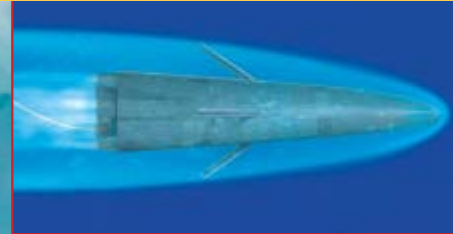


La vie sur les îles antarctiques

La supercavitation



Les libérations de la Lune



Prothèses dentaires étrusques





BLOC-NOTES

DIDIER NORDON

La pierre philosophale

Lorsqu'un scientifique reproche à un philosophe d'écrire de façon inaccessible, le second retourne volontiers le compliment : lui non plus ne sait se faire bien comprendre.

Certes. Dire cela, pourtant, c'est faire fi d'une dissymétrie fondamentale. On peut vivre sans se soucier des particules élémentaires ou du théorème de Fermat, on ne peut pas vivre sans se soucier du sens de la vie et de la mort, de la façon dont on doit agir, etc. Autrement dit, si le scientifique se pose des questions propres à la science et souvent fort techniques à énoncer, le philosophe, lui, se pose des questions communes à tous les hommes, quelle que soit leur culture. Or, si le philosophe traite de questions qui nous hantent, la moindre des choses est qu'il les aborde clairement.

Reconnaissons qu'il y a une injustice. Le scientifique a le droit de ne pas se faire comprendre de tous sans qu'on doive aussitôt le soupçonner de trahir sa mission. Pas le philosophe. En cela, le métier de philosophe est plus exigeant que celui de scientifique. Du moins, il devrait l'être.



Des mots pour le rire

Certaines personnes multiplient les jeux de mots dont elles sont les premières à dire, avant même qu'on ait eu le temps de ne pas rire, qu'ils sont lamentables. Pourquoi cette étrange habitude? La réponse est simple : le plaisir de ces personnes réside non dans le jeu de mots, trop consternant en effet pour amuser qui que ce soit, mais dans le fait d'annoncer elles-mêmes qu'il ne vaut rien. En proclamant : «Je sais, oui, ce que je viens de dire est nul», elles espèrent que l'interlocuteur comprendra : «Voilà quelqu'un qui sait se juger avec impartialité, donc qui doit pouvoir bien faire quand il le veut.» Par malheur, plus le jeu de mots est faible, plus on a de

chances d'être cru quand on donne à entendre qu'on vaut mieux que lui : les pires jeux de mots ont encore de beaux jours devant eux.

Ralentissement de l'histoire?

On ne sait pas encore ce que fera le XXI^e siècle, on sait déjà ce qu'il ne fera pas. Par exemple – à moins de trouver le moyen de faire arriver les gens avant qu'ils ne soient partis –, il n'abrégera pas le voyage de Paris à Pékin d'autant de temps que le XX^e siècle l'a abrégé par rapport au XIX^e : plusieurs mois au début du XIX^e, quelques heures à la fin du XX^e. À défaut d'une diminution sensible en valeur absolue, peut-on s'attendre à une diminution relative? Guère plus. Pour que, dans nos psychologies, le bouleversement soit aussi spectaculaire entre le XXI^e siècle et le XX^e qu'il l'a été entre le XX^e et le XIX^e, il faudrait que la durée du trajet Paris-Pékin descende à un quart d'heure, formalités et embarquement compris. N'y comptons pas. La vitesse des voyages, parions-le, ne va plus augmenter que de façon marginale.

Sans que la situation soit aussi nette, il est probable que le stockage des informations va buter sur le même genre de limitation. Les capacités actuelles sont quasi infinies. À supposer que le XXI^e siècle les rende infinies pour de bon, cela ne changera probablement pas grand-chose de plus ni à nos vies ni aux possibilités qui nous sont offertes.

Le XX^e siècle a hésité quant à l'image qu'il devait se faire de lui-même. Tantôt, il a proclamé avoir atteint la «fin de l'histoire». Tantôt, confondant l'évolution de plus en plus rapide des techniques avec une évolution de plus en plus rapide des mœurs et des systèmes politiques (la seconde est pourtant loin d'avoir été aussi manifeste que la première), il a prétendu que l'histoire s'accélérait. Peut-être le XXI^e siècle saura-t-il faire la synthèse entre ces analyses contradictoires. En vertu du théo-



rème «qui n'avance pas recule», il est possible qu'il prenne le ralentissement de l'accélération des techniques pour un ralentissement tout court. Espérons donc la prochaine émergence d'une nouvelle idée reçue : l'histoire est en train de ralentir. Cela nous changera.



La donna e mobile

Le téléphone que les Français appellent *portable*, les Anglais l'appellent *mobile*, les Italiens *cellulaire*, les Allemands *handy*. Preuve que, pour désigner un équipement nouveau, les langues savent choisir une image qui les frappe sans se sentir obligées de retenir la même que les langues voisines. Il n'est pas sûr que les techniques uniformisent les mœurs autant qu'on le dit. Il est sûr qu'elles n'uniformisent pas les langues.

Plus poétique : le chant d'un merle des Moluques nommé *vini* a incité les Polynésiens à dire *vini* pour désigner un portable! Connaissiez-vous d'autres jolies trouvailles?

Le concept de préjugés

Selon Alain Prochiantz, les biologistes ont intégré au plus profond d'eux-mêmes l'idée que la physique est l'idéal de toute science et qu'à terme, la biologie devra se fondre dedans. Voilà pourquoi «l'image du cerveau-ordinateur a imprégné notre conception de la cognition à tel point que ce n'est que très récemment que l'idée d'un renouvellement des cellules cérébrales a pu se faire jour. Que le cerveau puisse être non pas un système physique voué à une lente dégradation par accroissement d'entropie, mais un système voué à un renouvellement synaptique et cellulaire avec mort et création de neurones n'a été admis que ces toutes dernières années.» (*Machine-Esprit*, Odile Jacob, 2001.)

Dans le couple préjugés/conceptions théoriques, qui commande? C'est la grande question – éternelle, parce qu'insoluble – de l'histoire des idées. Percevoir les préjugés qui nous poussent à adopter des conceptions erronées semble la condition indispensable pour pouvoir améliorer nos conceptions. Mais changer de conceptions semble la condition *sine qua non* pour pouvoir mettre à jour nos préjugés.

Or, nous réussissons à changer et de conceptions et de préjugés. N'est-ce pas incroyable?

BLOC-NOTES

de Didier Nordon

2

SCIENCE ET ÉCONOMIE

Peinture fraîche

3

par Ivar Ekeland

TRIBUNE DES LECTEURS

4



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Les saveurs amères

5

par Hervé This



POINT DE VUE

Il faut renouveler la systématique...

6

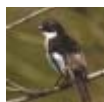
par Guillaume Lecointre et Simon Tillier

PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

50 ans de jeunesse : l'École des Houches

8

par Pierre Averbuch

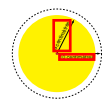


PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

12

■ Le plus vieux mammifère? ■ Quand les moutons réfléchissent ■ L'obscur clarté des comètes

- Les carences des feuilles de vigne ■ Croissant de dune
- Les carrés perdus de Franklin ■ Le gobe-mouches, en retard au dîner ■ La clef de listeria ■ Mort subite ■ Atomes exotiques ■ Un dinosaure géant ■ La brume sismique
- Insonorisation mentale ■ Cristallisation acoustique
- Le pouvoir du rien ■ Une question de bon sens



ÉNIGMATH

La jaune et la rouge

92

par Dennis Shasha



LOGIQUE ET CALCUL

Le beau doit-il être complexe?

98

par Jean-Paul Delahaye



ART ET SCIENCE

Dis-moi Vénus

104

par Donald Olson et Russel Doescher



IDÉES DE PHYSIQUE

Le claquement du fouet

106

par R. Lehoucq, J.-M. Courty et É. Kierlik



ANALYSES DE LIVRES

108

■ Voronoff, de Jean Real ■ Les nouveaux mondes du cosmos. À la découverte des exoplanètes, de

Michel Mayor et Pierre-Yves Frei ■ Les vilains petits canards, de Boris Cyrulnik ■ La conservation des métaux, sous la direction de Claude Volfovsky ■ Classification phylogénétique du vivant, de Guillaume Lecointre et Hervé Le Guyader

2 encarts d'abonnement entre les pages 16 et 18, encart broché service lecteurs et carte d'abonnement entre les pages 96 et 97.

La vie sur les îles antarctiques

30



Les îles australes, laboratoires de l'évolution

32

par Pierre Jouventin

Sur ces îles du bout du monde, l'introduction volontaire ou accidentelle d'espèces continentales perturbe les écosystèmes fragiles et originaux.

La biodiversité dans les îles subantarctiques

36

par Y. Frenot, J.-L. Chapuis et M. Lebouvier

Grâce à divers mécanismes d'adaptation, les insectes et les plantes des îles subantarctiques résistent aux conditions climatiques rudes.

Prédateurs marins et changements climatiques

42

par H. Weimerskirch, C. Barbraud, C. Guinet, O. Chastel et Y. Cherel

Le suivi à long terme des populations d'oiseaux et de mammifères marins nous renseigne sur les changements climatiques globaux.

Les manchots, auxiliaires des océanographes

46

par J.-B. Charrassin, Y. Le Maho, G. Duhamel, Y. H. Park, C.-A. Bost

En équipant les prédateurs marins, tels les manchots, de capteurs de plus en plus miniaturisés et précis, on suit l'évolution de certaines ressources océaniques.

EN COUVERTURE : S. BOUQUIN / DAVIDES

Chaque mois, retrouvez le sommaire complet de la revue **en ligne** avec pour chaque article une bibliographie et un complément d'information.

www.pourlascience.com

Les danses spatiales de la Lune

52

par **Éric Bois**

La Lune est soumise à des balancements réguliers autour d'une configuration d'équilibre stable. On connaît aujourd'hui avec précision les origines de ces balancements, nommés «librations».



Prothèses dentaires chez les Étrusques

60

par **Gaspare Baggieri et Marina di Giacomo**

Des prothèses en or datant du VII^e au IV^e siècle avant notre ère, servaient à remplacer des dents disparues ou à décorer des dents encore en place.



Propulsion sous-marine par supercavitation

66

par **Steven Ashley**

Des torpilles se déplacent sous l'eau à plusieurs centaines de kilomètres par heure dans un flot de bulles de gaz qui réduit notablement les frottements du liquide sur le métal.



Le cervelet

74

par **Christian Darlot**

Indispensable à la coordination des mouvements et à l'équilibre, le cervelet est aujourd'hui la partie du système nerveux dont on connaît le mieux le fonctionnement.



L'étrange comportement de l'eau ultra-froide

84

par **José Teixeira**

L'eau a des propriétés étonnantes, tout particulièrement à basse température, notamment entre -40 °C et -135 °C. La liaison hydrogène en explique beaucoup.



Un nouveau moyen de transport serait-il apparu? Les renseignements sont ténus, car les torpilles à supercavitation sont, dans tous les pays, sous la chape de plomb du secret militaire, et les histoires rocambolesques abondent (à la James).

L'idée physique est séduisante : le physicien Daniel Bernoulli (1700-1782) nous a appris que la pression au sein d'un liquide diminue quand sa vitesse augmente. Au-dessous d'une certaine valeur de la pression, le liquide se met à bouillir. Ce phénomène de cavitation est un handicap dans la propulsion à hélice : la formation de bulles de gaz sur le tranchant d'une hélice tournant très vite consomme de l'énergie et diminue le rendement.

Les physiiciens ont transformé ce handicap en atout. Si la vitesse est suffisante, la chute de pression est telle sur l'ensemble du mobile sous-marin que l'eau passe à l'état vapeur tout autour du mobile : celui-ci se déplace dans une bulle de vapeur qui réduit beaucoup les frottements. Ainsi une torpille pourrait-elle dépasser plusieurs centaines de kilomètres par heure (*Propulsion sous-marine par supercavitation*, pages 66 à 72). Si l'on se limitait à cette analyse, plus la vitesse serait importante, plus complète serait la bulle, moins importants seraient les frottements, plus vite les sous-marins se déplaceraient... etc. Bien évidemment d'autres phénomènes apparaissent qui empêchent ce mouvement perpétuel, mais il se pourrait que des Nautilus nimbés de vapeur percent bientôt les mers à grande vitesse. Merci qui? Merci Bernoulli.

La terre est entièrement explorée, dit-on. Si explorée signifie cartographiée, certainement. Les nouveaux explorateurs sont les scientifiques qui étudient la faune et la flore de ces contrées longtemps préservées par leur climat. Aujourd'hui, l'Antarctique fascine : les adaptations darwiniennes à des conditions rigoureuses des manchots et des albatros, des éléphants de mer et des otaries, continuent à surprendre par leur diversité et leur ingéniosité. Ce patrimoine est fragile et sa survie dépend des précautions prises pour le sauvegarder de l'introduction de nouvelles espèces, et des appétits industriels. Le dossier de ce numéro, pages 30 à 51, vous transporte dans ces terres de contrastes.

Philippe BOULANGER



Peinture fraîche

IVAR EKELAND

La valeur marchande des œuvres de jeunesse des peintres célèbres est aujourd'hui plus forte que celle de leurs œuvres tardives. Cette observation appuyée sur la statistique est un «fait stylisé».

Cézanne et Picasso appartiennent à des générations différentes : le premier naît 42 ans avant le second. Et pourtant, leurs chefs-d'œuvre sont presque contemporains ! Le meilleur de la production de Cézanne se situe à la fin de sa vie, entre 1890 et 1906. Picasso peindra jusqu'à sa mort (en 1973), mais ses œuvres les plus marquantes furent peintes au début du siècle : *Les Femmes d'Alger* datent de 1907 (il a alors vingt-six ans), la période bleue et la période rose sont encore antérieures. Picasso peindra pendant soixante-six ans encore, mais au contraire de Cézanne plus aucune de ses œuvres n'atteindra le retentissement (ni la valeur marchande) de celles de sa jeunesse.

S'agit-il là d'un simple accident de l'histoire, rencontre fortuite entre deux génies de types différents, ou des tendances plus profondes sont-elles à l'œuvre ? C'est la question que se sont posée deux économistes, David Galenson et Bruce Weinberg. Ils ont étudié tous les peintres français, nés entre 1820 et 1900, d'importance suffisante pour avoir au moins une œuvre reproduite dans trois traités d'histoire de l'art, parmi cinq nommément désignés. Ce critère définit 33 artistes, dont bien entendu les figures majeures de l'impressionnisme, du postimpressionnisme, du fauvisme, du cubisme et du surréalisme. Nos auteurs les séparent alors en quatre cohortes suivant leur date de naissance : la première rassemble ceux qui sont nés entre 1820 et 1839 (dont Cézanne) et les trois autres se succèdent de vingt ans en vingt ans. Picasso appartient à la dernière, ceux qui sont nés entre 1880 et 1900.

D. Galenson et B. Weinberg font alors une analyse statistique en utilisant le *Guide Mayer*, qui donne chaque année les résultats des ventes aux enchères tenues dans le monde ; pour la période 1970-1996, les 27 éditions du guide répertorient 13 943 peintures ou aquarelles des 33 artistes retenus, donnant pour chacune d'elles le support (toile ou papier), la taille, la date d'exécution, la date et le prix de vente. En utilisant cette base de

données, ils établissent pour chaque artiste ce qu'on pourrait appeler sa «courbe des valeurs», c'est-à-dire le prix moyen de ses œuvres en fonction de l'âge auquel il les a peintes. Le travail est assez délicate, car il faut tenir compte d'effets indésirables, des fluctuations du marché de l'art par exemple, qui font que certaines années les prix sont plus élevés ou plus bas que d'autres.

LES GÉNIES MODERNES SONT PLUS PRÉCOCES...

Il n'empêche, les résultats sont impressionnants : le sommet de la «courbe des valeurs», c'est-à-dire l'âge où culmine le prix des œuvres, se déplace très rapidement vers la gauche. Il passe de 47 ans pour les artistes de la première cohorte, à 37 pour ceux de la deuxième, 29 pour la troisième et 27 pour la quatrième. Plus cela va, et plus ces peintres peignent leurs meilleures toiles jeunes. L'erreur statistique ne dépasse pas un an, et ce déplacement ne peut donc pas être un simple artefact : il correspond à une réalité bien assurée. Bref, la différence de carrière entre Cézanne et Picasso n'est pas un accident : ils sont tout simplement représentatifs de leur cohorte.

Reste à savoir pourquoi, au cours du XIX^e siècle artistique, les génies se révèlent de plus en plus tôt. L'explication que proposent D. Galenson et B. Weinberg tient à une évolution du marché de l'art : sous l'influence de la critique, artistes et amateurs se seraient progressivement ralliés à une nouvelle conception de la peinture, selon laquelle elle devrait, non plus représenter la réalité, mais exprimer des émotions ou traduire des idées.

Apparaissent alors de nouvelles générations d'artistes, plus théoriciens qu'expérimentateurs, inventeurs d'une méthode, comme Seurat, ou porteurs d'une vision, comme Picasso : c'est l'innovation qui prime désormais, par opposition au patient apprentissage d'un Cézanne, qui peint indéfiniment les mêmes paysages. La création artistique

n'est pas de même nature dans un cas que dans l'autre, plus conceptuelle et théorique dans un cas, plus concrète et complexe dans l'autre, la première étant davantage le fait de personnes jeunes et la seconde demandant une lente maturation. C'est le même phénomène qui fait que les mathématiciens atteignent le sommet de leur carrière à un âge plus tendre que les biologistes ou les théologiens.

D. Galenson et B. Weinberg avaient déjà publié une étude sur les peintres américains du XX^e siècle, avec des résultats tout à fait similaires. Là encore, ils avaient isolé deux cohortes d'artistes, ceux nés entre 1900 et 1920 (dont Jackson Pollock et Willem de Kooning), et ceux nés entre 1920 et 1940 (dont Rolf Lichtenstein et Andy Warhol). Le prix des œuvres culmine à 51 ans pour les premiers et à 29 ans pour les seconds, toujours avec une erreur possible d'une année ! Là encore, l'explication résiderait dans une prime à l'innovation, qui met une idée nouvelle au-dessus d'un exploit technique, au point que certains artistes de la deuxième cohorte n'exécutent même plus l'œuvre qu'ils ont conçue, confiant la réalisation à d'autres.

En 1967, Sol Le Witt déclare que «L'idée devient une machine qui fait l'art.» La technique est reléguée au second plan, voire sous-traitée, l'expérience n'a que peu de valeur, et cette génération de peintres est donc très semblable à des mathématiciens, jeunes comme eux, et portant le même dédain magnifique pour la complexité du monde.

On parle beaucoup en économie de «faits stylisés» : il s'agit de faits qui ont dépassé le niveau de l'anecdote et qui ont subi un premier traitement statistique permettant de les rendre incontestables et surtout de les mesurer. D. Galenson et B. Weinberg ont hissé le parallèle entre Cézanne et Picasso au niveau du fait stylisé. Même si la réponse qu'ils en fournissent n'est pas complète, ils ont du moins posé la question : elle fait désormais partie du programme de travail de la science économique. Le génie est-il vraiment une longue patience ?

