle. Ce phénomène est réversible, et quand la concentration ionique diminue, la cellule se dégonfle. Dans un pétale, ces deux effets se produisent simultanément : les cellules d'une des faces du pétale se gonflent tandis que celles de l'autre face se dégonflent. La face aux cellules dégonflées devient concave, celle aux cellules gonflées convexe. Ainsi, les modifications de pression cellulaire se traduisent par des mouvements macroscopiques.

Qu'en est-il des cellules de la dionée ? Des observations récentes ont révélé quelques particularités. Les cellules de la face externe des deux feuilles du piège sont très allongées et disposées le long de la surface de la feuille, perpendiculairement à l'axe qui joint les deux feuilles. Les parois de ces cellules sont en outre renforcées par des microfibrilles latérales qui font obstacle à un gonflement uniforme. Tout changement de volume de ces cellules se traduit essentiellement par un allongement. Les cellules de la face interne ne se déforment que très peu, il s'ensuit une modification de la courbure de la feuille, initialement convexe (recourbée vers l'intérieur).

Quand un malheureux insecte touche un cil de la dionée, des cellules mécano-transductrices créent un signal qui sti-



1. La « puce », jouet en forme de calotte que l'on retourne, inverse sa courbure brusquement, ce qui lui permet de sauter en l'air et de réjouir les enfants. Avant cette transition brutale, la surface élastique s'est lentement déformée, jusqu'à atteindre le seuil de la transition. La

dionée, plante carnivore, utilise un phénomène analogue : l'insecte posé sur la face interne de la feuille déclenche une réaction physiologique qui déforme peu à peu les feuilles. Au bout d'un tiers de seconde, la courbure des feuilles franchit un seuil et le piège se referme en un dixième de seconde.

mule les cellules et les fait grossir par osmose. La courbure de la feuille change jusqu'à s'inverser brusquement, piégeant l'insecte entre les deux feuilles.

Mais pourquoi donc cette fermeture est-elle si fulgurante, beaucoup plus rapide que ne le permettraient les transferts d'eau à travers les membranes cellulaires ? Tout s'éclaire quand on fait le rapprochement avec l'inversion de courbure de la puce, ce petit jouet élastique de forme hémisphérique qui saute en l'air quand on le retourne (voir la figure 1). Le principe mécanique à l'œuvre est identique.

Prenons l'exemple d'une feuille plane ; on peut la plier facilement dans un sens ou dans l'autre. Ce n'est pas le cas avec une surface courbe, telle une calotte de sphère. Lorsqu'on cherche à aplatir cette surface en réduisant la courbure selon une direction, on constate qu'elle se replie dans la direction perpendiculaire, ce qui engendre des forces s'opposant à la déformation recherchée.

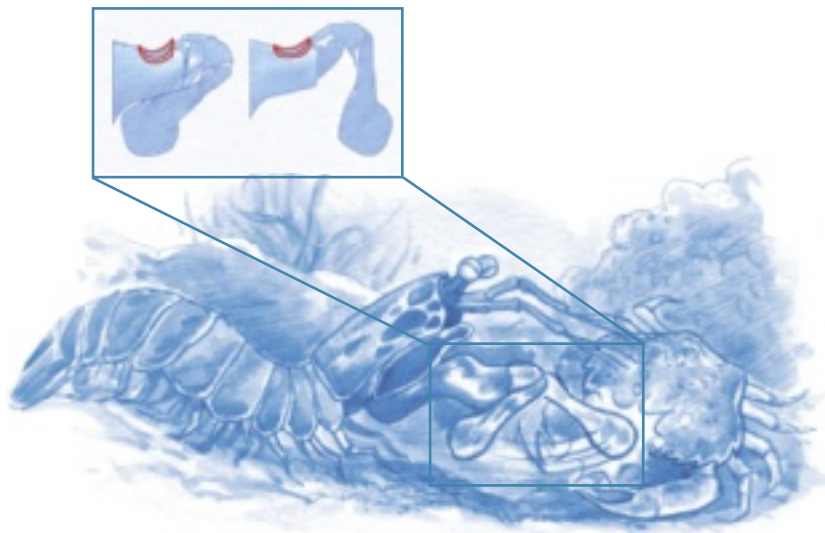
La dynamique de la déformation consistant à inverser la courbure dépend de la nature du matériau. Si celui-ci est très élastique, les forces d'opposition engendrées sont modérées, et par conséquent la courbure diminue et s'inverse progressivement. En revanche, si l'élasticité du matériau est faible, de fortes contraintes naissent et le matériau passe brusquement d'une forme à une autre, de la même façon qu'une poutre en compression ploie soudainement. C'est l'instabilité dite de flambage, transition brutale entre deux formes extrêmes stables.