TRIBUNE DES LECTEURS

Mascarets atmosphériques

J'ai lu avec passion l'article *La fin de l'effet Papillon* (voir *Pour la Science*, mai 2001). Je m'interroge sur le lien qu'il pourrait exister entre les structures stables à grande échelles au sein des atmosphères planétaires, tel l'anticyclone des Açores ou la tache de Jupiter et ce qui est appelé en physique de la matière condensée, un soliton. Les solitons sont des ondes solitaires, à une ou quelques crêtes, qui se propagent par exemple à la surface de l'eau ou encore dans une fibre optique. L'exemple le plus typique est le mascaret, une onde de surface qui remonte par l'embouchure d'un fleuve, lorsque la marée monte. Ne pourrait-on envisager que les structures stables des milieux turbulents soient des solitons?

Gérôme Taillandier, Paris

Réponse de Raoul Robert

On pourrait penser que les structures cohérentes, tels les grands tourbillons, comme la tache rouge, ou bien les couples de tourbillons accolés (ou modons) qui se propagent à vitesse constante puissent être des ondes solitaires. Une telle explication a effectivement été avancée, pour la tache rouge notamment. L'obstacle c'est que, dans leur définition même, les solitons sont des ondes progressives particulières qui possèdent une propriété remarquable d'interaction non linéaire (quand deux solitons se croisent, ils ne se superposent pas, mais interagissent de manière non linéaire, puis se séparent en retrouvant leur forme antérieure). Or ce n'est pas du tout ce qui est observé avec les tourbillons. Les tourbillons de même signe ont tendance à fusionner et, en quelque sorte, le plus gros mange le plus petit qui disparaît définitivement. On peut donc dire que ces tourbillons sont des ondes progressives, mais pas des solitons.

Quatre-vingt-dix-sept ou 97?

Je me permets d'attirer votre attention sur la bizarrerie de la langue française dans sa dénomination des nombres. Pourquoi en effet dire le nombre 97, quatre-vingt-dix sept, quand septante-sept aurait été plus rapide et plus logique? Cette fantaisie de la langue française provoque l'amusement des autres francophones, tels les Suisses qui utilisent, pour soixante-dix, quatre-vingt et quatre-vingt-dix, respectivement septante, huitante et nonante. Soixante-dix utilise une addition, celle de 60 et 10, et quatre-vingt-dix, une multiplication plus une addition ($4 \times 20 + 10$). Quatre-vingt-dix sept va encore plus loin puisqu'il comporte une multiplication, puis deux additions successives ($4 \times 20 + 10 + 7$). Professeur de physique, je m'amuse

sais de voir, en dictant le nombre 97 lors d'une correction, des élèves pressés d'écrire se précipiter sur leur stylo-correcteur pour les uns effacer un huit et les autres un quatre. À l'école, en 1926, dans la petite commune où nous vivions, j'apprenais septante, octante et nonante. Aujourd'hui, même s'il y est précisé qu'on ne les emploie plus, les trois termes figurent encore dans le dictionnaire.

Yves Boudoint, Le Puy

La taille du photon

La lecture de l'article *La détection des étoiles par interférométrie* (voir *Pour la Science*, mai 2001) me conduit à poser deux questions. Pour que les photons interfèrent à l'intérieur des deux télescopes, il faut que l'extension transversale (perpendiculaire à la direction de propagation) des ondes soit supérieure ou égale à la distance entre les deux télescopes, en l'occurrence plusieurs dizaines de mètres. Un photon qui a traversé l'espace possède-t-il cette «taille»? D'autre part, la lumière d'une étoile n'est pas une lumière cohérente, de sorte que deux sources naturelles distinctes n'interfèrent pas. Comment alors mesurer le diamètre d'une étoile en utilisant des photons provenant de deux points diamétralement opposés de l'étoile?

Michelle Feuillée, Franconville

Réponse de Fabien Malbet

Pour interférer, deux ondes doivent d'abord se recouvrir. Dans une étoile, les ondes quittent les atomes sous une forme quasi sphérique. Quand elles arrivent sur la Terre, leur extension latérale est quasi illimitée, et peuvent donc interférer même si les télescopes sont très éloignés. Se pose ensuite le problème de l'extension longitudinale de l'onde (le long de la direction de propagation). Les ondes émises par les atomes ne sont pas purement monochromatiques : elles sont constituées d'un «paquet» d'ondes de longueurs d'ondes très proche (le paquet d'ondes possède une certaine largeur spectrale) qui se déplace avec une extension spatiale longitudinale finie. C'est le rôle des lignes de retard de l'interféromètre que de rattraper le retard que prend la partie de l'onde entrant dans un des télescopes sur celle entrant dans l'autre télescope pour que les deux se superposent.

Des ondes doivent être de longueurs d'onde voisines pour interférer. La lumière issue d'une étoile comporte de nombreuses longueurs d'onde. Avec un filtre, on sélectionne un faible intervalle de longueurs d'ondes.

Enfin, les ondes doivent être en phase pour interférer. L'addition d'ondes de même longueur d'onde, mais de phases différentes, est un signal uniforme, sans franges d'in-

terférences. Les paquets d'ondes émis par un seul atome d'une étoile respectent cette condition et interfèrent avec eux-mêmes. Au contraire, les ondes émises par des atomes différents de l'étoile n'ont aucun lien de phase et n'interfèrent pas.

Comment utiliser les interférences produites par chaque onde avec elle-même pour mesurer le diamètre de l'étoile? Sur l'interférogramme, les franges d'interférence dues à deux atomes très proches se chevauchent et restent donc visibles. Quand les atomes sont diamétralement opposés dans les étoiles, les franges sont légèrement décalées, ce qui diminue le contraste de la superposition des deux systèmes de franges. Le but de l'interférométrie en astronomie est de faire varier ce contraste en modifiant la distance entre les deux télescopes et d'en déduire le diamètre de l'étoile.

Fabien Malbet, Observatoire de Grenoble

Un superpanache de fumée

Dans *La sculpture des reliefs terrestres* (voir *Pour la Science*, mai 2001), Michael Gurnis explique le soulèvement depuis 20 millions d'années du continent Africain par l'action d'un superpanache, constitué de roches très chaudes et peu denses, qui remonte du noyau terrestre. Or, d'après la théorie de la tectonique des plaques, la plaque continentale africaine s'est déplacée vers le Nord-Est durant cette période. Ces deux interprétations ne sont-elles pas incompatibles? L'Afrique n'a-t-elle pas quitté au cours de cette période la région où le panache s'élève?

Liliane Fugas, Orléans

Réponse de Michael Gurnis

On sait de récentes analyses du manteau par ondes sismiques que le superpanache Africain est incliné à l'intérieur du manteau : il naît à la verticale de l'Atlantique Sud et rejoint la croûte terrestre sous la mer Rouge. Des simulations numériques expliquent cette inclination : la base du panache n'a pas bougé depuis sa formation, tandis que le haut s'est étalé vers le Nord-Est suivant ainsi, telle la fumée d'une cigarette emportée par le vent, le déplacement de la plaque continentale Africaine.

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pouirlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pouirlascience.com.



Les saveurs amères

HERVE THIS

Nous savons qu'il existe plus de quatre saveurs (sucré, salé, acide, amer) et les physiologistes ont découvert plusieurs types de saveurs «amères».

En 1995, la physiologie de l'olfaction a progressé d'un coup : les méthodes de la biologie moléculaire ont identifié les protéines qui constituent les récepteurs des cellules olfactives du nez. En revanche, les récepteurs des cellules des papilles gustatives de la langue et de la bouche, sensibles aux saveurs, restaient inconnus. Ces lacunes sont peu à peu comblées : à l'Université de Miami, Alejandro Caicedo et Stephen Roper ont montré que l'appareil gustatif distingue plusieurs sortes d'«amers».

Ce dernier progrès est le point d'orgue de plusieurs études publiées dans les 12 derniers mois : les biologistes qui avaient découvert les familles de «gènes de l'olfaction» ont trouvé une vaste famille de récepteurs de ce que l'on nommait la saveur amère. Puis d'autres équipes ont montré que les récepteurs individuels réagissent sélectivement à des composés d'une amertume particulière. Parallèlement, il est apparu que chaque cellule réceptrice des saveurs exprime plusieurs ARN messagers, codant plusieurs récepteurs : il semblait alors naturel que les cellules réceptrices réagissent à plusieurs composés sapides.

Des études neurologiques et comportementales menées sur des rats, des singes et des sujets humains, indiquaient que les diverses espèces animales distinguent plusieurs stimuli amers. Quelle était la base cellulaire de cette distinction ? Les cellules réceptrices des saveurs réagissaient-elles spécifiquement à un stimulus ou à plusieurs ? La question était lancinante, mais on doutait des résultats de neurophysiologie, car les interférences sont nombreuses sur la voie nerveuse qui conduit des papilles au cerveau...

Les chercheurs de l'Université de Miami ont attaqué le problème à l'aide d'une nouvelle méthode d'imagerie, qui montre, *in situ*, l'activation des cellules réceptrices des saveurs par les mouvements d'ions calcium engendrés : à l'aide d'une micro-pipette, on injecte un colorant sensible aux ions calcium dans les cellules, et l'on observe les

réactions des cellules aux divers stimuli en détectant en temps réel la répartition de ces ions calcium à l'aide d'un laser, qui excite le colorant, et d'un microscope confocal, qui permet l'observation des cellules dans les profondeurs du tissu. Les biologistes ont ainsi examiné plusieurs centaines de cellules gustatives, qu'ils excitaient par divers composés amers.

Ainsi, le cycloheximide provoque de fortes variations transitoires de la concentration en ions calcium dans les cellules réceptrices. Les autres molécules testées, tels le denatonium, l'octaacétate de saccharose et la phénylthiocarbamide produisent des réactions inférieures, mais prolongées (jusqu'à plusieurs minutes). La concentration en molécule amère à partir de laquelle les cellules réagissent diffère pour chaque type de molécule amère, et l'intensité de la réaction dépend de la concentration en molécule stimulante. Mieux encore, les réactions ainsi enregistrées correspondent aux réactions comportementales des rats auxquels on fait boire des solutions de ces molécules amères (les molécules n'agissent qu'à partir d'une concentration seuil).

5 TYPES D'AMERTUME...

Après une minutieuse étude, les biologistes de Miami ont établi que seules 18 pour cent des 374 cellules testées réagissaient à un ou plusieurs des cinq composés amers testés, quand on appliquait ces derniers à une concentration modérée. Parmi ces cellules sensibles aux composés amers, les réactions aux divers composés dépendaient des cellules : 14 pour cent des cellules réagissaient au cycloheximide, 4,5 pour cent à la quinine, 3,7 pour cent au dénatorium, 2,4 pour cent à la phénylthiocarbamide, 1,6 pour cent à l'octaacétate de saccharose. Au total, la proportion de cellules réceptrices de l'amer dans les papilles gustatives est analogue à la proportion de cellules sensibles à l'amer dans la population complète de cellules du goût testées :

aucune des papilles étudiées (les papilles regroupent plusieurs cellules réceptrices) ne semblait spécifique de l'amer, et la proportion, ainsi que la répartition de cellules sensibles à l'amer était analogue à celle des ARN messagers de récepteurs amers. Ces études montrent, une fois de plus – mais au niveau cellulaire – que les diverses parties de la langue ne sont pas spécifiques des diverses saveurs, contrairement à une hypothèse «gastronomique» répandue.

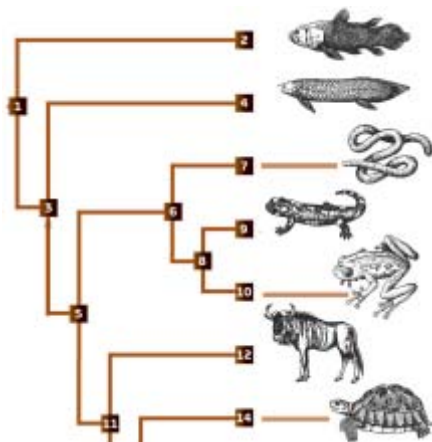
Les cellules réagissent-elles différemment aux cinq molécules amères testées, ou bien certaines cellules sont-elles spécifiques de certaines molécules ? Les physiologistes ont appliqué successivement les cinq stimuli aux mêmes cellules et observé que la plupart des cellules sensibles à l'amer ne réagissent qu'à un des cinq composés testés, leurs voisines réagissant à d'autres composés.

Un quart des cellules testées sont activées par deux composés amers, et sept pour cent de la population cellulaire réagit à plus de deux des cinq composés. Les réactions sont indépendantes : il n'y a pas d'association entre deux stimuli dans les cellules de la saveur, et des concentrations supérieures en molécules amères n'augmentent pas les proportions de cellules sensibles.

La spécificité des cellules réceptrices des amers – et non de l'amer – expliquerait les réactions comportementales et, notamment, la capacité de distinguer sensoriellement les divers amers : les fibres nerveuses issues des cellules spécifiques de chaque amer particulier sont sans doute groupées en faisceaux spécifiques de cet amer, irriguant une zone particulière du cerveau.

Reste maintenant à trouver des mots pour désigner les diverses saveurs amères. Sourions : l'une d'elle se dénommera-t-elle Michèle ?

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le 25 juillet 2001, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Il faut renouveler la systématique...

GUILLAUME LECOINTRE • SIMON TILLIER

... et la vision qu'en ont les non-systématiciens : la systématique fait plus que nommer, elle pense la nature.

Le 24 mars 2000, la revue américaine *Science* publiait le génome complet de *Drosophila melanogaster*. Énorme retentissement ! On sait moins qu'il ne subsiste en Europe que deux scientifiques en activité, deux systématiciens, capables de comparer et d'identifier avec précision les 3 000 espèces connues de drosophiles. Silence accablant !

Dans deux ans, il n'y aura plus, en France, un seul spécialiste des méduses ou des ascidies en activité. Car on ne recrute plus depuis trente ans : 50 pour cent des zoologistes, botanistes, paléontologistes, anatomistes et phylogénéticiens français, tous confondus, ont entre 50 et 70 ans. La biologie risque, à court terme, de devenir borgne, privée de sa dimension descriptive et historique – c'est-à-dire de son fondement même – si venait à disparaître la biologie comparative, appliquée à la classification et à l'évolution des êtres vivants, dénommée aussi systématique. Nous sommes aujourd'hui sur ce chemin : à l'Université et au CNRS, la systématique a pratiquement disparu. C'est l'une des conclusions du rapport de l'Académie des sciences présenté au ministre de la Recherche en octobre 2000 (*Systématique : ordonner la diversité du Vivant*, Rapports sur la science et la technologie, n° 11, *Tec & Doc*).

Récemment questionné sur *Canal +*, Vincent Courtillot, ex-directeur de la Recherche, affirmait que la systématique n'est concevable qu'exportée vers d'autres champs de recherche. Si nous comprenons bien que toute discipline scientifique doit impérativement prendre en compte les besoins de la science et de la société, il nous apparaît stérilisant, et stérile, de vouloir limiter la science à la satisfaction de ces besoins. Si l'on suit Vincent Courtillot, les sciences naturelles n'auraient ainsi pas droit à leur recherche fondamentale.

La plupart des biologistes réduisent la systématique à une tâche d'étiquetage d'espèces supposées préexister à toute

interprétation ; or, elle se préoccupe, au contraire et avant tout, de déterminer quelles sont les unités de classification, et ce avant de leur donner un nom qui n'est qu'une étiquette. Les systématiciens définissent d'abord des concepts, et y attachent ensuite une appellation pour permettre l'application du concept par les utilisateurs.

Avant de nommer, la systématique dit comment on définit les groupes, et elle les définit. C'est donc la systématique qui détermine comment nous voyons le monde vivant, d'abord sur le plan conceptuel, puis, dans un deuxième temps, du point de vue de son utilisation. Ceux qui, par ignorance, réduisent la systématique à la satisfaction de leurs besoins de dénomination d'organismes vivants ou fossiles mènent tout droit la discipline à un état où elle sera totalement incapable de fournir les réponses pertinentes qu'ils attendent.

Les progrès ont pourtant été foudroyants au cours des dernières décennies grâce aux développements théoriques de la systématique phylogénétique, associés, plus récemment, aux nouveaux outils de la biologie moléculaire. Il est particulièrement frustrant pour les systématiciens qui ont mené et mènent leur révolution pour mieux répondre aux exigences de la recherche scientifique et aux besoins de la société d'être constamment renvoyés à des pratiques, à des méthodes et à des théories obsolètes qui servent d'argument pour tuer progressivement la discipline en tentant de la réduire à un ensemble de techniques.

L'EFFORT DE FORMATION A ÉTÉ FAIT

Même si l'effort de formation à la systématique moderne reste très insuffisant dans notre système d'enseignement supérieur, la formation de jeunes systématiciens rompus aux concepts les plus modernes de la discipline a pourtant été efficace : les jeunes chercheurs que la

profession a été sommée de former il y a dix ans sont maintenant là, prêts à prendre les postes qui ne sont toujours pas au rendez-vous.

UN RECRUTEMENT... AVEC DISCERNEMENT

Nous ne prétendons pas que tous doivent être recrutés tout de suite, car vouloir disposer d'un spécialiste de chaque groupe vivant ou fossile ne saurait tenir lieu de véritable politique scientifique. En revanche, la concertation entre organismes de recherche français et européens devrait permettre de mieux répartir le nombre de spécialistes en fonction de l'intérêt de la recherche scientifique, des besoins socio-économiques et de la diversité réelle des taxons dans la nature. Dans le même temps, il faut soutenir les efforts de recherche sur les outils et les concepts de la description et de la dénomination des taxons, ainsi que la création de tout l'outillage informatique associé à l'expertise de spécialistes. Il est vrai, et peut-être inéluctable, que la zoologie, la botanique, l'anatomie comparée disparaîtront dans les formes sociales où nous les avons connues ; mais nous sommes convaincus que c'est par le renouveau des concepts et des méthodes qu'elles peuvent et doivent être redynamisées, non plus en tant que telles, mais dans le cadre unifié de la recherche en systématique.

Le développement de la systématique a été identifié internationalement, et sans ambiguïté, comme la priorité pour la mise en œuvre des accords sur la diversité biologique. Pour que le développement durable, que les politiques intègrent peu à peu dans leurs discours, devienne une réalité, il faut que nos gouvernements successifs procurent à la systématique un appui durable.

Guillaume LECOINTRE et Simon TILLIER sont chercheurs au Muséum national d'histoire naturelle.

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

soit **4 € seulement par numéro** au lieu de ~~5,20 €~~

Pour consulter et télécharger
en toute liberté sur www.pourlascience.fr
les 12 prochains numéros
dès leur parution.



Oui, je m'abonne
à *Pour la Science* 100 % numérique
1 an (12 numéros) pour 48 €

Je préfère découvrir toutes
les offres d'abonnement disponibles
en cliquant ici.



50 ans de jeunesse

PIERRE AVERBUCH

L'École de Physique Théorique des Houches fête un cinquantenaire : cette Abbaye de Thélème a renouvelé une physique française atrophée par les guerres et le conformisme scientifique.

L'École des Houches a comblé un vide de l'enseignement : la présence de quelques personnalités prestigieuses qui avaient laissé un nom dans l'histoire des sciences masquait, dans la France d'il y a cinquante ans, l'inadéquation de l'enseignement des Sciences. Or le dynamisme d'une communauté scientifique se mesure au contenu de son enseignement. Cette évaluation est d'autant plus facile en France, car les programmes sont nationaux, les diplômes devant être garantis par l'État.

Les programmes universitaires d'enseignement de la physique, et particulièrement de la physique théorique au lendemain de la Seconde guerre mondiale, sont d'une vétusté calamiteuse. La litanie des explications de cet état de fait est longue : les universités, issues de

l'Université Impériale n'avaient comme mission que de former des enseignants du secondaire ; les programmes étaient fixés par des scientifiques éloignés de la recherche ; les études les plus valorisées socialement étaient des études d'ingénieur qui dataient d'une époque où les sciences ayant imprégné la technologie étaient principalement la mécanique et la chimie, et un peu la physique de la seconde moitié du XIX^e siècle.

De nombreuses avancées scientifiques étaient refusées socialement car elles venaient d'Allemagne, pays ennemi héréditaire ; d'autant que le massacre de jeunes classes pendant la guerre de 14-18 avait participé à une certaine « décadence ». Enfin les années d'occupation avaient coupé les chercheurs restés en France des progrès récents, effectués aux États-Unis et dans une moindre mesure en Angleterre.

Si ces raisons sont pertinentes, elles n'expliquent pas pourquoi, en mathématiques, le décalage fut moins net. Quelles que soient les raisons,

«Le démarrage du projet fut une performance incroyable ; cela relevait de la gageure, du prodige. Du jour au lendemain, Cécile s'est transformée en mendiante de charme, obsédée jour et nuit par cette école dont elle était convaincue – et l'avenir lui a donné raison – qu'elle jouerait un rôle considérable dans le développement de la physique.»

Pierre Aigrain, ancien Ministre de la Recherche, a enseigné aux Houches.

Il était impossible, avec la licence d'enseignement de physique, seul titre exigé à l'époque pour préparer un doctorat, d'aborder la recherche théorique. Il y avait certes, au-delà du certificat de physique générale, préparé en un an, la possibilité de faire une année de recherche, généralement expérimentale, le Diplôme d'Études Supérieures, obligatoire pour préparer l'agrégation, et qui, sans doute malheureusement, a disparu depuis, mais le retard était terrible. Les étudiants ne pouvaient comprendre les articles publiés



En haut, la bibliothèque avec ses étudiants de 1954. En bas, le bâtiment construit au début des années 1960, accueille, dans un confort rustique (voir le bain de la petite fille De Witt, photographie à côté du titre), une cinquantaine d'étudiants, dont une trentaine d'étrangers.



Wolfgang Pauli (1951) Prix Nobel de physique 1945, trône au milieu de ses élèves (a) ; séance de relaxation dans les alpages (1952), Cécile DeWitt-Morette est à gauche (b) ; Anatole Abragam et Yves Goldschmidt-Clermont (c) ; Enrico Fermi, le photographe photographié, Prix Nobel de physique 1938 (d) ; Wolfgang Pauli et Léon Rosenfeld devant un exemple de végétation locale (e) ; Pierre-Gilles de Gennes (1953) avec Cécile DeWitt-Morette et son mari, le physicien Bryce DeWitt (la petite fille à gauche du titre est leur enfant) (f) ; P.-G. de Gennes, prix Nobel de physique 1991, est passé du statut d'étudiant à celui de professeur (g).

«Deux séjours ont illuminé ma vie de jeune chercheur expérimentateur. J'ai trouvé un cours élémentaire de mécanique quantique par Luttinger, un cours d'électrodynamique quantique par Dyson, dans un style pragmatique qui m'a donné l'illusion salutaire que je pouvais accéder à la compréhension des idées fondamentales dans ces domaines. J'y ai trouvé des séminaires par des maîtres prestigieux comme Fermi, dont la simplicité dans la présentation me donnait le désir de participer au jeu ! Beaucoup de lacunes dues à mon manque de formation ont été en partie comblées par ces séjours à l'École des Houches.»

*Georges Charpak
Prix Nobel de Physique 1992*

dans les journaux scientifiques : ceux-ci utilisaient tous la mécanique quantique, et ce n'est pas parce qu'un français, Louis de Broglie, avait été le premier à suggérer la nature ondulatoire des particules, que l'on enseignait les méthodes d'utilisation pratique de cette mécanique. À cet état de fait s'ajoutait un esprit philosophique qui avait ses qualités, mais qui n'incitait pas les étudiants au dynamisme culturel : pendant que les étudiants avancés s'interrogeaient sur les paramètres cachés de la mécanique quantique, les américains inventaient le transistor...

ENFIN CÉCILE VINT...

C'est ce que comprit Cécile Morette, une jeune physicienne débutante désireuse de faire de la physique théorique et embauchée dès la fin de l'occupation allemande par Frédéric Joliot comme attachée de recherche au CNRS. Elle obtient alors, grâce à l'appui de son patron qu'elle a su convaincre, une mission à Dublin où Heitler, un spécialiste de la théorie quantique des champs, s'était réfugié pendant les années noires. Elle continue ses séjours à l'étranger, à Copenhague dans l'Institut de Niels Bohr, puis à Princeton à l'*Institute for Advanced Studies* où Oppenheimer l'a invitée. Elle se sent le devoir de faire profiter les jeunes physiciens français de son expérience et de sa connaissance du niveau à atteindre pour participer à la recherche en physique théorique. C'est d'autant plus nécessaire que, la physique ayant acquis la réputation d'avoir gagné la seconde guerre mondiale (grâce aux radars, aux premiers calculateurs électroniques, à la bombe atomique...), les gouvernements vont la financer sans hésitation.

Dans une France qui se relève difficilement, les financements resteront rares,

sauf au Commissariat à l'Énergie Atomique, et il faudra attendre le retour de de Gaulle en 1958 pour que la recherche soit mieux traitée.

Les instances universitaires proposent à Cécile Morette un poste de Maître de Conférences – on dirait maintenant Professeur de seconde classe – à Nancy ; mais elle ne va y former que quelques élèves, ce qu'elle sait insuffisant à l'échelle nationale. Désireuse de remercier la France de l'effort qu'elle a fait en l'envoyant apprendre son métier là où l'on sait le pratiquer, elle a alors l'idée d'une formation un peu lourde, certes, mais nécessaire, pour, chaque année, une trentaine de jeunes physiciens motivés «de tous pays, ou plus précisément de pays n'offrant pas de préparation à la recherche. Cette formation inclut quatre grands cours de trente à trente cinq heures à raison de deux cours par jour six jours par semaine pendant huit semaines». Ce sera une École où deux mois d'été, juillet et août, seront utilisés à plein temps : l'horaire comprend des cours principaux et un certain nombre de cours auxiliaires, et laisse du temps pour les discussions et la durée nécessaire à l'assimilation des connaissances. Les cours se tiendront dans un endroit assez isolé, pour que des discussions permanentes entre professeurs et élèves fassent passer ces derniers du statut intellectuel d'étudiants à celui de jeunes chercheurs, de façon que les problèmes qu'ils se posent se rapprochent de ceux qui sont traités par la communauté scientifique mondiale.

LES DIFFICULTÉS ADMINISTRATIVES

Cécile Morette connaissait un site, au dessus du village des Houches, situé à l'entrée de la vallée de Chamonix ; sans voiture, et à l'époque elles étaient rares, on était isolé à souhait. Une installation primitive, utilisant un chalet modifié pour loger les participants, et d'anciennes cabanes de berger transformées en logements ou en salle de cours, suffirait à des gens motivés. Car ils devaient l'être : un éminent physicien de Harvard reconnaîtra qu'il échangerait bien «un peu de charme de l'endroit contre un peu plus de confort».

Il ne restait qu'un détail : si le projet était clair, il paraissait fou dans la tradition administrative de la France, où la notion de campus était inconnue, où les universités fermaient de trois à quatre mois l'été, où aucun système n'était prévu pour accueillir et tirer profit des professeurs étrangers ; bref, aucun moyen financier n'était en vue. Alors commença pour l'initiatrice une bataille administrative ; sans doute grâce à l'esprit de recons-

truction du pays qui régnait à l'époque, et surtout à la pugnacité peu commune de Cécile Morette, le pari impossible fut gagné. Convaincu du bien fondé du projet, Pierre Donzelot, Directeur des Enseignements Supérieurs accorda une subvention ; le plus extraordinaire n'est d'ailleurs pas la subvention, c'est qu'une jeune scientifique ait obtenu d'être reçue ; les «progrès» administratifs survenus depuis empêcheraient de nos jours une pareille aberration.

Les crédits devaient transiter par l'Université de Grenoble, car toute ces péripéties se passaient sur le territoire de l'Académie correspondante. Louis Néel heureusement empêcha cette dernière de refuser cette extravagance «théorico-alpine». Le CNRS contribua également en rétribuant Cécile Morette, qui était devenue alors DeWitt et enseignait aux USA pendant l'année scolaire. Le 15 juillet 1951, s'ouvrit la première session.

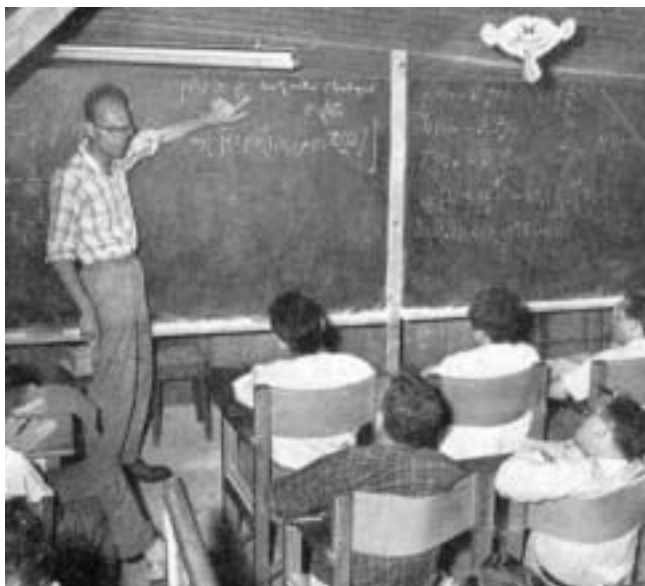
Trente et un élèves, dont seize français allaient suivre les cours de professeurs prestigieux dont W. Pauli, lauréat Nobel 1945, A. Kastler, E. Segré et W. Kohn, futurs titulaires de cette distinction. Les craintes exprimées avant la création par certains administratifs timorés qui pensaient qu'en montagne on se doutait bien de ce que feraient tous ces physiciens, se révélèrent infondées. Les élèves en redemandaient et les professeurs appréciaient cette ambiance de travail et ces possibilités de réflexion : les questions des élèves sont toujours une stimulation pour les enseignants. Puis les sessions se succédèrent, et on trouve dans les anciens élèves de certaines de ces sessions d'autres lauréats Nobel.

La sélection des élèves est vite devenue sévère. Les postulants savaient que le travail serait intense, mais que le jeu en valait la chandelle ; par contrecoup la qualité des élèves attirait les plus brillants professeurs, heureux de trouver du «répondant».

Dans le cours des années cinquante, les programmes d'enseignement de physique avaient fait des progrès, en particulier en France où la formation dite de troisième cycle, avec le Diplôme d'Études Approfondies, avait été créée pour préparer les étudiants à la recherche. L'École de Physique se devait de

«Je suis venu pour la première fois comme élève à l'École d'été des Houches en 1970, et mon séjour a marqué un tournant mon orientation scientifique. C'est là que j'ai commencé à exister en tant que mathématicien.»

*Alain Connes
Médaille Fiels 1983*



A gauche, la salle de cours primitive où enseigne L. Van Hove en 1956. A droite, Claude Cohen-Tannoudji, prix Nobel de Physique 1997.

s'adapter : à partir de 1958 commencèrent des sessions spécialisées, des «quatrième cycles». Une nouvelle habitude s'instaura : des chercheurs pionniers dans un domaine expliquaient à des chercheurs débutants, ou juste docteurs, l'état d'avancement de leur spécialité. Parallèlement, les cours ne furent plus seulement reproduits avec des moyens antédiluviens comme la «ronéo», mais imprimés et vendus en librairie et dans tous les supermarchés scientifiques.

Avec la collection complète de la *Review of Modern Physics*, nous avons là une autre vue très approfondie de l'évolution de la physique pendant près d'un demi-siècle et des tentatives des physiciens de sortir de leurs spécialités étroites : des sessions de biologie, ou de technologies très avancées et très mathématiques entrent dans la série.

L'ÉVOLUTION DE L'ÉCOLE D'ÉTÉ

Au fur et à mesure que l'activité se pérennisait, et que le pays se reconstruisait, que parallèlement la population se réjouissait de sortir d'une vie spartiate pour goûter les délices d'Athènes – Capoue, ce sera pour plus tard –, des progrès matériels améliorèrent l'installation. On améliora l'intérieur des chalets existants, on généralisa l'eau courante, on construisit un bâtiment d'enseignement, encore agrandi depuis, car la communauté scientifique s'est considérablement épaissie en un demi-siècle, puis de nouveaux chalets modernes, on installa des parkings. Plus récemment on introduisit des ordinateurs, on les connecta au monde... non sans quelques résistances : «Il ne faudrait pas que les participants en viennent à s'isoler toute la journée devant leur

console, ce serait aller contre la philosophie de l'École des Houches», remarquait Édouard Brézin.

L'expérience a prouvé que l'intérêt et l'enthousiasme des participants n'a pas baissé ; le monde a évolué, le niveau de confort de ses habitants aussi : les physiciens savent adapter les impédances.

Les programmes d'activité s'adaptent aussi : nous avons déjà mentionné l'entrée des phénomènes biologiques en 1969, les sessions de deux mois sont remplacées par deux sessions d'un mois, suivant-là un mouvement général (les autres écoles d'été sont passées d'un gros mois à deux petites semaines). Des soucis économiques de rentabilisation des installations amènent la création du Centre de Physique. Il s'agit d'organiser, pendant l'hiver – la logistique a fait des progrès –, des sessions de quinze jours d'ateliers sur des sujets avancés aussi interdisciplinaires qu'il est possible ; l'organisation de sessions du Centre est devenue une porte d'entrée pour de nouveaux sujets qui deviennent des thèmes pour l'École, et une occasion d'ouvertures vers la physique appliquée.

Ce fut un succès, le Conseil d'Administration eut souvent à effectuer des sélections parmi des projets tous très intéressants. Quelques fois, ce fut, non pas le caractère inextensible de l'année, mais celui des moyens des «sponsors» qui aida à la sélection ; il n'y a pas que des roses sur terre... mentionnons pour mémoire l'existence de sessions pour plus jeunes physiciens, sessions de troisième cycle, pendant le mois de septembre.

Cette École d'Été est aujourd'hui loin d'être unique, mais ce fut sans doute la première, en Europe au moins. D'autres ont suivi, qui seraient en concu-

rence si la communauté scientifique ne s'était pas tant agrandie. Ce n'est pas une catastrophe, mais, bien au contraire la preuve d'un succès ; celui des grandes marques ne se mesure-t-il pas par les imitations qu'on en trouve dans tous les pièges à touristes, et, *a contrario*, qui a entendu parler d'ateliers clandestins de fabrication de faux roubles ? Lorsque l'Organisation scientifique du Traité de l'Atlantique Nord généralisa son aide aux Écoles d'Été – qui maintenant ont lieu toute l'année – elle donna celle des Houches comme exemple.

Depuis l'administration de l'O.T.A.N. a fabriqué des normes que les Houches ne suivent pas : elle fait plus long et plus approfondi. C'est la condition nécessaire, pour rester créateur, que de ne pas faire comme les autres, mais mieux. Si l'information circule maintenant à la vitesse de la lumière, sa digestion reste un processus lent fonctionnant à celle des neurones, et il reste une place pour la sélectionner collectivement pour la transformer en un ensemble compact utilisable : un cours publié après avoir été testé sur des auditeurs de choix n'en est que meilleur. La mission des Houches évolue, elle reste importante, et les chercheurs peuvent rester optimistes, l'approfondissement des théories continuera avec des formes évolutives et l'Administration, comme l'Intendance, finira bien par suivre.

Les 28, 29 et 30 juin, une conférence scientifique se tiendra à l'École de Physique Théorique des Houches, à l'occasion des cinquante ans de cette institution.

Pierre AVERBUCH est ancien directeur de recherche au CNRS.

PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

Le plus vieux mammifère?

Un crâne fossile reculerait de 45 millions d'années la séparation des reptiles et des mammifères.

Les mammifères sont par définition des animaux vertébrés à sang chaud dont la femelle allaite les petits : par exemple, l'ornithorynque, le kangourou et l'être humain représentent chacun une des trois sous-classes des mammifères, respectivement, les monotrèmes, les marsupiaux et les placentaires, classés du plus primitif au plus évolué. Dans l'arbre phylogénétique, ils sont les descendants des reptiles mammaliens qui ont peu à peu acquis les caractères des mammifères. Les paléontologues pensaient que la naissance des mammifères datait de la fin du Jurassique, il y a 150 millions d'années. Toutefois, Zhe-Xi Luo et ses collègues du Musée d'histoire naturelle de Pittsburgh ont étudié le crâne du fossile, *Hadroconium wui*, dont les caractéristiques anatomiques repoussent cette

date de 45 millions d'années, au début du Jurassique.

Les restes de *Hadroconium wui* ont été découverts dans la région du Yunnan, en Chine, en 1985. Contemporain des dinosaures, il ressemblait, de son vivant, à une très petite souris qui pesait deux grammes ; son crâne mesurait 12 millimètres de longueur. Plusieurs caractères, qui montrent en premier lieu qu'il s'agissait d'un adulte, placent cet animal plus près des mammifères actuels que de certains de ses contemporains, tel *Sinoconodon*, plus proches, eux, des reptiles mammaliens. D'abord, la mâchoire montre un espace entre les canines et les premières prémolaires que n'ont pas ses plus proches parents non mammaliens, tels *Morganucodon* ou *Haldanodon*. Par ailleurs, l'usure des molaires atteste que l'animal a eu deux séries de dents successives : des dents de lait et des dents définitives.