La vitesse de ce basculement est régie par un seul paramètre, déterminé par les caractéristiques géométriques du matériau (épaisseur, longueur, courbures initiales). Elle est d'autant plus grande que l'épaisseur du matériau est faible et sa longueur, ou sa courbure, élevée. Toutefois, cette rapidité a un prix, car le délai entre l'amorce du mouvement et le basculement augmente aussi.

Pour en revenir à la dionée, la nature est bien faite : la géométrie de ses feuilles correspond au seuil d'instabilité de leurs surfaces. Cet excellent compromis correspond à une phase préparatoire d'un tiers de seconde et à une fermeture en un dixième de seconde. Que la feuille soit moins rigide et la fermeture serait trop lente, qu'elle soit plus rigide et la phase préparatoire durerait trop longtemps : l'insecte s'échapperait.

Une propriété analogue est utilisée par la crevette-mante, qui s'attaque à des crabes et autres petits animaux en perçant leur carapace. Elle a certes des muscles, mais ceux-ci ne peuvent expliquer ses performances spectaculaires. La vitesse de sa frappe varie entre 14 et 24 mètres par seconde, son bras a une vitesse de rotation comprise entre 670 et 990 radians par seconde, tandis que l'accélération peut atteindre 60 à 114 kilomètres par seconde carrée, soit quelque 10 000 fois l'accélération de la pesanteur, le tout ne durant que 2,4 millisecondes !

La puissance nécessaire par unité de masse est de l'ordre de $4,7 \times 10^5$ watts par kilogramme. Elle est au moins 100 fois



2. La crevette-mante assène un coup de patte en deux millisecondes. Pour frapper aussi rapidement, la crevette a au préalable emmagasiné de l'énergie élastique dans un élément de carapace en forme de selle de cheval (en rouge dans le schéma). La frappe correspond à une détente brutale de ce « ressort », relayée par un système de bras articulés pour amplifier le mouvement.

supérieure à celle qu'un muscle peut fournir. Il faut donc au préalable stocker cette énergie. Pourquoi pas sous forme élastique ? Là encore, la tension nécessaire est bien plus élevée que celle supportée par un tendon ou un muscle. Le « ressort » mis en jeu doit par conséquent travailler en compression. Pour agir rapidement, il ne doit pas être massif tout en étant résistant.

L'énergie de la crevette stockée dans une selle de cheval

Une tige ne conviendrait pas, à cause des risques de flambage. Alors quoi ? Comme la dionée, la crevette-mante stocke son énergie dans une surface élastique – ici en forme de selle de cheval. Dans une première étape, cette surface est progressivement déformée au moyen de muscles, et empêchée de reprendre sa forme initiale grâce à un dispositif à cliquet. Dans une seconde étape, le « ressort » se détend et un système mécanique complexe de bras articulés transforme cette détente de faible amplitude en mouvement de grande ampleur. Les deux leviers successifs sont très dissymétriques : le premier, très court, amorce un mouvement de rotation que le second, beaucoup plus long, transforme en mouvement linéaire. La frappe est tellement rapide qu'elle produit de la cavitation, c'est-à-dire l'apparition de bulles au sein de l'eau, phénomène qui participe sans doute à l'endommagement de la carapace de la proie.

Y. FORTERRE et al., *How the Venus flytrap snaps*, in *Nature*, vol. 433, pp. 421-425, 2005.

S. N. PATEK et al., *Deadly strike mechanism of a mantis shrimp*, in *Nature*, vol. 428, pp. 819-820, 2004.

Histoire des sciences

Histoire des femmes scientifiques de l'Antiquité au XX^e siècle

Éric Sartori (443 pages, 24 euros), Plon, 2006.