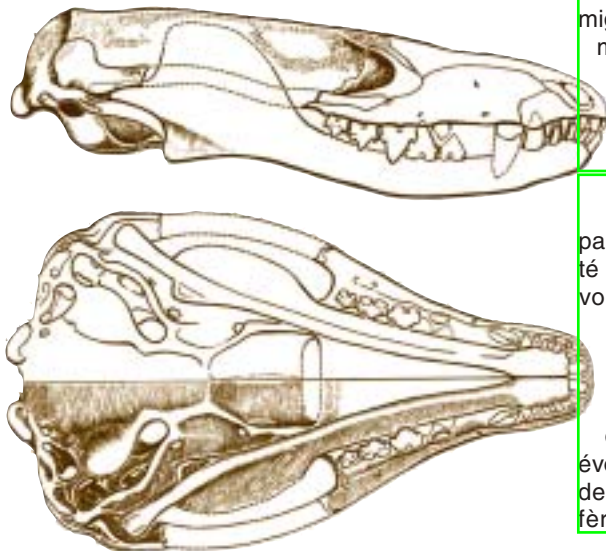
Plus remarquable encore est la mâchoire et son articulation à l'os temporal du crâne. La mandibule des reptiles est composée de plusieurs os, un principal et deux petits de chaque côté qui assurent la jonction avec le crâne. Or, celle de *Hadroconium wui* est d'un seul tenant, tout comme celle des mammifères actuels : les petits os ont migré au cours de l'évolution et se sont miniaturisés pour devenir les osselets de l'oreille moyenne qui amplifient le son perçu par le tympan. *Hadroconium wui* avait donc une ouïe plus fine que ses cousins non mammaliens.

La migration de ces osselets va de pair avec un accroissement de la cavité cérébrale, et, par conséquent, du volume du cerveau relativement important chez *Hadroconium wui*. Cette caractéristique lui a valu son nom : *Hadroconium*, qui signifie «tête pleine», *wui* étant le nom du découvreur du fossile. Cette co-évolution, clef de voûte du passage des reptiles mammaliens aux mammifères, s'explique par un décalage

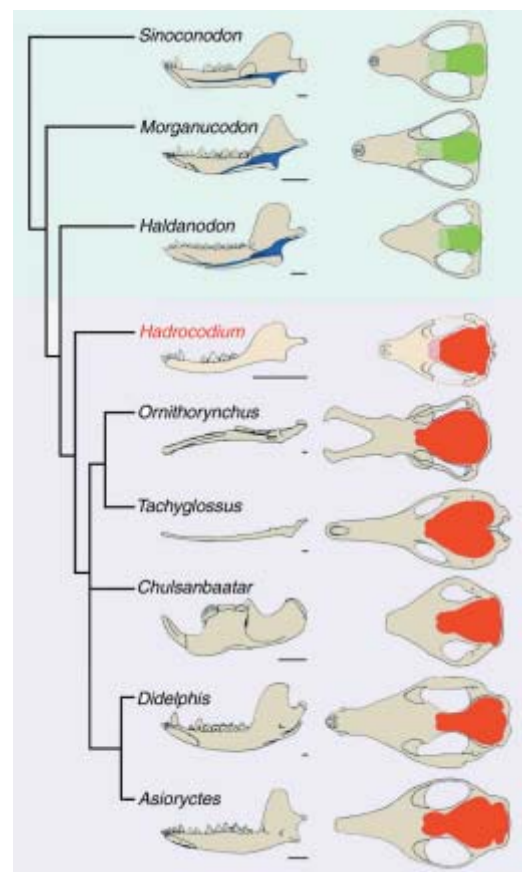


dans le développement des osselets et du cerveau. Au cours de l'évolution, la croissance du cerveau aurait stoppé celle des osselets, et les aurait repoussés vers l'oreille.

Enfin, grâce à 90 caractères crâniens ou dentaires, les paléontologues ont construit l'arbre phylogénétique d'*Hadroconium wui* : il est bien l'animal le plus proche des mammifères actuels. Cependant, une question demeure. Identifiera-t-on un jour un ancêtre direct ou un cousin éloigné de cette lignée? Ou bien cette lignée s'est-elle éteinte?



Le crâne de *Hadrocodium wui* (ci-dessus), daté de 195 millions d'années, mesurait 12 millimètres de longueur. Ses caractéristiques anatomiques, telles que l'articulation de la mâchoire ou le volume de la cavité cérébrale, font de cet animal un très proche parent des mammifères actuels. L'arbre phylogénétique (à droite, chaque trait, sous les mâchoires, représente trois millimètres) confirme cette hypothèse : en bleu, on distingue le cartilage typique des non mammaliens ; en vert, la petite cavité cérébrale ; en rouge, la grosse cavité cérébrale des mammifères (la zone mauve est celle des mammifères).

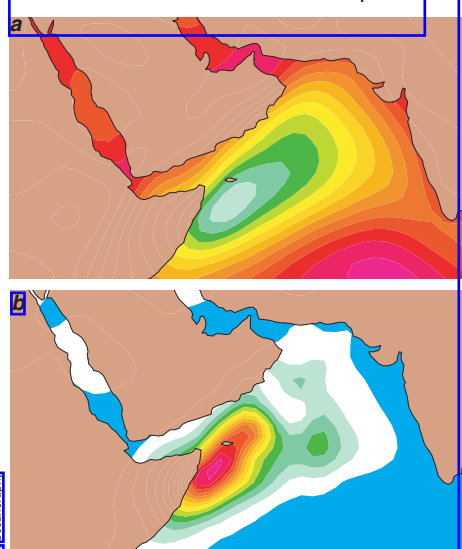


Quand les moutons réfléchissent

Sur l'océan, les «moutons» augmentent la réflexion des rayons du Soleil et, ainsi, limitent le réchauffement.

Aucun modèle climatique ne tient compte explicitement des moutons sur la mer. Peut-être à tort, viennent de montrer Pierre-Yves Deschamps du Laboratoire d'optique atmosphérique de Lille et ses collègues de l'Université de Californie à San Diego. Les moutons apparaissent sur la crête des vagues, quand le vent se lève. Ils influeraient sur le bilan radiatif global de la planète. Cette contribution est faible et négligeable par rapport à celle du dioxyde de carbone, mais pas par rapport à celles de certains gaz à effets de serre.

La planète absorbe une partie du rayonnement solaire et en réfléchit une autre. Les océans, qui couvrent 65 pour cent de la planète, absorbent une grande part du rayonnement. La proportion absorbée varie en fonction de nombreux paramètres, tels l'angle du Soleil par rapport à la surface, l'état plus ou moins agité de la mer, et même la concentration en phytoplancton qui rend l'eau plus opaque et augmente l'absorption. On considère qu'une mer d'huile réfléchit environ cinq pour cent du rayonnement reçu. En revanche, les moutons, composés d'écume blanche soulevée par le



Modélisation de la vitesse moyenne du vent (a), et de l'influence des moutons sur le bilan radiatif (b), en juillet, dans le Nord de l'océan Indien : dans la région où les vents sont les plus forts (a, en vert clair) et, par conséquent, où les moutons sont les plus nombreux, la proportion de rayonnement solaire réémis est la plus importante (b, en rouge).

vent à la surface, ont une réflexion très élevée : 55 pour cent en moyenne

Ainsi, l'albédo – la proportion du rayonnement solaire réfléchi – des océans dépend de la quantité de moutons. Quand la vitesse du vent passe de six mètres par seconde à 14 mètres par seconde, la réflexion locale sur la mer serait multipliée par deux, d'après une étude menée par Howard Gordon, de l'Université de Miami. La couverture de la mer par les moutons dépend de la force du vent, mais aussi de la température de l'eau, de la stabilité thermique de l'atmosphère, et même de la différence de température entre l'eau et l'air. On estime à 1,5 pour cent la surface de la mer couverte de moutons quand le vent souffle à 10 mètres par seconde. Cette proportion dépasse rarement quelques pour cent.

A partir de ces estimations, P.Y. Deschamps et ses collègues ont calculé que les moutons réfléchissent en moyenne 0,03 watt par mètre carré (soit environ un pour 10 000 du bilan radiatif de la planète) et jusqu'à 0,7 watt par mètre carré dans certaines régions de l'océan Indien, où le ciel est souvent dégagé et le vent fort. En effet, dès que des nuages couvrent la mer, l'influence des moutons s'estompe. L'impact des moutons est donc faible, mais non négligeable, comparé à celui de certains gaz à effets de serre ou des aérosols rejetés dans l'atmosphère. Il serait équivalent à 20 pour cent de l'effet des oxydes azotés, et aux environs de 40 pour cent de celui des composés contenant du carbone et un halogène (le chlore, par exemple). Contrairement aux gaz à effets de serre

qui se répandent dans l'atmosphère entière, les moutons exercent une influence localisée, négligeable dans les régions nuageuses. En revanche, elle devrait être prise en compte dans les régions soumises à des vents forts et dont le ciel est souvent dégagé, la côte marseillaise, par exemple.

Comment se traduit la modification du bilan radiatif due aux moutons? D'après les simulations du climat futur, les transports atmosphériques de l'équateur vers les pôles augmentent, c'est-à-dire le vent, et donc la couverture de la mer par les moutons. À son tour, la réflexion de surface varie, et ainsi de suite. Il paraît donc utile d'incorporer cet effet dans les modèles de climat afin de tenir compte de leur action (et rétroaction). La plupart des mécanismes qui commandent les phénomènes climatiques sont imbriqués de façon complexe. Les moutons ajoutent une boucle de rétroaction supplémentaire.

BRÈVES

Gaz carbonique préhistorique

L'analyse des bulles d'air contenues dans les glaces polaires montre que la concentration en dioxyde de carbone de l'atmosphère et la température moyenne évoluent de façon parallèle depuis 450 000 ans. Était-ce déjà vrai auparavant? Pour le savoir, Gregory Retallack, de l'Université d'Oregon, a estimé la concentration en dioxyde de carbone de l'atmosphère en comptabilisant, sur des feuilles d'arbres fossiles, le nombre de leurs stomates, des organes capturant ce gaz pour le transformer par photosynthèse. Or, le nombre de stomates d'une plante évolue avec cette concentration. Comme on trouve des plantes apparentées au genre *Ginkgo* dans toutes les strates fossilifères, G. Retallack a obtenu l'allure de l'évolution du dioxyde de carbone atmosphérique depuis 300 millions d'années : cette évolution est bien parallèle à celle de la température moyenne sur Terre.

Recherches à la bougie

La plupart des foyers californiens subissent régulièrement des coupures d'électricité durant quelques heures : l'alimentation du réseau est insuffisante. Avec l'arrivée de l'été et l'usage de l'air conditionné, la situation devrait empirer. Les autorités californiennes ont averti les usagers qu'elles retireraient aux laboratoires de recherche le privilège qui leur permettait, jusqu'ici, d'échapper aux coupures. C'est la panique au grand accélérateur linéaire de Stanford (SLAC) dont les expériences risqueraient d'être perturbées par des coupures imprévues. Le laboratoire de recherche Lawrence Livermore sur les armes atomiques reste, lui, exempté, confirmant une incompatibilité bien connue entre le nucléaire et la bougie.

Dinorobot

Il est capable de se lever, de se maintenir sur ses deux pattes et d'avancer! Il ne court pas encore, mais marche déjà tout seul. Le premier robot dinosaure autonome a été mis au point par les roboticiens de l'Institut de technologie du Massachusetts. Il est inspiré du *Troodon*, un dinosaure qui vivait au Crétacé supérieur (75 millions d'années). Des capteurs mesurent en continu la distance qu'il parcourt et contrôlent les moteurs, qui commandent les 16 degrés de liberté du robot. Dommage : s'il tombe, il n'est pas capable de se relever.



Vieux crocs

Un crocodile de l'Éocène, ayant vécu il y a quelque 45 millions d'années, vient d'être découvert dans un ancien cratère volcanique du massif de l'Eifel, en Allemagne. D'une longueur de 1,4 mètre, le saurien semble être mort jeune. Le crocodile a été mis au jour dans un ancien cratère volcanique, où plus de 30 000 autres animaux, dans un excellent état de conservation, avaient déjà été retrouvés. Souvent dotés de restes de chairs, de poils ou d'un contenu stomacal, ces fossiles comprennent notamment cinq squelettes de l'ancêtre du cheval, deux ancêtres du singe et la plus ancienne abeille à miel du monde.

Des diamants à pression ambiante

Le diamant est une forme cristalline particulière du carbone qui ne se forme habituellement qu'à des pressions de plusieurs milliers d'atmosphères et à des températures supérieures à 2 000 °C. Yuri Gogotsi, du Département des sciences de la matière, et ses collègues de l'Université de Philadelphie, ont mis en évidence la formation de microcristaux de diamant à pression ambiante et à des températures de l'ordre de 1 000 °C. Leur méthode consiste à faire passer un courant gazeux contenant du chlore, de l'hydrogène et de l'argon sur un substrat en carbure de silicium. Le chlorure de silicium étant plus stable que le chlorure de carbone, le mélange gazeux réagit sélectivement avec le silicium et laisse, après la réaction, un substrat de carbone dont certaines zones, mesurant jusqu'à 50 micromètres d'épaisseur, ont la structure du diamant. La méthode serait applicable à la fabrication de diamants industriels.

Une fleur géante

Le 7 juin dernier, l'une des plus grandes fleurs du monde s'est épanouie. Poussant dans un jardin botanique aux États-Unis, l'aracée géante, après six semaines de pousse, a atteint 2,1 mètres,



puis a ouvert sa jupe mauve. Dans la nature, la plante vit à Sumatra, en Indonésie. L'ouverture de la jupe laisse s'échapper une forte odeur nauséabonde de caramel brûlé et de poisson destinée à attirer les animaux pollinifères. Quand la plante a été pollinisée, la jupe tombe au bout de quelques jours en offrant ses fruits mûrs aux oiseaux qui les mangent et dispersent les pépins dans la nature qui serviront de graines.

L'obscurité clarté des comètes

Bien qu'il soit obscur, le fond du ciel nocturne est une source d'informations pour les astronomes qui étudient les confins du Système solaire.

En 1610, Johannes Kepler s'interroge : dans un univers infini, peuplé uniformément d'étoiles, chaque ligne de visée issue de la Terre devrait intercepter une étoile, et le ciel nocturne nous apparaître aussi brillant que le Soleil. Dès lors, pourquoi la nuit est-elle noire ? La réponse à cette question fait appel aux concepts de la cosmologie moderne. D'abord, l'Univers n'existe pas de toute éternité ; ainsi, la lumière des étoiles très lointaines n'a pas eu le temps de nous parvenir. Ensuite, l'Univers est en expansion, ce qui signifie que l'énergie lumineuse émise par les étoiles et les galaxies de l'univers observable est sans cesse diluée dans les abîmes qui les séparent.

Aujourd'hui, l'obscurité du ciel est exploitée, non par les cosmologistes, mais par les astronomes qui étudient le Système solaire. Ainsi, Scott Kenyon et Rogier Windhorst, de l'Université de Harvard, ont montré que la faible luminosité du fond du ciel nous renseigne sur la taille des petits objets qui gravitent en périphérie du Système solaire. Par là même, c'est aussi le mécanisme de formation de ces petits objets, qui constituent la ceinture de Kuiper, c'est-à-dire le réservoir de noyaux cométaires situé au-delà de l'orbite de Neptune, qui se trouve précisé.

En 1951, l'astronome Gérard Kuiper propose l'existence d'un réservoir de comètes qui gravitent dans le plan de l'écliptique (le plan moyen des orbites des planètes du Système solaire) au-delà de l'orbite de Neptune. En 1992, Jane Luu et ses collègues de l'Université de Leiden découvrent le premier de ces objets trans-neptuniens. Aujourd'hui, on en connaît plus de 1 000, répartis entre 30 et 100 unités astronomiques (une unité astronomique représente 150 millions de kilomètres environ). Leur diamètre est compris entre 100 et 2 000 kilomètres, mais il existe de très nombreux objets plus petits, dont le diamètre est de l'ordre du kilomètre, et qui ne sont pas observables de la Terre. Pouvons-nous tout de même les étudier ? Comme ces objets diffusent la lumière, ils nous ren-



voient une faible lueur qui devrait être détectable de la Terre.

En règle générale, la lumière diffusée par un nuage de poussières nous renseigne sur la taille des grains diffusants (la diffusion est d'autant plus intense que le diamètre des grains est petit). D'après la luminosité du ciel dans les domaines visible et infrarouge, S. Kenyon et R. Windhorst ont estimé la répartition de la taille des objets de la ceinture de Kuiper. Le nombre des gros objets, ceux dont le diamètre est supérieur à un kilomètre, décroît comme la puissance quatrième de leur masse. Ce résultat est en accord avec les modèles de formation des objets de la ceinture de Kuiper : ils se sont formés, comme les planètes, par agglutination des poussières contenues dans le Système solaire primitif, selon un mécanisme dit d'accrétion. Toutefois, quand on extrapole cette loi de répartition aux petits objets (jusqu'à des diamètres inférieurs à quelques millimètres), le nombre de grains est tellement gigantesque que la lumière diffusée par la ceinture de Kuiper devrait être éblouissante.

Ce n'est manifestement pas le cas, et les deux astronomes ont établi que la loi de répartition ne s'applique pas à ces petits grains : ils sont, en fait, beaucoup plus rares. Puisque les grains de poussières actuels présentent une répartition différente de celle des corps plus gros, ils ne se sont pas formés par le mécanisme d'accrétion qui donna naissance aux corps trans-neptuniens. Ils auraient été produits, plus récemment, lors des innombrables collisions entre les noyaux cométaires. Ces poussières subissent l'influence du rayonnement et du vent de particules chargées émis par le Soleil et sont balayées vers l'extérieur du Système solaire, à mesure qu'elles se forment. De l'obscurité naît parfois la connaissance.

David WILGENBUS

Les carences des feuilles de vigne

On diagnostique le stress des plantes au moyen de faisceaux laser qui les rendent fluorescentes.

Les plantes de votre bac à fleurs se meurent? Arrosage et engrais n'y font plus rien? Il est malheureusement trop tard pour intervenir. Jusqu'à présent, pour diagnostiquer les carences d'une plante, on attendait que les symptômes soient visibles à l'œil nu ou bien on réalisait de longues analyses chimiques. Aujourd'hui, la méthode mise au point par Bernard Cunin et Francine Heisel du Laboratoire de Physique et applications des semi-conducteurs du CNRS, à Strasbourg, permet de diagnostiquer une carence sur des végétaux sur pied en prenant l'image de leur fluorescence au moyen d'un laser. Cette méthode a d'ores et déjà été appliquée sur du maïs, du blé, et des feuilles de vigne.

Par cette méthode, on éclaire la plante analysée par un rayonnement ultraviolet proche. Ce rayonnement est absorbé par les molécules ou par les atomes constitutifs de la plante, les-

quels en réémettent une partie à des longueurs d'onde supérieures, dans le spectre visible. Le rayonnement rouge est dû à la fluorescence de la chlorophylle (elle transforme l'énergie lumineuse en énergie chimique), tandis que le bleu et le vert sont caractéristiques des pigments des cellules épidermiques et des nervures des feuilles. Pour déclencher la fluorescence, on utilise des rayonnements laser parce qu'ils sont assez monochromatiques pour être spécifiques de tel ou tel constituant de la plante.