Voici un plaidoyer passionnément écrit et totalement convaincant du sort fait aux femmes à travers l'histoire quand elles veulent s'occuper de sciences. On les a ignorées au mieux, on les a persécutées au pire. Dans une introduction où est dressé le bilan affligeant de la misogynie qui, selon les périodes et les pays, a rendu la société humaine hémiplegique, É. Sartori dénonce ce sort fait aux femmes dans la mémoire collective aujourd'hui, en rappelant combien il était courageux pour certaines de s'affirmer femme savante. Et de nous citer certaines phrases explicites de grands hommes quant à leur opinion sur l'insuffisance intellectuelle des femmes, que l'on songe à Kant lui-même, ou Cabanis, pourtant tant protégé par Madame Helvétius à la fin du XVIII^e siècle, ou encore Darwin, dont la théorie de l'évolution, en faisant appel à la seule compétition, sert le sexe masculin plus apte à la lutte physique. Après avoir rappelé le sort fait à des milliers de femmes brûlées comme sorcières dans toute l'Europe, aux temps intolérants de ce début du XVI^e siècle (la « Renaissance »...), l'auteur expose les théories successives à caractère soi-disant scientifique qui voulaient illustrer ou mieux expliquer l'infériorité du cerveau féminin.

Cette histoire lamentable de la moitié de l'humanité savante s'achève, dit É. Sartori, optimiste, à notre « époque bénie » où les filles ont accès à l'instruction. Encore que ! Pour ne parler que d'un aspect, des études récentes tendent à montrer que la mixité des classes (considérée aujourd'hui comme de la plus élémentaire modernité) serait dommageable pour l'épanouissement des filles. Confrontées à une compétition de type masculin, elles ne pourraient trouver facilement la confiance suffisante pour s'engager dans des études scientifiques de haut niveau. Une étude sur cette question, qui supposerait d'accepter le principe de classes expérimentales non mixtes, serait bienvenue dans notre pays.

L'égalité la plus souhaitable ne passe pas, en effet, par une uniformité absolue, mais laisse ses chances à chacun et chacune selon ses aptitudes. Loin s'en faut de mettre les femmes dans une catégorie minoritaire. Non, les femmes

sont et resteront tout simplement la moitié de l'humanité, mais une moitié qui devrait être plus écoutée et mieux comprise. La longue et si exclusive domination masculine ne finit-elle pas par créer une menace sérieuse pour la planète ? L'avenir de l'humanité est peut-être alors dans les mains des femmes. Un exemple est particulièrement explicite sur ce qu'il faudrait rééquilibrer. Citant la biologiste Lynn Margulis, l'auteur souligne que, à l'heure actuelle, le but qui motive les physiciens plus que les physiciennes est la recherche d'une théorie unitaire. Or celle-ci passe par une compétition effrénée des théories (et des théoriciens) et par une course dans la construction d'accélérateurs coûtant des milliards d'euros. Les retombées de cet énorme pan de l'activité scientifique sont rares alors que l'humanité est confrontée à la pollution, à la surpopulation, à la famine, à la dégradation des sols, à la déforestation et à la perte de biodiversité... En science comme ailleurs, les hommes sont nombreux qui attribuent avant tout de l'importance aux phénomènes de compétition et de concurrence (théorie de l'évolution oblige) plutôt qu'aux phénomènes de coopération ou de symbiose auxquels les femmes sont plus sensibles.

Deux parties composent la seconde moitié de l'ouvrage. La première est une histoire générale des femmes scientifiques de l'Antiquité au XVIII^e siècle. La seconde va de la Renaissance jusqu'au XX^e siècle. É. Sartori y explore les disciplines avant de terminer sur un chapitre consacré aux sages-femmes. La fin de l'ouvrage est un peu abrupte, mais suivie d'un hommage touchant à toutes ces femmes qui ont eu un nom, mais sont aujourd'hui ignorées sauf de quelques spécialistes. La bibliographie est succincte et très générale, mais suffit pour convaincre, et donner envie d'y aller voir. Un index manque, ce qui limite l'utilité de l'ouvrage.

Voilà un livre à mettre d'urgence entre les mains des jeunes filles afin que cet impressionnant héritage de science et de courage les pousse à embrasser une carrière scientifique, et entre les mains des hommes de pouvoir, afin de leur faire penser à un autre point de vue que celui qui, systématiquement, favorise la seule compétition. À tous, il profitera, car il est temps de prendre conscience de l'importance de l'œuvre méconnue de la moitié de l'humanité savante. Voilà un livre de conviction plus que d'étude. Mais beaucoup de travaux d'historiens, d'historiennes et de sociologues (des deux sexes !) sur la formation intellectuelle des femmes scientifiques et leur place dans la société, dans le passé comme aujourd'hui, sont là pour compléter.