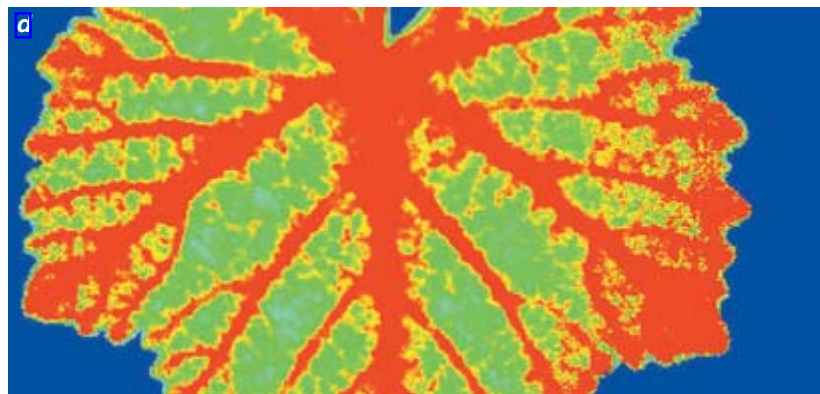
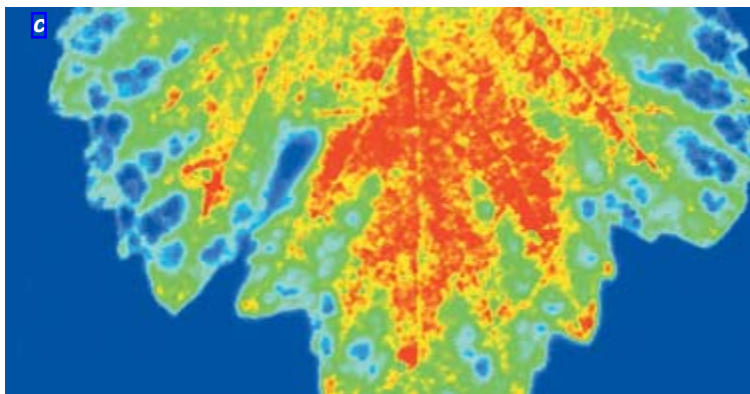
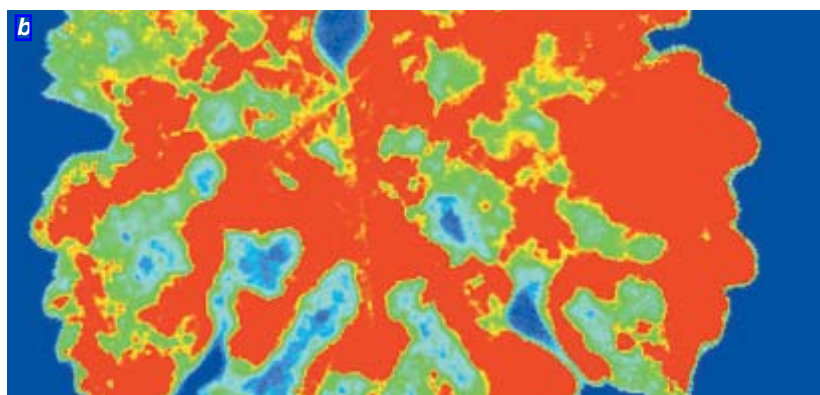
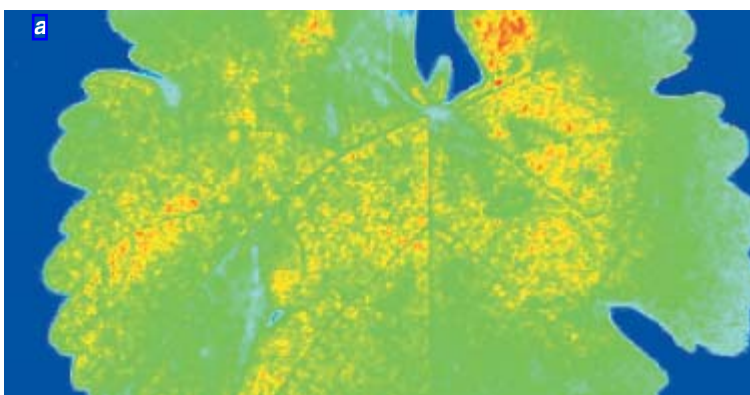
Or, des carences en eau et en sels minéraux modifient la concentration en pigments et en chlorophylle, ou perturbent l'efficacité de la photosynthèse, de sorte qu'elles influent sur le spectre de fluorescence de la plante analysée. En enregistrant et en analysant les images de la fluorescence d'une plante, on détecte si elle a subi un stress nutritionnel ou un déficit hydrique. Les différentes réactions chimiques où interviennent les sels minéraux et l'eau dans le développement de la plante sont connues des biochimistes, mais il leur restait à établir des relations entre les carences et le spectre de fluorescence.

B. Cunin et F. Heisel ont soumis des végétaux, tels du maïs, du blé ou des feuilles de vigne à des ultraviolets proches (UVA), et ont enregistré des

images de fluorescence aux quatre longueurs d'onde caractéristiques de la chlorophylle et des pigments.

Ils ont observé que le stress modifie le spectre et l'image de la fluorescence des feuilles bien avant l'apparition de symptômes visuels. Ainsi, ils ont constaté que, dans le cas du maïs, une carence en sels minéraux entraîne une modification de la fluorescence rouge, et que, dans le cas de la vigne, un stress minéral, par exemple un excès de calcium ou une carence en potassium ou en magnésium, engendre une hétérogénéité caractéristique de l'émission de la chlorophylle. L'imagerie par fluorescence donne ainsi un diagnostic précoce des déficits subis par la plante.

Comparée aux techniques utilisées aujourd'hui par les agriculteurs, le diagnostic par imagerie par fluorescence a l'avantage d'être non destructeur, rapide, et de donner une image complète de la plante. Une camionnette a été aménagée pour transporter le laser et une station de réception, de sorte que l'on mesure sur place les spectres de fluorescence des cultures : on cartographiera l'état physiologique des champs tout entiers. Ainsi, les agriculteurs pourraient suivre régulièrement l'état de leurs plantations et corriger les carences par un apport d'engrais optimal pour les plantes et plus respectueux de l'environnement.



Par fluorescence, on a obtenu des photographies de feuilles de vigne saine (a), carencée en potassium (b), ou en magnésium (c) ou encore souffrant d'un excès de calcium (d). Par cette métho-

de d'analyse des plantes dans les champs, on pourrait prévenir les carences ou les excès avant même que les signes de ces déséquilibres ne soient visibles à l'œil nu.

De l'eau dans l'air

La quantité de vapeur d'eau présente dans la stratosphère aurait augmenté de 75 pour cent en 45 ans et doublé depuis 1980. Des chercheurs de plusieurs pays ont comparé les mesures anciennes de la teneur atmosphérique en vapeur d'eau avec les résultats des mesures récentes faites par des capteurs placés sur des avions de ligne. La décomposition du méthane en dioxyde de carbone et en eau serait responsable de la majeure partie de l'accroissement de la vapeur d'eau atmosphérique.

Le «soi» des dauphins

Les dauphins se reconnaissent dans un miroir, viennent de montrer deux éthologues des Universités de Columbia et d'Emory. Ils ont d'abord tracé des marques sur deux dauphins à l'encre sombre, puis les ont effacées, avant de



les marquer à nouveau avec de l'encre invisible. Dans les deux cas, les dauphins se placent devant le miroir et recherchent les marques sur leur peau. Ils passent un temps plus long à s'observer pour détecter

les traces invisibles qu'ils recherchent que face aux marques apparentes, qu'ils découvrent rapidement. En outre, face au miroir, ils ne manifestent aucune des réactions qu'ils ont habituellement lorsqu'ils rencontrent d'autres dauphins, ce que font la plupart des animaux qui ne se reconnaissent pas dans un miroir. Après les humains et les primates, les dauphins sont la troisième espèce capable de se reconnaître.

Astrologie à l'Université... en Inde

En Inde, la commission des financements universitaires vient de proposer la création de «départements d'astrologie» dotés de cinq postes de professeur, d'une bibliothèque, de laboratoires informatiques et d'une base de données d'horoscopes. Ces départements devraient être opérationnels pour l'année universitaire 2001-2002. Cette mesure est une initiative du ministre de la Recherche et de l'Éducation. Des chercheurs de toutes disciplines se sont mobilisés pour condamner cette tentative de légitimer les «pseudosciences».

Croissant de dune

La dynamique de la croissance des dunes en forme de croissant a été précisée grâce à des simulations sur ordinateur.

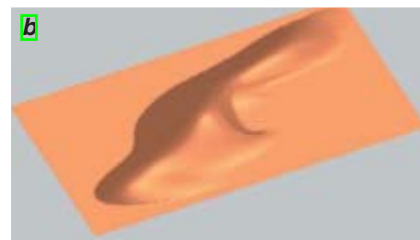
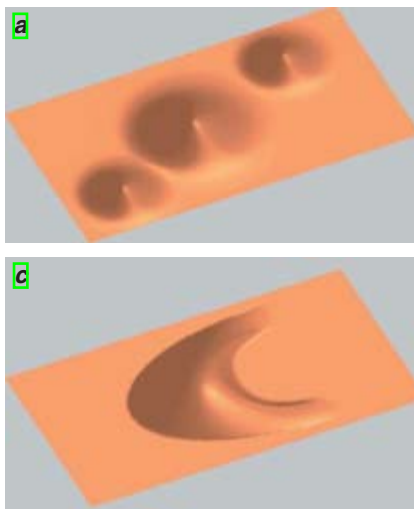
Plus de 100 types de dunes sont répertoriées dans le monde. Les plus simples d'entre elles sont les «barchans», qui prennent une forme de croissant. Elles naissent sur des sols plats rocheux ou parsemés de pierres, où le vent souffle toujours dans la même direction. Elles envahissent certaines régions de la Mauritanie et, à ce jour, les techniques de désensablement restent inefficaces à long terme (sept ans au maximum). Pour les améliorer, les physiciens ont entrepris l'étude de la formation de ces barchans. Afin d'éviter de polluer les souffleries avec des grains de sable, Hans Herrmann et ses collègues du Laboratoire hydrodynamique et mécanique physique de l'École supérieure de physique et chimie de Paris ont créé des dunes virtuelles. Grâce à cette simulation, ils ont découvert des lois qui régissent la dynamique de croissance des barchans.

Le modèle est fondé sur trois paramètres. Il simule le vent qui souffle dans le désert : sa vitesse au sol est constante et elle augmente avec la hauteur de la dune. Une fois la crête dépassée, le vent est dévié et tourbillonne. Le modèle simule aussi le flux des grains de sable qui s'accumulent sur la face exposée au vent, d'après des équations qui rendent compte de la saltation des grains : le vent fait décoller un grain, qui, en atterrissant, éjecte un ou plusieurs grains qui, à leur tour, par ce même mécanisme de saltation, en déplacent d'autres. De l'autre côté de la crête, les

grains dévalent la pente en avalanches. Le troisième paramètre pris en compte, outre le vent et l'écoulement du sable, est le relief du terrain. D'après une topographie initiale et la force du vent, le programme informatique calcule le flux du sable à la surface de la dune, puis la topographie, détermine si des avalanches se sont déclenchées ou non, recalcule la nouvelle topographie si nécessaire, puis la vitesse du vent modifiée par la nouvelle topographie, et ainsi de suite. Ce modèle itératif a révélé les propriétés cachées des barchans. Ainsi, que l'on parte d'un seul ou de plusieurs petits tas de sable (leurs volumes étant égaux), et quelle que soit leur forme, on aboutit à la même barchan finale.

En effet, les dunes se forment à partir d'une irrégularité du terrain, contre laquelle s'accumulent les grains. Contrairement aux gros grains, les plus petits s'envolent. Les dunes se déplacent à une vitesse inversement proportionnelle à leur hauteur : les petites bosses initiales bougent plus vite que les grandes, les rattrapent et coalescent. Elles adoptent une forme de croissant à partir d'une taille minimale d'environ 1,5 mètre, puis continuent à grandir tout en se déplaçant. Selon H. Herrmann et ses collègues, le sable est piégé derrière la dune tant qu'une longueur dite de saturation, qui représente la distance sur laquelle le transport par saltation se met en route, est supérieure à la longueur de la région protégée par la dune de l'action du vent.

L'équipe a aussi montré que toutes les barchans, quelle que soit leur taille, ont une forme qui obéit aux mêmes lois d'échelle. Le modèle a été validé par des mesures effectuées en Maroc et au Brésil. L'étude de la formation d'autres types de dunes et de l'impact des systèmes de lutte contre l'ensablement peut commencer.



Ces dunes virtuelles simulent les «barchans», en forme de croissant, qui naissent sur des sols où le vent souffle toujours dans la même direction. Elles se forment à partir d'un ou de plusieurs tas de sable (a). Elles sont mobiles et se regroupent, car les plus petites sont plus rapides que les grandes (b). Toutes les barchans prennent une taille et une forme identiques (c), quels que soient le nombre et la forme des bosses initiales.

Les carrés perdus de Franklin

Des carrés magiques inconnus sont aujourd'hui encore extraits des œuvres du physicien américain.

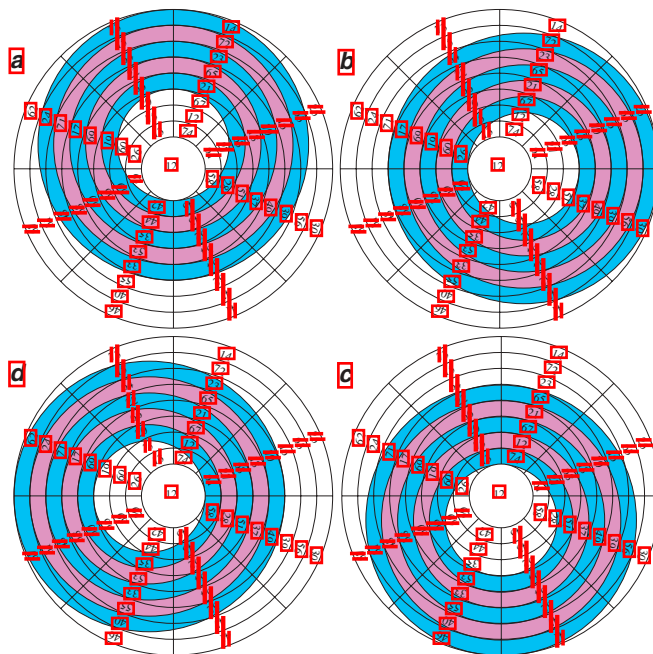
Benjamin Franklin (1706–1790) est célèbre pour être l'un des pères de l'indépendance des États-Unis et le père unique du paratonnerre. En revanche, son attrait pour les mathématiques semblait inexistant. Pourtant, l'étude des *Papiers de Benjamin Franklin* prouve le contraire. Paul Pasles, de l'Université de Villanova, en Pennsylvanie, a retrouvé, dans l'œuvre monumentale du physicien, qu'il s'intéressait aux carrés magiques et aux cercles magiques. Il en avait même construit certains dotés de propriétés rares, dont un qui est resté inédit jusqu'à ce jour.

Un carré magique est une matrice carrée à n colonnes et à n lignes. Les cases sont notées d'un entier naturel compris entre 1 et n^2 , sans répétition. Le carré est demi-magique lorsque seules les sommes des entiers de chaque ligne ou de chaque colonne sont égales à une constante, C , dite magique. Le carré est complètement magique quand les sommes des entiers sur les diagonales sont aussi égales à la constante magique. Un carré est dit magique à la façon de Franklin quand la somme des entiers sur les diagonales coudées est également égale à la constante magique. Une diagonale coudée va jusqu'au centre puis, au lieu de relier le sommet opposé au sommet initial, elle fait un angle de 90 degrés pour rejoindre le sommet adjacent au sommet initial.

L'un des carrés magiques redécouvert est un carré de huit cases de côté (voir la figure 1). Il est demi-magique : c'est là la moindre de ses propriétés ! La somme de chaque demi-rangee ou de chaque demi-colonne est égale à 130, soit la moitié de la constante magique. Ce carré se découpe ainsi en quatre carrés magiques ; la somme des nombres des 32 lignes que Franklin qualifie de «tordues», c'est-à-dire coudées, est aussi égale à la constante magique.

À partir d'un de ses carrés, Franklin a construit un cercle magique qui possède des propriétés remarquables (voir la figure 2) : les sommes de chacun de huit quartiers et celle de chaque anneau, concentrique (en blanc sur la figure) ou décentré (en bleu et en rose sur la figure) sont constantes. De plus, une rotation de 90, de 180 ou de 270 degrés des anneaux colorés laisse intacte cette propriété.

Le carré magique de Franklin qui n'a jamais été publié est un carré de 16 cases de côté (voir la figure 3). La constante magique est ici de 2 056. Tout d'abord, il est magique à la fois entièrement et à la façon de Franklin, car la somme de chaque demi-diagonale (en bleu et en mauve sur la figure 3) est égale à la moitié de la constante magique. La somme de chaque demi-colonne et de chaque demi-ligne est aussi égale à la moitié de la constante magique. La somme



2. Dans ce cercle magique, les sommes de chacun des entiers des huit quartiers de chaque anneau concentrique (en blanc) ou décentré (en bleu et en rose) sont constantes, même si l'on fait tourner les anneaux colorés de 90 (b), de 180 (c) ou de 270 degrés (d).

des nombres de chaque carré de quatre cases (cerné de vert sur la figure 3) est égale au quart de la constante magique : ainsi, la somme des nombres de n'importe quel carré de 16 cases (cerné de rouge sur la figure 3) est égale à la constante magique. Dans ce carré, la somme de chaque ligne tordue de huit cases (sur la figure 3, deux sont en vert et deux en jaune) est égale à la moitié de la constante magique. Enfin, la somme des cases de plusieurs lignes tordues décalées (en rouge sur la figure 3) est aussi égale à 2 056.

Plusieurs mathématiciens ont proposé, sans en être assurés, des méthodes pour construire ce carré. Selon P. Pasles, Franklin aurait utilisé une méthode dérivée de celle de Lo Shu, où les entiers sont placés selon les déplacements d'un cavalier : sur le carré de la figure 3, chaque nombre est éloigné de son prédécesseur ou de son successeur de deux cases dans un sens et de une dans l'autre. De telles figures magiques contredisent le physicien diplomate, qui selon ses propres dires, n'y entendait rien en matière de mathématiques.