Danielle Fauque, GHDSO, Université Paris XI



Neurosciences

Le cerveau gourmand

André Holley
[254 pages, 21,90 euros],
Odile Jacob, 2006.

Où est la modernité dans le fait alimentaire ? En cuisine, la santé est une vieille lune. « De tes aliments, tu feras ta médecine », disait déjà Hippocrate (-460 à -377) ; plus tard, les cuisiniers Platine (vers 1500), Marin (auteur de la *Suite des Dons de Comus*, 1742), et d'innombrables autres montrent comment on n'a cessé de suivre le précepte hippocratique, avec des interprétations variées... L'obésité, en revanche, est un fait moderne, dont on sous-estime la gravité. Une étude montre que, malgré le célèbre « régime méditerranéen », malgré le fameux « paradoxe crétois », c'est sur le pourtour méditerranéen que l'obésité sévit aujourd'hui le plus en Europe. En Crète, pays du paradoxe sus-mentionné, la prévalence de l'obésité atteint 36 pour cent chez les enfants de 12 ans...

Pourquoi ? Les comportements humains sont à chercher dans le cerveau, lequel est indissociable de l'équipement sensoriel dont l'évolution nous a pourvus. André Holley, un des meilleurs spécialistes de neurobiologie, pour le versant de l'olfaction (laquelle contribue à la sensation du « goût »), publie un livre à jour, clair, précis, sur ces questions. Un livre qui fait date, parce que sa discipline, et les disciplines connexes, se

développent de façon explosive, après des décennies de stagnation. Du reste, le prix Nobel de physiologie a été donné il y a peu pour la découverte des récepteurs olfactifs.

A. Holley narre les avancées en détail, avec précision. Il donne l'intelligence de la chose, au propre et au figuré. Seul point discutable : la multiplication inutile des termes. La science gagnerait à la disparition du mot « flaveur », inutile en français puisque « goût » suffit pour décrire la sensation synthétique que nous avons quand nous mangeons quelque chose. Elle gagnerait aussi à ce que soit réduite l'acception du mot « arôme » : étymologiquement, il s'agit de l'odeur agréable d'une plante, nommée en conséquence « aromate ». L'odeur d'un vin, ce n'est ni son arôme ni son parfum, mais son bouquet ; et en bouche, il y a son goût. En outre, le mot « arôme » n'est pas utile pour désigner l'odeur que l'on perçoit quand des molécules odorantes – les mêmes que celles qui passent par le nez – passent par les fosses qui font communiquer l'arrière de la bouche avec le nez. Adeptes de l'économie des termes, le franciscain Guillaume d'Ockham (XIII^e siècle) ne disait-il pas : « Les entités ne doivent pas être multipliées sans nécessité » ?

Peu importe : si vous voulez découvrir les clés de nos comportements alimentaires et les bases de la gourmandise, lisez *Le Cerveau gourmand*.

Hervé This, INRA

ANDRÉ HOLLEY
LE CERVEAU
GOURMAND



Astronomie

L'espace, les plus belles images

Volker Kratzenberg-Annies
[280 pages, 45 euros],
La Martinière, 2006.

Publié par le même éditeur que la célèbre *Terre vue du ciel* de Yann Arthus-Bertrand, ce magnifique ouvrage, constitué d'une collection de clichés issus pour la plupart de l'Agence spatiale européenne, prend en quelque sorte la relève en s'éloignant progressivement de notre planète. Chaque image est agrémentée d'un bref descriptif qui décrypte le cliché et met en perspective son intérêt.

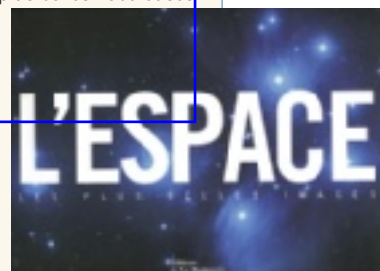
La première partie se focalise sur des images de notre planète telle qu'elle est observée par tous les satellites qui nous survolent pour anticiper les catastrophes climatiques, surveiller l'agriculture, rechercher des ressources naturelles. Pour chaque thème, sont rassemblés des clichés étonnants aux couleurs psychédéliques et regorgeant de détails. La deuxième partie nous entraîne vers le monde déroutant de l'impesanteur.

et le lecteur suit apprentissage, vol et retour sur Terre des spationautes. La troisième partie explore nos voisins du cosmos par le biais des sondes spatiales ayant revisité récemment les planètes du Système solaire. Une fraction importante du voyage est consacrée à la sœur jumelle de la Terre, Mars.