16	255	2	241	14	253	4	243	12	251	6	245	10	249	8	247
1	242	15	256	3	244	13	254	5	246	11	252	7	248	9	250
240	31	226	17	238	29	228	19	236	27	230	21	234	25	232	23
225	18	239	32	227	20	237	30	229	22	235	28	231	24	233	26
223	48	209	34	221	46	211	36	219	44	213	38	217	42	215	40
210	33	224	47	212	35	222	45	214	37	220	43	216	39	218	41
63	208	49	194	61	206	51	196	59	204	53	198	57	202	55	200
50	193	64	207	52	195	62	205	54	197	60	203	56	199	58	201
80	191	66	177	78	189	68	179	76	187	70	181	74	185	72	183
65	178	79	192	67	180	77	190	69	182	75	188	71	184	73	186
176	95	162	81	174	93	164	83	172	91	166	85	170	89	168	87
161	82	175	96	163	84	173	94	165	86	171	92	167	88	169	90
159	112	145	98	157	110	147	100	155	108	149	102	153	106	151	104
146	97	160	111	148	99	158	109	150	101	156	107	152	103	154	105
127	144	113	130	125	142	115	132	123	140	117	134	121	138	119	136
114	129	128	143	116	131	126	141	118	133	124	139	120	135	122	137

3. Ce carré magique de Benjamin Franklin a des propriétés remarquables, décrites dans le texte.

52	61	4	13	20	29	36	45
14	3	62	51	46	35	30	19
53	60	5	12	21	28	37	44
11	6	59	54	43	38	27	22
55	58	7	10	23	26	39	42
9	8	57	56	41	40	25	24
50	63	2	15	18	31	34	47
16	1	64	49	48	33	32	17

1. Dans ce carré magique, la constante magique est égale à 260. Chaque carré délimité en blanc est aussi un carré magique. La somme de toute ligne, de toute colonne, de tout rectangle de deux cases sur quatre (entouré de rouge), de toute diagonale ou ligne coudée (en jaune) est égale à 260.

Le gobe-mouches, en retard au dîner

Les variations climatiques menacent les oiseaux migrateurs dont le départ est sonné par le Soleil et non par la température.

Les nombreuses espèces animales et végétales dont la vie est rythmée par le cycle annuel des saisons devront s'adapter à d'éventuels changements de ce cycle, au risque de disparaître. Des amphibiens et des oiseaux ont ainsi réagi à la hausse des températures printanières enregistrée dans les régions tempérées au cours des 20 dernières années en avançant leur période de reproduction. Toutefois, certaines contraintes entravent l'adaptation aux variations climatiques. Marcel Visser et Christaan Both du Laboratoire zoologique de l'Université de Groningen, aux Pays-Bas, ont montré que le gobe-mouches noir, oiseau migrateur pour qui le départ est déclenché par la durée du jour, arrive désormais trop tard sur son lieu d'habitation estival pour disposer d'une nourriture abondante, imposée par la température. Ce manque de nourriture réduit le succès reproducteur : les populations de gobe-mouches noir déclinent en Europe de l'Ouest.

Le gobe-mouches noir passe l'hiver dans la forêt tropicale africaine et remonte au printemps en Europe, où il se reproduit. Les femelles arrivent une semaine après les mâles et choisissent leur partenaire en fonction de la quantité de nourriture qui se trouve sur son territoire. Les premiers oisillons naissent quelques semaines plus tard.

Les oisillons se développent rapidement pendant les premières semaines de leur vie, et réclament une quantité importante de nourriture, composée d'insectes. Or la population d'insectes n'est pas constante au long de l'année : elle évolue en même temps que la propre nourriture des insectes, les feuilles des arbres. La forêt de Hoge Veluwe, où les populations de gobe-mouches ont été étudiées, est constituée de chênes, dont la pousse des feuilles est déclenchée par la température : la population d'insectes est maximale au printemps.

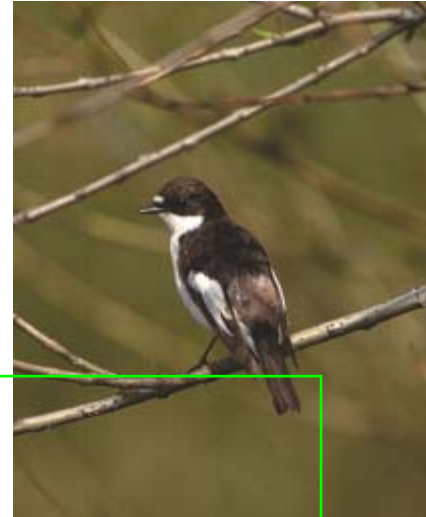
Pour que tous les oisillons d'une couvée se développent au mieux, il faut que les naissances coïncident avec la période où les insectes sont les plus nombreux. De plus, ils doivent s'adapter à d'éventuels changements de la population d'insectes.

Les deux zoologistes ont étudié les données enregistrées depuis 20 ans sur les populations de gobe-mouches noir, notamment leurs dates d'arrivée et de ponte, et ils les ont comparées au relevé des températures printanières. Au cours de cette période, la moyenne des températures printanières a augmenté de deux degrés, au Pays-Bas. On constate que les gobe-mouches avancent le moment de la ponte en même temps que la température augmente, sans doute parce que la pousse des feuilles est plus précoce et que l'abondance des insectes est décalée vers le tout début du printemps.

Toutefois, tous les oiseaux ne pondent pas en même temps, et les plus précoces ont davantage d'oisillons viables que les plus tardifs. Ainsi, le gobe-mouches tente de s'adapter au réchauffement (le début des pontes est décalé vers le début du printemps), mais les oiseaux qui n'y parviennent pas ont un faible succès reproducteur. De surcroît, l'écart se creuse d'année en année entre la période où les insectes abondent et celle de la ponte des gobe-mouches.

Le gobe-mouches s'adapte difficilement à l'augmentation des températures en raison de l'immuabilité de la date du départ de l'Afrique : la date d'arrivée ne change pas, tandis que celle de l'éclosion doit être avancée. Le choix du partenaire, la modification de la physiologie des femelles pour la ponte et l'incubation des œufs doivent être de plus en plus rapides : les gobe-mouches arrivent trop tard pour profiter au mieux des ressources de leur environnement estival.

Aujourd'hui, le déclin de la population de gobe-mouches noirs aux Pays-Bas s'est amorcé et le phénomène est également enregistré en Allemagne pour d'autres oiseaux migrateurs.



Jacana/ Manfred Danegger

La clef de listeria

On a élucidé les mécanismes par lesquels la bactérie Listeria monocytogenes franchit la barrière intestinale.

Les cas de listériose et les aliments qui en sont la cause défraient régulièrement la chronique. Cette maladie commence souvent par une gastro-entérite et se complique de méningites. La mortalité de la listériose est d'environ 30 pour cent des personnes atteintes. La bactérie, *Listeria monocytogenes*, est ingérée avec les aliments. Après être passée dans l'estomac, elle infecte les cellules intestinales, le tissu intestinal sous-jacent, puis rejoint le sang et atteint le système nerveux central et, chez les femmes

enceintes, le placenta. Ainsi, elle est capable de franchir trois barrières de l'organisme, réputées infranchissables : la barrière intestinale, la barrière hémato-encéphalique qui protège le cerveau et la barrière placentaire, qui préserve le fœtus. L'équipe de Pascale Cossart, de l'Institut Pasteur a mis au jour les mécanismes moléculaires par lesquels la bactérie traverse la première de ces barrières, celle constituée des cellules intestinales, les entérocytes.

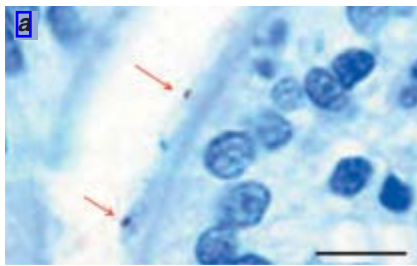
La bactérie porte, à sa surface, une protéine, nommée internaline, qui se lie avec une protéine présente à la surface des cellules intestinales, la E-cadhérine. Cette protéine assure l'adhésion des cellules entre elles et le maintien de l'étanchéité de la barrière intestinale. Lorsque le contact est établi entre la bactérie et la cellule, la membrane de cette dernière s'invagine, c'est-à-dire se creuse, et entoure

la bactérie qui pénètre ainsi dans la cellule enveloppée d'un fragment de membrane, la vacuole. Puis, grâce à des enzymes, notamment la listériolysine O, elle détruit cette vacuole. Dans une seconde étape, la bactérie se déplace de cellule à cellule en polymérisant l'actine, une protéine de la cellule qui lui confère sa forme. Elle atteint enfin la circulation sanguine.

Toutefois, toutes les E-cadhérines animales ne sont pas reconnues par l'internaline de *Listeria monocytogenes*. Par exemple, ces bactéries ne pénètrent pas dans les cellules intestinales de souris ni de rats. Quelle différence existe-t-il entre les E-cadhérines de ces organismes et celles, par exemple, des êtres humains ? La E-cadhérine humaine est identique à plus de 85 pour cent à celle du rat ou de la souris, cependant, elle diffère d'un acide aminé (le seizième), crucial

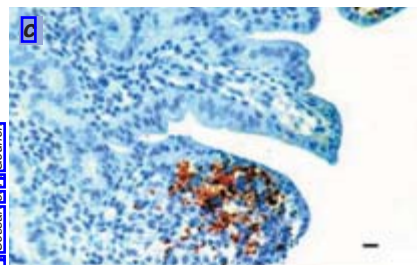
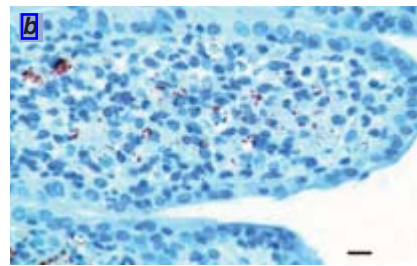
pour l'interaction avec l'internaline. Ainsi, l'interaction a lieu quand le seizième acide aminé est une proline, comme chez l'être humain, mais elle n'a pas lieu quand cet acide aminé est un acide glutamique (c'est le cas chez le rat ou chez la souris). Pour leur étude, les biologistes de l'Institut Pasteur ont utilisé, d'une part, des cobayes dont la E-cadhérine a aussi une proline en position 16, et, d'autre part, des souris qu'ils ont mises au point par transgénèse afin que leurs cellules intestinales produisent de la E-cadhérine humaine.

Ils ont ainsi montré que *Listeria monocytogenes*, ingérée oralement, franchit la barrière intestinale seulement chez les animaux dont la E-cadhérine a une proline en position 16. Toutefois, la E-cadhérine est enfouie entre les cellules intestinales. Comment la bactérie *Listeria monocytogenes* l'atteint-elle? Les cellules intestinales ont une durée de vie de trois jours, puis sont remplacées par de nouvelles cellules. Les bactéries profi-



tent peut-être du constant renouvellement de ces cellules pour se glisser entre elles au moment où l'une d'elles se détache. Ou bien utilisent-elles un autre facteur d'invasion, la protéine InlB, dont on a montré, sur des cellules en culture, qu'elles déstabilisent les jonctions intercellulaires et rendent ainsi les E-cadhérines accessibles à la bactérie *Listeria monocytogenes*.

Quand on aura totalement élucidé les mécanismes d'entrée de la bactérie dans l'organisme, on pourra peut-être les utiliser pour introduire, dans les cellules intestinales ou dans des cellules plus profondes, des médicaments, voire même des gènes thérapeutiques.



La bactérie *Listeria monocytogenes* (les flèches) franchit la barrière intestinale, ici d'un cobaye, grâce à une molécule qui se lie à une protéine de la membrane des cellules intestinales. Après 72 heures (b), les bactéries infectent les villosités de l'intestin, et, trois jours plus tard (c), y forment des foyers infectieux. Chaque trait noir représente 10 micromètres.

Mort subite

Il y a plus de 2 000 ans, à Pompéi, les cendres brûlantes du Vésuve ont figé les organes des victimes de l'éruption, en vaporisant instantanément l'eau qu'ils contenaient.

Le 24 août 79, le Vésuve est entré en éruption, ravageant Pompéi et Herculaneum. Quelque 300 habitants d'Herculaneum se sont réfugiés sur la plage et dans les 12 hangars à bateaux qui s'y trouvaient. Les fouilles des années 1980 et 1990 avaient mis au jour la plage et six de ces hangars. Les archéologues avaient enlevé les squelettes, bijoux et autres objets, mais n'avaient pas étudié *in situ* l'effet produit par les matières volcaniques sur les corps. Depuis 1997, dans deux des six hangars, Pier Paolo Petrone, Giuseppe Mastrorrenzo et leurs collègues de l'Université Frédéric II de Naples ont découvert 80 squelettes enterrés sous les cendres volcaniques. Pour la première fois, on a étudié la biologie de ces vestiges : ils indiquent que les victimes n'ont pas été asphyxiées, mais tuées instantanément par la chaleur, lorsqu'une vague de poussières et de gaz brûlants s'est abattue sur eux.

Moins connue que Pompéi, la ville d'Herculaneum a subi la même catastrophe. Dans l'Antiquité, elle se trouvait sur la route littorale qui rejoint Naples et Pompéi, à une dizaine de kilomètres de Naples. Accrochée aux dernières pentes du Vésuve, elle était installée sur une falaise d'environ 20 mètres de hauteur surplombant la mer. Les fouilles y ont été plus difficiles qu'à Pompéi, où les cendres, transportées par le vent, ont formé des couches peu épaisses (cinq à six mètres), sans consistance et perméables à l'eau. À Herculaneum, des débris volcaniques,



Les squelettes mis au jour dans les hangars à bateaux d'Herculaneum ont été figés dans la position des victimes au moment de la mort, par une sorte de sarcophage de cendres. L'étude bioarchéologique *in situ* n'a révélé aucun geste d'agonie, confirmant que la mort a été instantanée.

de la lave et des pierres ponce se sont ajoutées aux cendres. Les pluies accompagnant l'éruption ont transformé l'ensemble en un torrent de boue qui s'est solidifié sur 12 à 25 mètres de hauteur, de sorte que la couche de cendre initiale et son contenu sont restés intacts.

Plinie le jeune raconte en détail la chronologie des événements. Les habitants avaient eu le temps de fuir ou de se mettre à l'abri, quand, 12 heures après le début de l'éruption, une première vague de cendres volcaniques et de gaz brûlants a traversé la ville, sans laisser de dépôt et sans faire de dégâts sur les objets résistants à la chaleur. Puis, quand cette vague de cendres a atteint la falaise, les éléments les plus denses ont pénétré en trombe à l'intérieur des hangars où une partie de la population s'était réfugiée.

La plupart des victimes étaient assises ou couchées sur le sol (renversées par la vague de cendres). Les crânes et les os présentent des fractures noircies par la chaleur et l'émail des dents était fissuré, comme après une incinération. D'après ces indices, associés à l'analyse des tuiles retrouvées sur place, les archéologues ont estimé que la température qui régnait au moment de l'impact de la vague de poussières et de chaleur sur les hangars avait atteint 500 °C.

La vitesse de déplacement des cendres brûlantes et leur volume n'ont pas laissé aux occupants le temps de fuir. On a calculé que dans un des hangars où 30 personnes ont été ensevelies, huit mètres cubes de matière en fusion ont instantanément vaporisé l'eau contenue dans les cellules des tissus. La cendre s'est déposée sur les articulations des os et sur les résidus de tissus organiques, formant une enveloppe rigide qui a figé la position des victimes. La position des membres a révélé l'absence de gestes de protection ou de signes d'agonie.

Les légères flexions des pieds et des mains que l'on observe sur les squelettes sont dues à des contractions qui se sont produites en une seconde au contact de la chaleur, avant que la cendre ne devienne trop compacte. L'attitude pugilistique caractéristique des victimes de feux, qui résulte du raccourcissement des tendons et des muscles après la mort, n'est apparente que sur quelques squelettes, ce qui prouve qu'ils ont été immobilisés en quelques secondes. Ainsi, les victimes sont mortes sous l'effet du choc thermique et non d'asphyxie, comme on le supposait jusqu'à présent.

Atomes exotiques

Des effets quantiques autorisent certains atomes à réagir à des températures très basses, alors que les lois de la chimie devraient le leur interdire.

Depuis les années 1930, on sait qu'il existe dans l'Univers de très faibles quantités d'antimatière, constituée de particules semblables aux particules ordinaires, mais dont les propriétés sont inversées. Au proton (unique constituant du noyau de l'atome d'hydrogène) de charge électrique positive, correspond l'antiproton de même masse, mais de charge électrique négative. La rencontre d'une particule et de son antiparticule provoque leur annihilation mutuelle et la libération d'un rayonnement. Ainsi, une antiparticule pénétrant dans un matériau ordinaire n'y survit, au mieux, que quelques millièmes de milliardièmes de seconde. Pourtant, environ trois pour cent des antiprotons arrêtés par une cible d'hélium pur survivent plusieurs microsecondes. Cette stabilité inhabituelle a été mise en évidence au CERN, en 1993, par l'équipe de Toshimitsu Yamazaki : elle est due à la participation de l'antiproton à la constitution d'un objet exotique, nommé atomcule. Les réactions chimiques des atomcules relèvent d'effets quantiques et pourraient ressembler à celles des gaz froids des milieux interstellaires.

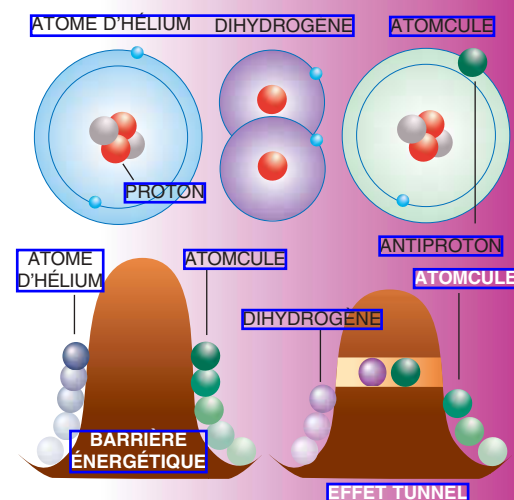
Un atomcule est constitué d'un atome d'hélium qui a perdu un électron par ionisation et d'un antiproton. Il s'apparente à un atome exotique, où l'antiproton jouerait le rôle d'une sorte d'«électron lourd». Toutefois, l'antiproton étant environ 2 000 fois plus massif qu'un électron, cet assemblage s'apparente aussi à une molécule diatomique inhabituelle : l'un des noyaux est chargé positivement, mais l'autre négativement!

Ces atomcules ont un comportement chimique étonnant. Dans l'hélium pur, ils résistent à des millions de collisions. Cependant, un contaminant moléculaire comme le dihydrogène, H₂, détruit l'atomcule dès la première collision, même à très basse température. Récemment, on a étudié de façon détaillée cette réaction de destruction à des températures de 30 kelvins.

Pour comprendre les différents comportements des atomcules vis-à-vis des atomes d'hélium ou des molécules de dihydrogène, nous avons appliqué les méthodes de chimie phy-

sique à l'étude de ces mécanismes exotiques. Nous avons essayé d'établir le chemin réactionnel, c'est-à-dire les étapes par lesquelles passent les deux espèces chimiques – l'atomcule et l'atome d'hélium dans un cas, l'atomcule et la molécule de dihydrogène dans l'autre – au cours de leur rapprochement et de leur réaction.