Les images en relief de cette planète sont particulièrement spectaculaires : le luxe de détails atteint par les sondes récentes nous rend les paysages martiens familiers. La dernière partie de l'ouvrage est consacrée au voyage ultime dans le temps et l'espace, et conduit le lecteur à un survol des plus belles nébuleuses planétaires, des pépinières d'étoiles dans notre galaxie, mais aussi de superbes images de galaxies proches ou lointaines vues par le télescope spatial.

Impressionnants, les progrès récents de l'imagerie numérique se traduisent par des images de la Terre et de ses environs d'une beauté étonnante.

Christophe Pichon, IAP, Paris





Climats et météorologie

Louis-Marie Berthelot
(80 pages, 14,50 euros), Fleurus, 2006.

Qu'est-ce que le climat ? Et les phénomènes météorologiques ? Pour répondre à ces questions, cet ouvrage allie le support classique, le papier, au support moderne, le DVD. Le premier propose des textes scientifiques, simples, précis et bien illustrés. En complément, Le DVD présente des films commentés d'une grande qualité. Une réalisation qui accorde une place importante à l'aspect visuel.

Les instruments de l'astronomie ancienne

Philippe Dutarte (294 pages, 30 euros),
Vuibert, 2006.

Ces beaux objets que sont sphères armillaires, anneaux astronomiques, astrolabes, quadrants ou nocturlabes vous dévoilent leurs secrets et leur histoire. Vous comprendrez non seulement comment ces instruments fonctionnent et ce qu'ils indiquent, mais aussi qui les a inventés ou utilisés, et quelle conception avaient ces personnages de l'Univers. À la fois historique et scientifique, le propos est informatif, précis et abondamment illustré – en noir et blanc.



Aventures stratégiques et logiques

Dennis Shasha (186 pages, 19,90 euros),
Odile Jacob, 2006.

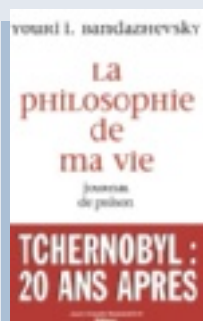
L'auteur est professeur d'informatique à l'Université de New York. Cette traduction française de ses problèmes plaira à ceux qui aiment faire de la science un jeu. On y découvrira comment attraper un ours polaire, comment repérer qu'un témoin ment, vérifier un code ADN, etc. Aucune connaissance n'est nécessaire pour résoudre les problèmes proposés, mais on peut quand même s'y casser la tête.



La philosophie de ma vie

Youri Bandazhevsky (320 pages, 21 euros),
Jean-Claude Gawsewitch, 2006.

Si vous avez suivi l'affaire de l'arrivée en France de Youri Bandazhevsky, cette œuvre vous intéressera. Y. Bandazhevsky est un chercheur biélorusse, à qui son activité intempestive de recherche sur les suites de Tchernobyl a valu la prison dans son pays. Il a recouvré sa liberté en août 2005, et envisage d'immigrer en France, où l'organisation non gouvernementale CRIIRAD tente de l'aider à fonder un laboratoire. Ce livre au titre improbable traduit la réflexion d'un chercheur emprisonné, qui, avec de très faibles moyens, a développé une recherche originale restée controversée sur les pathologies liées à l'ingestion d'aliments contaminés.



Épistémologie

Genèse et développement d'un fait scientifique

Ludwik Fleck (322 pages, 25 euros),
Les Belles Lettres, 2005.

Étonnons-nous du titre même de cet ouvrage. Comment peut-on seulement parler de la genèse d'un fait scientifique ? Nous avons l'habitude de considérer les faits comme donnés et indépendants de nous : c'est ce dogme que conteste Ludwik Fleck (1896-1961) dans son ouvrage dont voici la première traduction française.



En 1935, ce médecin et biologiste polonais publiait ce livre dont les analyses frappent encore par leur actualité. À l'encontre d'une conception naïve, Fleck soutient que les prétendus faits scientifiques sont le fruit d'une construction collective. Ainsi, loin de préexister au travail des savants, l'objet sur lequel porte la science dépend d'une communauté scientifique (un collectif de pensée), elle-même orientée par un contexte culturel (un style de pensée).

Ce qui surprend dans cette analyse, c'est aussi l'originalité des exemples sur lesquels elle repose. Fleck fonde ses réflexions sur une étude historique de la syphilis et en particulier du test de Wassermann destiné à la dépister. Cette maladie, qui apparaît avec ce test comme un fait incontestable, Fleck la présente au contraire comme une « unité nosologique éthique-mythique » tributaire de jugements liés à la sexualité, à la mort, au sang. Le lecteur pourrait être déconcerté : la syphilis ne se manifeste-t-elle pas par des symptômes existant par eux-mêmes et bien définis ? Fleck ne le nie pas, mais il montre comment la constitution de ces symptômes en un syndrome est élaborée en fonction des intérêts de la collectivité, de ses représentations morales, de questions de santé publique.

Fleck remet donc en cause l'idée d'une science comme domaine de l'objectivité pure, et il montre la continuité qui existe entre science et pensée du sens commun. Cette continuité apparaît par exemple dans le cas de la vulgarisation scientifique qui est cette diffusion de la science dans des « cercles ésotériques », diffusion au cours de laquelle les vérités scientifiques se chargent toujours plus de représentations populaires. Ces analyses mettent également en lumière le caractère continu de l'évolution historique de la science.

Doit-on alors en conclure qu'il n'y a pas de vérité scientifique objective ? Certes, Fleck conçoit la vérité comme « un événement de l'histoire de la pensée », mais il ne pense pas pour autant que la vérité soit arbitraire. Au contraire, il s'exerce selon lui à chaque instant sur la communauté scientifique une force contraignante et « conforme à un style », force qui donne à la vérité une assise objective. Tout en tenant compte des conditions pragmatiques réelles d'élaboration de la science, le point de vue de Fleck n'est donc ni relativiste ni sceptique. La vérité émerge d'une réalité objective, mais mouvante, comprenant le sujet, le monde et le style de pensée.

Étienne Brun-Rovet et Sabine Plaud, Université Paris 1

Préhistoire

À la découverte des fresques du Tassili

Henri Lhote (288 pages, 25 euros),
Arthaud, 2006.

Il est toujours agréable de voir rééditer les ouvrages fondamentaux d'une discipline. Les étudiants et le grand public ont à nouveau accès à un livre qui n'était plus disponible que sur les rayonnages des bibliothèques spécialisées. *À la découverte des fresques du Tassili* est à l'origine de bien des vocations. Best-seller paru en 1958, ce livre répond à l'engouement du grand public pour l'art rupestre saharien. Son succès doit beaucoup aux talents de conteur du préhistorien Henri Lhote. Il s'agit du récit de la mission qui, de 1956 à 1957, a redécouvert et relevé les peintures du Tassili-n-Ajjer. Peintures qui font partie aujourd'hui de notre mémoire collective. Construit de façon linéaire, comme le récit d'une aventure de 16 mois, le livre déroule sur 18 chapitres une série de portraits et d'anecdotes, prétextes à des réflexions scientifiques de haute volée. Le véritable héros, c'est bien sûr le désert, qui reste dangereux : plusieurs fois, la mission frôle le drame. Les autres héros, ce sont les Touaregs, en particulier le fidèle Djébrine, pisteur hors pair et compagnon indispensable. L'ouvrage s'achève par deux chapitres qui règlent leur compte à certains mythes (l'Atlantide) et proposent une classification des peintures rupestres, inspirée de Théodore Monod. Bien sûr, la réalité fut loin d'être aussi romantique. Les anciens de la mission Lhote ne gardent pas tous un bon souvenir de leurs relations avec le Maître. Mais le lecteur n'a pas besoin de savoir tout cela, et ne doit pas boudier son plaisir.

En revanche, nous ferons de sérieuses réserves sur le parti pris éditorial, qui consiste à rééditer des textes majeurs sans aucun appareil critique. Ce qui pourrait tromper le lecteur et lui laisser penser qu'*À la découverte des fresques du Tassili* reste un ouvrage d'actualité. Or il est évidemment dépassé. La science préhistorique a progressé depuis : les techniques de relevés se sont améliorées, certaines théories se sont révélées fausses, telle l'influence égyptienne sur l'art du Tassili. Les relevés d'Henri Lhote, exemplaires à son époque, sont aujourd'hui considérés comme incomplets et lacunaires. Sa chronologie est fortement discutée. Et ses interprétations raciales, comme la recherche de « types européens » et de « types négroïdes » sur les parois des abris, n'ont plus beaucoup de sens à l'heure actuelle. Henri Lhote appartient à l'histoire de la recherche. Ce n'est pas lui rendre service que d'en faire un dieu aux écrits dogmatiques et intouchables.