Pour cela, nous avons évalué les interactions du nuage électronique entourant le noyau d'hélium, d'un proton et d'un antiproton – et ceci pour des milliers de configurations possibles de ces nuages. Lorsque les deux espèces chimiques se rapprochent, leurs nuages électroniques se repoussent et constituent une barrière d'énergie plus ou moins facile à franchir. Le chemin réactionnel est alors décrit par l'évolution de l'énergie en fonction de la distance qui sépare les deux espèces. La courbe qui décrit cette évolution présente une bosse que les deux espèces doivent franchir pour se rejoindre. Si leurs vitesses d'agitation sont suffisantes, elles escaladent la pente, se rejoignent et réagissent ; sinon, elles s'arrêtent à mi-pente, puis retombent dans leur «vallée», sans se rencontrer.



Le noyau d'un atome d'hélium est constitué de deux protons (en rouge) et de deux neutrons (en gris). Deux électrons (en bleu) assurent l'équilibre électrique. Quand un antiproton, l'antiparticule d'un proton, c'est-à-dire une particule de même masse que le proton, mais de charge opposée, se combine à un atome d'hélium qui a perdu un électron, naît un atomcule, une particule exotique dont l'une des particules négatives en orbite est presque aussi massive que le noyau. Un tel atomcule est relativement stable en présence d'hélium, car la barrière énergétique est trop élevée et interdit la réaction des deux entités chimiques. En revanche, l'atomcule n'est pas stable en présence d'hydrogène : non seulement la barrière à franchir est moins élevée, mais la réaction se fait aussi par effet tunnel : les entités traversent la barrière et réagissent.

Lors de la rencontre d'un atomcule et d'un atome d'hélium, la barrière d'énergie à franchir est très élevée : le plus souvent, les deux espèces se repoussent et l'atomcule survit relativement longtemps dans l'hélium pur. Au contraire, dans le cas de la rencontre d'un atomcule et d'une molécule de dihydrogène, la barrière d'énergie est environ 150 fois plus faible. Ceci, pourtant, n'explique qu'en partie la facilité avec laquelle le dihydrogène réagit avec les atomcules. En effet, la réaction ne devrait pas se produire aux très basses températures, quand l'énergie d'agitation des atomes et des molé-

cules est inférieure à l'énergie qu'il leur faudrait pour franchir la barrière. C'est compter sans la nature quantique du mouvement des noyaux légers (protons et antiprotons) qui leur permet de franchir l'obstacle par effet tunnel : au lieu d'escalader la barrière d'énergie, ces espèces chimiques la traversent. Par ce mécanisme, les deux noyaux se rencontrent et s'annihilent, sans passer par les étapes intermédiaires de haute énergie.

Ces étranges franchissements quantiques entrent en jeu dans la chimie des gaz froids interstellaires, notamment lors des collisions à basse tempé-

rature mettant en jeu des molécules (l'ammoniac NH_3 , par exemple) ou des radicaux (OH^*). Aujourd'hui, les probabilités de réaction d'un atomcule sont connues pour chacun de ses états quantiques. Les réactions de l'atomcule pourraient servir de système de référence pour l'étude des réactions chimiques qui se produisent dans les gaz interstellaires. Si nous apprenons à utiliser les atomcules pour explorer ces phénomènes, ils sortiront de leur statut de curiosité pour devenir un outil pour les chimistes et pour les astrophysiciens.

Sébastien SAUGE et Pierre VALIRON
Observatoire de Grenoble

Un dinosaure géant

L'herbivore découvert en Égypte était plus gros que Diplodocus

Les restes d'un sauropode géant, viennent d'être découverts près de l'oasis de Bahariya, dans le désert égyptien. Déjà fouillé avant la Première Guerre mondiale par le paléontologue allemand Ernst Stromer von Reichenbach (1871-1952), ce site avait livré un grand nombre d'ossements fossiles, qui furent détruits lors d'un bombardement allié à Munich, en 1944. Toutefois, les restes avaient été décrits en détail dans une série de monographies publiées entre les deux guerres sous le titre de *Résultats des voyages d'étude du Professeur E. Stromer dans les déserts d'Égypte*. Stromer avait découvert les restes de nombreux vertébrés, notamment des dipneustes (des «poissons à poumons»), des crocodiles et des serpents primitifs. Parmi les dinosaures figuraient trois très grands carnivores qui dépassaient une douzaine de mètres de hauteur, ainsi que l'herbivore *Aegyptosaurus*, de la famille des titanosauridés (de grands dinosaures herbivores du groupe des sauropodes, dont le corps était généralement recouvert de grosses plaques osseuses).

De quand dataient ces fossiles? Les sites égyptiens constituent la terminaison orientale d'une vaste bande de terres du Crétacé supérieur (plus précisément du Cénomanién, entre -99 et -93 millions d'années) qui affleure dans tout le Maghreb, depuis le Sud marocain jusqu'à l'Ouest, en passant par l'Algérie, le Sud tunisien et la Libye. De nombreux restes de vertébrés continentaux y ont été découverts.

À Bahariya, les paléontologues ont récemment découvert plusieurs osse-

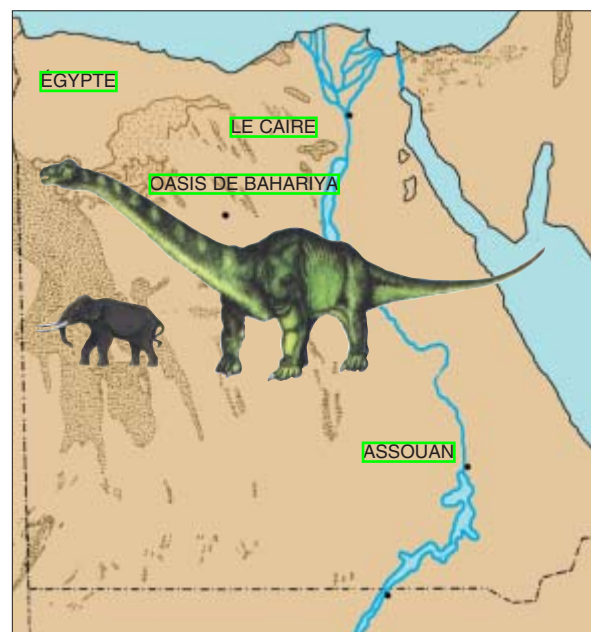
ments d'un titanosauridé, qui serait une forme différente d'*Aegyptosaurus*. Ils l'ont baptisé *Paralititan strombe* : le nom de genre évoque le fait que ce géant a été découvert dans des dépôts géologiques qui se sont formés en milieu paralaque, c'est-à-dire non loin de la mer ; celui de l'espèce fait référence à Ernst Stromer. Les paléontologues ont exhumé quelques très grosses vertèbres caudales, quelques côtes et des os de pattes antérieures, dont un humérus de 1,69 mètre de longueur. On en déduit que *Paralititan* mesurait près de 30 mètres de longueur et pesait entre 60 et 80 tonnes. Ces mensurations le placent dans la catégorie des très gros dinosaures, peu après *Argentinosaurus*, considéré aujourd'hui comme le plus gros dinosaure connu (découvert en Argentine en 1990, il mesurait plus de 30 mètres de longueur, huit mètres de hauteur et pesait 90 tonnes, soit l'équivalent d'une quinzaine d'éléphants). *Paralititan* était le contemporain d'un autre sauropode énorme découvert dans le Sud marocain en 1954. Certaines de ses vertèbres mesurent 1,50 mètre de hauteur, et l'animal atteignait probablement 35 à 40 mètres de longueur.

Avec la découverte du nouvel animal fossile égyptien, les dinosaures herbivores géants du Crétacé supérieur (de -99 à -65 millions d'années environ) détrônent définitivement les géants plus «classiques» de la fin du Jurassique (de -154 à -135 millions d'années environ), tels *Brachiosaurus* et *Diplodocus* ; seul *Seismosaurus*, découvert plus récemment, atteignait probablement 30 mètres de longueur. Pourtant, il n'y a pas si longtemps, certains paléontologues pensaient que les très gros dinosaures avaient décliné, puis disparu à la fin du Jurassique. L'intensification des recherches sur les écosystèmes continentaux de l'ère

secondaire (de -250 à -65 millions d'années) entraîne depuis une vingtaine d'années un flot ininterrompu de découvertes dans le monde entier, qui ont infirmé cette hypothèse, uniquement fondée sur l'absence de fossiles de dinosaures géants postérieurs au Jurassique.

Aujourd'hui, on sait que ces énormes herbivores de plus de 40 tonnes étaient courants non seulement au Jurassique supérieur, mais également plus tard, pendant tout le Crétacé. En revanche, ils ont disparu il y a 65 millions d'années, en même temps que les autres dinosaures. Le plus gros mammifère connu après cette époque ne pesait que 15 tonnes.

Jean LE Lœuff, Musée d'Espérazza



Près de l'Oasis de Bahariya, les paléontologues ont découvert un humérus de 1,69 mètre : le dinosaure entier devait mesurer 30 mètres de longueur et peser 70 tonnes environ (on a représenté un éléphant à la même échelle).

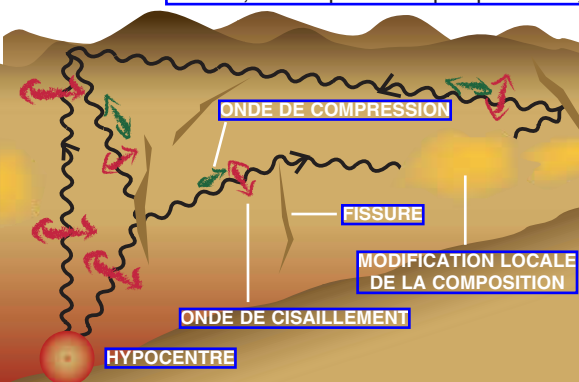
La brume sismique

À la fin d'un séisme, les dernières secousses résultent d'ondes sismiques diffusées plusieurs fois.

La croûte terrestre est l'«atmosphère» des ondes sismiques. Si, en pleine journée, le Soleil ne nous apparaît pas comme une tache lumineuse suspendue à la voûte céleste obscure, c'est parce que l'atmosphère diffuse les rayons du Soleil et les réémet dans toutes les directions. Un phénomène similaire a lieu pour les ondes sismiques à l'intérieur de la croûte terrestre, où des fissures et des couches géologiques de composition variée diffusent ces ondes. On vient de découvrir que les ondes tardives sont dues à des échos lointains ou à de multiples réverbérations. Une équipe internationale, à laquelle appartient Michel Campillo de l'Université Joseph Fourier, à Grenoble, a montré que, dans la région de Mexico, le nombre de diffusions est important ; autrement dit, la croûte ressemble plus à une brume épaisse qu'à un ciel dégagé.

Les secousses engendrées par les ondes diffusées dans la croûte terrestre se distinguent des «répliques», tremblements de terre de faible magnitude qui suivent un séisme important. Les diffusions sont des «échos» des ondes sismiques produites à l'hypocentre. Par analogie avec la coda, le dernier mouvement d'une œuvre musicale, on nomme l'ensemble des ondes diffusées plusieurs fois, la «coda des sismogrammes».

La région de Mexico est propice à l'étude des tremblements de terre : il s'y déroule autant de séismes, de magnitude donnée, en l'espace de quelques mois.



LORS D'UN SÉISME, les ondes produites à l'hypocentre sont diffusées par des «accidents de terrain», tels des fissures ou des zones de composition chimique variée. Ces diffusions multiples sont des «échos» de l'onde originelle et renseignent les géophysiciens sur la magnitude du séisme.

qu'en plusieurs dizaines d'années dans les Alpes. Comme on ne dispose pas de moyen direct de dénombrer les diffusions, on utilise une méthode indirecte, fondée sur le principe de l'équipartition de l'énergie, selon lequel, au fil des diffusions, les ondes perdent les caractéristiques de l'onde originelle, de sorte que l'énergie totale se répartit également entre tous les types d'ondes existants.

Les ondes sismiques sont de trois types : les ondes de compression qui traversent la Terre en déclenchant des mouvements de la roche parallèles à la direction de propagation, les ondes de cisaillement qui provoquent des mouvements perpendiculaires à cette direction et les ondes de surface qui se déplacent dans la croûte parallèlement à la surface terrestre. Au sol, rien ne distingue les ondes de surface des deux autres types d'ondes, de sorte que l'on déduit des déplacements du sol mesurés par les sismographes seulement des énergies globales de compression et de cisaillement.

Au début des séismes, les ondes de compression prédominent, puis cèdent la place aux ondes de cisaillement. Après quelques dizaines de secondes, le rapport entre les énergies de compression et de cisaillement se stabilise et reste constant jusqu'à la fin du séisme, alors que, dans le même temps, ces énergies diminuent d'un facteur 10 000. Au cours du séisme, l'énergie totale se répartit à parts égales entre les ondes de cisaillement et les ondes de compression. C'est la signature d'un mécanisme de diffusion multiple : le nombre de diffusions est si important que les secousses ne portent plus la marque des ondes originelles.

On pense que la diffusion multiple des ondes sismiques n'est pas limitée à la région de Mexico, mais qu'elle concerne toute la croûte terrestre hormis, peut-être, quelques zones de faible activité sismique. Aujourd'hui, la force d'un séisme se mesure à l'amplitude des secousses initiales, mais ces secousses ne sont pas nécessairement représentatives des ondes produites à l'hypocentre : ces dernières rencontrent sur leur trajet des obstacles différents d'un séisme à l'autre. À l'inverse, la coda est la superposition d'une multitude d'ondes, qui se propagent dans toutes les directions et rencontrent tous les obstacles présents dans la croûte terrestre de façon aléatoire lors de différents séismes. On utilise les signaux qui lui sont propres pour définir un coefficient moyen de diffusion indépendant des particularités de chaque diffusion. On détermine ainsi de manière plus fiable la magnitude d'un séisme en étudiant la coda plutôt que les secousses initiales.

Insonorisation mentale

Malgré des mécanismes mentaux d'atténuation des sons parasites, nous ne sommes capables de distinguer que quatre flux sonores simultanés.

Vous êtes assis dans une cathédrale, où l'organiste joue une fugue à six voix de Bach... Votre voisin tousse ; des badauds visitent l'édifice pendant le concert : à vos tympans arrive une onde sonore complexe, formée de la superposition des variations de pression de l'air engendrées par l'orgue, la toux de votre voisin, les bruits de pas et les conversations parasites. Ces ondes sonores sont composées d'une multitude de fréquences que les cellules réceptrices de la cochlée traitent sans en spécifier l'origine. Pourtant, le système auditif les regroupe en «flux» et nous venons de démontrer que nous ne pouvons distinguer plus de quatre flux différents en même temps, et que notre attention focalisée sur un flux nous permet d'atténuer considérablement les autres.

Pendant le concert, deux fréquences similaires sont analysées par les mêmes cellules de la cochlée, alors que deux fréquences différentes sont traitées par des cellules éloignées, quelle que soit leur source. Si la toux de votre voisin contient des fréquences identiques à celles de l'orgue, elles sont analysées par les mêmes «canaux de traitement» périphériques. Le système auditif doit alors, avant toute chose, regrouper les fréquences qui appartiennent à une même source, et les séparer de celles qui appartiennent à des sources différentes. Cette étape précoce de traitement des sons conduit à la formation de représentations mentales cohérentes, nommées les «flux auditifs». Le thème de la fugue joué dans l'aigu, l'accompagnement joué au pédalier ou les pas dans l'allée forment trois flux distincts. Une fois cette étape réalisée, l'auditeur accède à l'évaluation des qualités des sons (le timbre ou la hauteur, par exemple) et des séquences (le rythme ou encore la mélodie).

Comment l'auditeur parvient-il à sélectionner une seule des six lignes mélodiques dans l'enchevêtrement des sons simultanés ? Lorsqu'un organiste joue une fugue à l'orgue, il ne lui est pas possible de jouer plus ou moins fort pour accentuer telle ou telle partie. Le cerveau humain le fait à sa place : il sélectionne et extrait une ligne mélodique de



l'ensemble musical dense. En effet, la focalisation de l'attention sur un flux donné conduit à une diminution de l'intensité perçue des flux non sélectionnés. Nous avons réalisé une expérience où nous avons mesuré cette atténuation subjective due à l'attention : les sujets écoutent différents flux sonores dont les intensités physiques sont identiques et fixées à 70 décibels. Nous avons mesuré que l'auditeur est capable, grâce à ce mécanisme mental d'atténuation, de diminuer l'intensité relative des flux qu'il souhaite ignorer d'au moins 15 décibels. Nous mettons en place ce même mécanisme mental quand nous

cherchons à suivre une conversation particulière dans une pièce bondée, ou quand nous parvenons à «oublier» les pas dans les allées pendant le concert.

Nous avons aussi montré que le cerveau ne semble pas être capable de créer autant de flux simultanés qu'il y a de sources potentielles dans l'environnement. Nos recherches, menées en collaboration avec Carolyn Drake de l'Université Paris 5, indiquent que le nombre de flux perceptifs serait limité à quatre (trois flux intelligibles, plus un fond inorganisé). Dans notre expérience, le sujet écoute, dans un casque, des séquences sonores composées de la superposition de sous-séquences rythmiques simples et régulières. Il doit détecter un léger changement de rythme dans une de ces sous-séquences ; il ne peut le faire que s'il perçoit la sous-séquence comme un flux régulier, indépendamment de l'irrégularité générale de l'ensemble. Le sujet ne semble pas capable d'écouter plus de quatre flux simultanément. Emmanuel Bigand et Cécilia Garnier, du Laboratoire d'étude de l'apprentissage et du développement de l'Université de Bourgogne, ont fait des expériences similaires avec des sons de la vie quotidienne, tels les aboiements de chiens ou des bruits de voiture ; ils ont confirmé nos résultats, en montrant que les auditeurs ne peuvent pas dénombrer plus de quatre flux indépendants au sein de scènes sonores composées de plusieurs sources différentes.

Pourquoi Bach a-t-il alors composé des fugues comportant jusqu'à six voix, puisqu'il est impossible d'en écouter plus de quatre simultanément, même pour un auditeur expert? D'après l'analyse de ses partitions, quel que soit le nombre total de lignes mélodiques, Bach a composé de telle sorte qu'il n'y en ait que trois ou quatre jouées à la fois. Bach connaissait les limites du système auditif de son public...

Renaud BROCHARD, Laboratoire d'étude de l'apprentissage et du développement, Université de Bourgogne

Cristallisation acoustique

On a cristallisé de l'hélium liquide avec des ondes sonores intenses.

Dans l'imagination du dessinateur Hergé, la voix de la Castafiore avait une puissance telle qu'elle brisait les verres à distance. Plus sérieusement, dans les hôpitaux, les médecins parviennent à casser des calculs rénaux à l'aide d'ultrasons. À l'École normale supérieure de Paris, avec Xavier Chavanne et Frédéric Caupin, nous utilisons aussi des ondes sonores... pour cristalliser un liquide.