Romain Pigeaud, Département de préhistoire,
Muséum national d'histoire naturelle, Paris



La formation du couple

Michel Bozon, François Héran (267 pages, 16 euros),
La Découverte, 2006.

Ces six articles sont aujourd'hui devenus des classiques en sociologie de la famille. Ils sont presque tous parus dans la revue *Population*, et se rapportent à la population française des années 1980. Comment découvre-t-on son conjoint ? Quelles qualités physiques attirent ? Le mariage est-il source de mobilité sociale ? Pourquoi les femmes épousent-elles des hommes plus âgés ? Les raisonnements menés pour répondre à ces questions sont sociologiques, c'est-à-dire que les critères du choix matrimonial sont déduits de l'observation de tendances statistiques. Intéressant, mais les psychologues ont aussi leurs méthodes, et les biologistes attribuent pour leur part une importance aux phéromones. Et le hasard ? Quel rôle joue-t-il ?

Les femmes et la science

Gérard Chazal (136 pages, 16 euros),
Ellipses, 2006.

Ce livre est un hommage rendu aux femmes. À celles qui ont œuvré pour l'avancée des savoirs scientifiques et que l'on a trop souvent oubliées. Au fil de la lecture, nous prenons conscience à quel point depuis l'Antiquité, de très grandes figures féminines se sont battues contre des obstacles culturels, idéologiques et sociaux pour se faire une place dans le milieu trop masculin des sciences. Et pourtant, leurs apports en astronomie, mathématique, physique, chimie, biologie et médecine sont incontestables.



Les nanosciences

1. Nanotechnologie et nanophysique

Marcel Lahmani, Claire Dupas, Philippe Houdy
(735 pages, 49,50 euros), Belin, 2006.

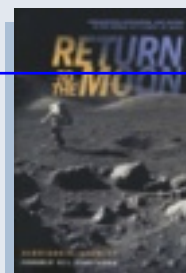


Les nanotechnologies seraient dangereuses pour l'humanité. Vous voulez juger ? Pour cela, consultez cette synthèse (nano) scientifique, qui vous dira l'essentiel de ce qui est bien établi en (nano) physique, (nano) technique (nanotechnologie), sur les nanomatériaux et leur nanochimie. Un tome nanobiologie est en préparation pour 2007. Plus précisément, elle vous renseignera sur les principales méthodes des nanosciences, sur les nano-objets et les nanomatériaux bien connus. L'ouvrage s'adresse à tous les ingénieurs et les étudiants ayant besoin d'un ouvrage de référence sur ce domaine d'actualité.

Return to the Moon

Harrison Schmitt (336 pages, 22,95 euros),
Springer, 2006.

D'ici dix ans ou moins, nous devrions avoir des lignes de production de transporteurs lunaires, un système de production d'énergie fondé sur la fusion de l'hélium 3, et des installations lunaires minières ; d'ici 20 ans, nous aurons complété par une usine lunaire de production d'hélium 3 ; d'ici 25 ans, nous devrions en être à notre cinquième année d'exploration de Mars... Vous n'y croyez pas ? Lisez ce livre en anglais du sénateur et ancien astronaute Harrison Schmitt : après, vous n'y croirez peut-être pas plus, mais vous saurez ce que pensent ceux qui veulent coloniser l'espace.



Biologie

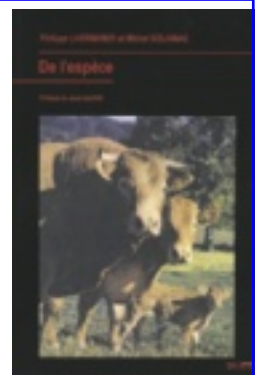
De l'espèce

Philippe Lherminier et Michel Solignac
(694 pages, 30 euros),
Syllepse, 2005.

Tout, vous saurez tout sur l'espèce au terme de la lecture de cette trilogie (puisque les auteurs l'ont divisée en trois grands chapitres, chacun intitulé « livre »). Pourtant, vous ne saurez toujours pas ce qu'est l'espèce et c'est là tout l'intérêt de cet imposant ouvrage ! L'espèce a pourtant été souvent définie (146 citations sont listées à la fin du livre I) et souvent proclamée résolue par les concepts philosophiques ou scientifiques qui se sont succédé de l'Antiquité à aujourd'hui. Les espèces évoluent, mais chacun veut une définition de l'espèce qui soit immuable. La notion d'espèce nous échappe donc encore, et finalement, peu de gens en sont conscients. Même les scientifiques qui utilisent régulièrement cette notion indispensable dans leur spécialité (biologie, paléontologie, génétique, etc.) ne font nécessairement de façon excessivement réductrice, partielle et souvent faussée. Il faut pourtant être scientifique (comme le sont les deux auteurs, généticiens et évolutionnistes), et surtout philosophe, pour oser s'aventurer dans le vaste monde de l'espèce.

Après un long rappel historique (d'Aristote à Gould en passant bien sûr par Lamarck, Cuvier et Darwin), le livre II est une encyclopédie des relations qui constituent ce qu'est l'espèce : la ressemblance (anatomique, caryotypique, biochimique, etc.) et la mesure de ces ressemblances, la

descendance, l'interfécondité, et l'environnement. Un chapitre, clair et concis, sur la nomenclature et le vocabulaire liés à la notion d'espèce fait la transition avec le livre III. Celui-ci, le plus court (plus de 100 pages tout de même !), mais sans doute le plus intéressant sur les plans scientifique et philosophique, développe les notions de reproduction, transformation, sélection, variation, spéciation et montre que « L'évolution, loin d'être la dissolution des espèces, est au contraire la recherche passionnée de l'ordre le plus performant ».



Cette imposante synthèse, qui fera vite référence dans les milieux scientifiques et universitaires, est écrite dans un style très littéraire, riche en envolées philosophiques. Des notions parfois difficiles de génétique des populations se lisent comme une histoire, faite de *come-back* et d'humour, ce qui change des austères ouvrages d'enseignement sur la question. Cependant, la masse d'informations fournies est telle et le style philosophique parfois si élevé que ce livre se doit d'être lu, soit d'une traite mais en prenant son temps, soit par centres d'intérêt aisément retrouvés grâce aux sommaires détaillés des trois livres. En conclusion, un ouvrage d'une richesse exceptionnelle pour les passionnés des mystères de l'évolution, et une excellente référence pour les enseignants et les étudiants en histoire des sciences, en philosophie ou en sciences dites dures.

Gaël Clément, Université d'Uppsala, Suède

POUR LA SCIENCE

8 rue Férou, 75278 PARIS CEDEX 06 • Tél : 01-55-42-84-00 • www.pourlascience.com
Commande de dossiers ou de magazines : 08-92-68-11-40

POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction - Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Pour la Science :

Rédacteurs en chef adjoints : Maurice Mashaal, Loïc Mangin
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe,
Bénédicte Salthun-Lassalle

Dossiers Pour la Science :

Rédactrice en chef adjointe : Bénédicte Leclercq

Génies de la Science :

Rédactrice : Marie-Neige Cordonnier

Cerveau & Psycho :

Rédacteur : Sébastien Bohler

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacqueten,
Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,
Pascale Thiollier-Dumartin, Aurore Carlier
Site Internet : David Martin

Marketing et Publicité : Philippe Rolland et Marina Ballini

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry

Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Christine de La Rochère
et Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directeur de la publication et Gérant : Marie-Claude Brossollet

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro : Jacques Abraini,
Georges Boudon, André Delacourte, Evelyne Host-Platret,

Alain Lecavelier des Etangs, Pierre-Hervé Luppi,

Christian Jeanmougin, Christophe Pichon et Christophe Vérinaud.

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon : Tél. : 01 55 42 84 04

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr)
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Télécopieur : 01 43 25 18 29

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal,
Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Editions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Mariette D. Christina, Ricky Rusting, Philip Yam, Gary Stix, Michelle Press, Wayt Gibbs, Mark Alpert, Steven Ashley, Graham Collins, Steve Mirsky, George Musser, Christine Soares. Chairman Emeritus: John Hanley. Chairman: John Sargent. President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraber. Vice-President: Dean Sanderson and Frances Newburg.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