Inutile de vous égosiller pour tenter de transformer de l'eau en glace, vous n'arriverez jamais aux puissances nécessaires. Pour atteindre 200 décibels, 100 000 fois le bruit d'un moteur d'avion à réaction, nous avons placé un émetteur piézo-électrique directement dans un liquide. Afin d'augmenter l'intensité sonore, l'émetteur est hémisphérique, ce qui focalise les ondes dans une région qui est d'autant plus petite que la longueur d'onde est courte (ou encore la fréquence élevée). Nous utilisons par conséquent des ultrasons de haute fréquence, à un mégahertz, environ six octaves au-dessus de la limite audible par l'homme.

Pour explorer les effets des ultrasons dans la matière, nous avons commencé par l'hélium liquide à 65 millikelvins (environ -273°C) et à 25 fois la pression atmosphérique normale (25×10^5 pascals), tout près de la pression d'équilibre entre le liquide et le solide. Nous avons mesuré l'intensité de

nos ultrasons en étudiant la réflexion d'un faisceau laser sur une plaque de verre propre, insérée dans l'hélium liquide, au point focal acoustique. L'intensité laser réfléchie varie en fonction de la densité de l'hélium, et nous en avons déduit la pression locale. Lorsque la pression au point focal atteint $4,7 \times 10^5$ pascals de plus que les 25×10^5 pascals ambiants, de petits cristaux apparaissent au point focal de l'onde sonore.

Ces cristaux croissent jusqu'à 15 micromètres (15 millièmes de mètres) en 150 nanosecondes (150 milliardièmes de seconde) pendant la phase de compression de l'onde, donc à la très grande vitesse de 100 mètres par seconde. Un quart de période plus tard, l'onde acoustique passe en phase de décompression, les cristaux fondent aussi vite, et ainsi de suite, tant que l'onde sonore est entretenue. Nous avons observé ce phénomène relativement facilement parce que les cristaux d'hélium croissent ou fondent extrêmement



Cristal d'hélium obtenu par compression lente à partir d'un germe.

rapidement. Plus pur et plus froid que tous les autres liquides, l'hélium cristallise en effet 10 milliards de fois plus vite vers 100 millikelvins que l'eau vers 0 °C. Bien que la «cristallisation acoustique» puisse avoir lieu dans tout liquide, son observation est plus facile dans l'hélium où les cristaux, croissant plus vite, sont plus gros.

Aussi spectaculaire que cette cristallisation paraisse, nous cherchons en fait à reculer les limites de son déclenchement. Nous nous intéressons en effet au retard que subit le passage de la matière d'un état «métastable» à un état stable. L'eau, par exemple, existe «en surfusion» en dessous de 0 °C : elle peut rester liquide jusqu'à -40 °C (à condition de prendre de l'eau et un récipient très propres). Mais pourquoi la matière tarde-t-elle ainsi à changer d'état? Pour le comprendre, nous étudions aussi un phénomène symétrique,

la «cavitation acoustique» : des bulles de gaz naissent dans les liquides à basse pression, lorsqu'ils sont soumis aux mêmes ondes acoustiques intenses, mais, cette fois, pendant les phases de fortes détentes. Cette cavitation est utile en médecine (pour la destruction des calculs rénaux, par exemple) ou pour le nettoyage des surfaces.

En observant de l'hélium liquide surpressurisé (de $4,7 \times 10^5$ pascals), nous avons obtenu une surpression 100 fois supérieure à celles mesurées précédemment (avec d'autres techniques), et nous devrions être capables de faire encore mieux. Insensible aux impuretés, la cristallisation acoustique devrait permettre de comprendre quelle est la limite extrême jusqu'à laquelle un liquide peut être comprimé sans cristalliser.

Sébastien BALIBAR,
Laboratoire de Physique statistique, École normale supérieure

Le pouvoir du rien

Votre esprit peut-il convaincre votre corps de guérir tout seul?

Prenez ces pilules, elles contiennent un analgésique puissant. Dans quelques minutes, votre rage de dents ne sera qu'un mauvais souvenir. Quelques minutes plus tard, le mal a disparu. Pourtant, les pilules ne contenaient... rien. Vous avez bénéficié de l'effet placebo.

L'influence de l'esprit sur le corps est bien connue : par exemple, la colère dilate les vaisseaux sanguins de notre visage, ou bien, la tristesse nous tire les larmes. Et l'effet de l'esprit sur la douleur? Et l'effet placebo? S'il reste mystérieux, quelques travaux nous éclairent sur son fonctionnement.

Pour étudier l'effet placebo, Fabrizio Benedetti et ses collègues de l'Université de Turin ont tapé, plusieurs

fois par jour, pendant plusieurs jours, sur l'avant bras de volontaires ; la douleur était supprimée par de la morphine. Le dernier jour, ils ont remplacé la morphine par une solution d'eau salée : l'effet analgésique a persisté. Puis ils ont ajouté, à la solution d'eau salée, de la naloxone, un composé qui inhibe les endorphines, des substances que l'on synthétise naturellement et qui ont des effets analogues à ceux de la morphine, c'est-à-dire qu'elles luttent contre la douleur. Ils ont alors constaté que la douleur réapparaissait ; dans ce cas, l'effet placebo était bien réel, puisqu'il était aboli par la naloxone.

Ainsi, quand la solution placebo contient de la naloxone, qui empêche les substances analgésiques naturelles d'agir, la douleur réapparaît. En cas de douleur (les coups) l'organisme synthétise des endorphines dont l'effet est renforcé par l'administration de morphine. Lorsque l'organisme est «conditionné» à ces endorphines libérées en cas de douleur, ces substances suffisent à calmer la douleur, même en l'absence de morphine. Dans cette expérience, l'effet analgésique du placebo est dû, au moins en partie, à la libération des dérivés opiacés humains naturels.

On ignore encore comment la «foi» libère des endorphines. De nombreux paramètres semblent intervenir. Par exemple, on a montré que des pilules sans effet sont plus «efficaces» quand elles sont rouges plutôt que bleues, vertes ou jaunes... La façon dont le médicament est prescrit joue aussi un rôle sur son efficacité. Selon une autre étude, les prescriptions des médecins chaleureux, amicaux et rassurants sont plus efficaces que celles de praticiens qui se contentent d'une consultation formelle. Dès lors comment peut-on étudier l'effet placebo? Des essais cliniques pourraient per-

mettre de trancher enfin le débat. Toutefois, ils ne satisfont ni partisans ni adversaires du concept de l'effet placebo : quand on veut tester un traitement, classique ou alternatif, on supprime nécessairement toute personnalisation des soins, ce qui, pour certains, est au cœur de l'efficacité des placebo.

Asbjorn Hrobjartsson et ses collègues de l'Université de Copenhague, ont précisé l'étendue de l'effet placebo. Ils ont analysé les résultats de 114 essais cliniques où l'on évaluait l'efficacité d'un futur médicament soit en administrant réellement le médicament, soit en faisant croire au patient qu'on lui administrait la substance, mais il ne recevait qu'un placebo, soit en ne lui prescrivant aucun traitement du tout. Selon ces résultats, dans les maladies où les résultats attendus sont nets (on guérit complètement ou non), le placebo n'a pas plus d'effet que l'absence de traitement. En revanche, l'effet placebo se manifeste dans les traitements dont l'effet attendu est plus nuancé (l'état du malade peut s'améliorer même si la guérison n'est pas complète), ou dans les traitements contre la douleur.

L'effet placebo et la médecine classique sont-ils pour autant irréconciliables? Peut-on offrir le choix aux malades, comme le proposent les services de santé britanniques entre un traitement classique et un traitement alternatif? Ce choix pose des questions d'éthique aux médecins quand ils savent que le résultat est fondé sur l'effet placebo, lequel n'est pas garanti. Longtemps dans l'histoire de la médecine, la compassion et l'attention, qui contribuent pour beaucoup à l'effet placebo, ont été les seuls traitements (ou presque) que les médecins avaient à offrir. La science a enrichi l'arsenal thérapeutique, mais quelques expériences récentes indiquent que l'effet placebo semble aussi avoir sa place dans la lutte contre certaines maladies.

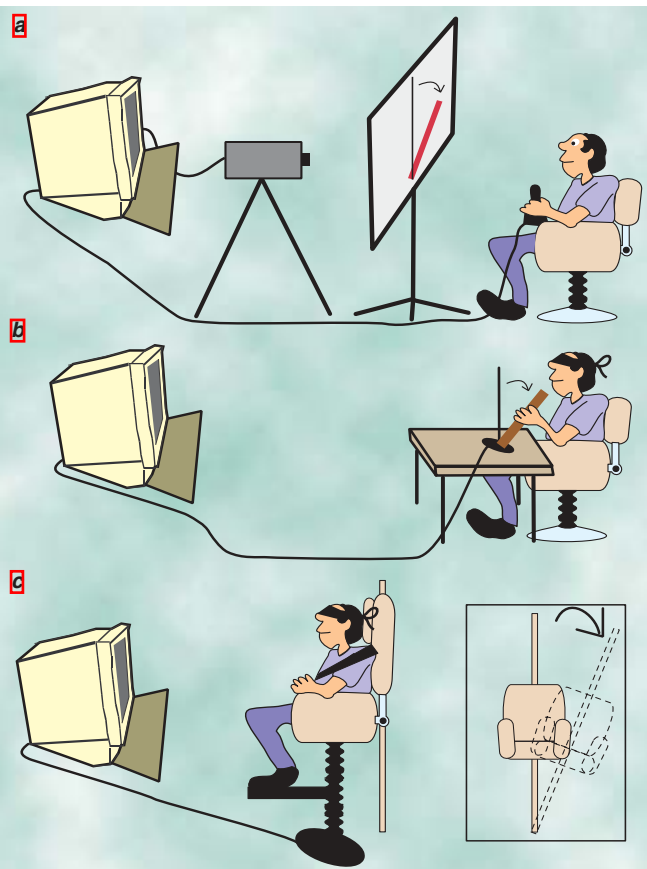


Une question de bon sens

Notre organisme perçoit mieux la direction verticale que les directions obliques.

Sur les manèges des fêtes foraines, tous nos sens sont soumis à rude épreuve. Notre sens de l'orientation aussi : quand nous n'avons pas la tête en bas, le manège penche à droite, puis à gauche, et encore à droite. On se sent bien plus à l'aise dès que le manège retrouve sa position de départ et nous, une orientation «normale». Nous venons de réaliser une expérience qui montre que les différents sens de notre organisme perçoivent mieux l'orientation verticale que les orientations obliques.

De façon générale, l'orientation d'un objet dans l'espace se définit par rapport à un axe de référence, et par l'angle qu'il forme avec cet axe. Deux orientations se distinguent parmi toutes celles de notre environnement : l'axe vertical, qui correspond à la direction de la force de gravitation à laquelle nous sommes soumis, et l'axe horizontal, qui est celui de l'horizon visuel. La combinaison de ces deux axes forme un



La direction verticale constitue une orientation de référence pour notre perception de l'espace, quel que soit le système perceptif étudié, comme le montrent ces trois expériences. Dans la première expérience qui explore le système visuel (a), le sujet observe une baguette projetée sur un écran ; puis, on la déplace et il doit la remettre dans la même orientation, à l'aide d'une manette. Dans la deuxième expérience qui explore le système haptique (b), le sujet a les yeux bandés et doit retrouver l'orientation initiale d'une baguette par le toucher. Dans la troisième expérience (c), le sujet est placé sur une chaise inclinable et doit retrouver l'inclinaison initiale de la chaise. Dans les trois cas, les sujets retrouvent plus facilement l'orientation verticale (toutes les données sont enregistrées sur ordinateur).

cadre de référence dans un espace bidimensionnel où toutes les autres orientations sont dites obliques.

L'orientation est une propriété spatiale perçue par les yeux (le système visuel), par la main (le système «haptique») ou encore par l'ensemble du corps (le système «somato-vestibulaire»). Nous avons réalisé trois expériences avec Marion Luyat (Université de Lille), Yvette Hatwell (Université de Grenoble), et le Centre de recherches du service de santé des armées de La Tronche, pour déterminer si l'orientation verticale est utilisée comme une norme de référence par ces trois systèmes pour définir les orientations obliques. Si l'orientation verticale est privilégiée, dans quelle mesure cette norme de référence verticale est-elle commune aux trois systèmes perceptifs ?

Dans les trois expériences, 36 adultes devaient retrouver soit l'orientation initiale d'une baguette, en la regardant ou en la touchant les yeux bandés, soit l'orientation de leur propre corps, par la perception «somato-vestibulaire», grâce à une chaise inclinable. Dans la première épreuve, visuelle, le sujet regarde une baguette lumineuse projetée sur un écran dans une pièce noire. La baguette prend différentes orientations, verticale ou obliques (-45 degrés, -30 degrés, -15 degrés, 15 degrés, 30 degrés et 45 degrés). Puis la baguette disparaît, et, après dix secondes, le sujet doit repositionner la baguette (déviée de plus ou moins 20 degrés par rapport à l'orientation testée) et lui rendre l'orientation qu'elle avait au début, à l'aide d'une manette.

Dans la deuxième épreuve, haptique, le sujet a un bandeau sur les yeux. Il explore avec sa main droite une baguette réelle, puis on la lui enlève. Dix secondes plus tard, on la lui redonne (déviée de plus ou moins 20 degrés) et il doit reproduire son orientation en utilisant seulement sa main droite (il a toujours les yeux bandés). Dans la troisième épreuve, somato-vestibulaire, le même sujet, dont les yeux sont bandés, est assis sur une chaise inclinable robotisée. On impose à la chaise une des inclinaisons testées, puis, quelques instants plus tard, on impose cette position avec un écart de plus ou moins 20 degrés ; le sujet, toujours assis sur la chaise, doit reproduire son inclinaison initiale, en orientant lui-même la chaise à l'aide d'une manette.

Pour chaque épreuve et pour chaque orientation, nous avons mesuré l'écart en degrés entre l'orientation initiale et celle reproduite par le sujet. Dans les trois épreuves, les personnes qui ont participé aux expériences retrouvent avec plus de précision l'orientation verticale que les six autres orientations obliques, ce qui était connu pour les systèmes visuel et haptique. En revanche, c'est la première fois que l'on montre que c'est aussi le cas pour le système somato-vestibulaire. Ainsi, les trois systèmes perceptifs semblent utiliser l'orientation verticale comme référence pour définir les orientations obliques. Par ailleurs, les sujets retrouvent plus facilement l'orientation verticale grâce à la vue, un peu moins avec le corps, et encore moins bien par le toucher.

Le système visuel semble donc plus efficace pour percevoir les orientations, que les systèmes somato-vestibulaire et haptique. En revanche, un sujet «doué» pour retrouver une orientation grâce à la vue ne l'est pas forcément quand il utilise les systèmes haptique ou somato-vestibulaire. Il semble qu'il n'y ait aucun lien, chez une même personne, entre la perception des orientations dans l'espace par les trois systèmes : l'efficacité de l'un des systèmes n'impose pas que les autres systèmes soient performants. Bien que l'orientation verticale soit une norme de référence pour chacun des trois systèmes de la perception, les mécanismes sous-jacents différencieraient d'un système à l'autre. De quoi faire tourner la tête des chercheurs pour quelques temps encore.

Edouard GENTAZ, Laboratoire cognition et développement de l'Université de Paris 5



autour de l'Antarctique

Avec 300 jours de pluie par an et autant de journées de vent, les îles qui entourent le continent antarctique sont des contrées éloignées, où les conditions climatiques sont difficiles. Après avoir imaginé découvrir un nouvel Eldorado dans ce pays du bout du monde, les explorateurs y ont trouvé des îles désolées : l'archipel des Kerguelen fut même nommé île de la Désolation. À la fin du XIX^e siècle, les navigateurs y ont exploité la baleine et d'autres animaux marins, jusqu'à menacer certains d'entre eux d'extinction (voir l'article d'introduction, *Les îles australes, laboratoires de l'évolution*, pages 32 à 35). On commence à prendre conscience de la richesse et de la fragilité de cet écosystème, où les quelques plantes et insectes spécifiques qui s'y développent ont acquis des mécanismes d'adaptation au froid (voir *La biodiversité dans les îles subantarctiques*, pages 36 à 41). Aujourd'hui, cette zone, encore épargnée par l'homme, constitue un réseau d'observatoires de l'environnement, où l'on surveille les populations d'espèces endémiques. Leur évolution reflète celle du climat et celle des ressources de l'océan, mais aussi l'influence croissante de l'homme.

Grâce aux progrès de l'imagerie par satellite et des modélisations, on suit la «santé» de l'océan avec des «bio-indicateurs» de l'équilibre local, tels que l'albatros (voir *Prédateurs marins et changements climatiques*, pages 42 à 45) ou le manchot royal, dont la survie dépend de la nourriture qu'il tire de l'océan (voir *Les manchots, auxiliaires des océanographes*, pages 46 à 50). Les espèces vivantes, animales et végétales, qui se développent spécifiquement dans cet écosystème, sont remarquablement adaptées aux contraintes de ces milieux extrêmes, mais tout intrus, qu'il soit végétal ou animal, risque de perturber un équilibre précaire et de menacer la survie de ces espèces (voir *Le chat dans l'écosystème subantarctique*, page 51). Aujourd'hui, ces ultimes frontières encore vierges attirent de plus en plus de touristes. La survie de la faune et de la flore de cette France lointaine dépend des précautions qui seront prises pour éviter l'introduction d'espèces étrangères qui risqueraient de faire disparaître ces espèces uniques et fragiles.

Les îles australes, laboratoires de l'évolution

PIERRE JOUVENTIN

Sur ces îles du bout du monde, les espèces animales et végétales ont évolué, en vase clos, à l'abri de l'influence humaine, du moins jusqu'à un passé récent : l'introduction volontaire ou accidentelle d'espèces continentales perturbe ces écosystèmes fragiles et originaux.

Les Terres australes et antarctiques françaises sont constituées de trois groupes d'îles dans le Sud de l'océan Indien (Kerguelen, Crozet et Amsterdam), ainsi que par la Terre Adélie, portion du continent antarctique revendiquée par la France. Seule la côte de l'Antarctique a été colonisée par quelques animaux et plantes. C'est sur l'archipel de Pointe Géologie qu'a été construite la base où l'on étudie les différentes facettes de l'écologie polaire et subpolaire.

Ces terres sont parmi les plus isolées des continents habités et elles constituent des sanctuaires où les perturbations humaines paraissent les moins sensibles. Ainsi, sur l'île Amsterdam a été placée une station de pompage de l'air qui sert de référence, de «zéro absolu» dans les études sur la pollution atmosphérique. Ces groupes d'îles, qui s'échelonnent de la zone polaire à la zone subtropicale, sont assez hétérogènes sur le plan climatique. Les trois archipels de l'océan Indien présentent la particularité d'être les seuls territoires d'outre-mer où n'habite aucune population humaine sédentaire. Les seuls habitants temporaires de ces terres lointaines sont des scientifiques ou des techniciens qui viennent y passer quelques mois, puis retournent en métropole dans leurs laboratoires ou leurs administrations d'origine. Ainsi, les Terres australes et antarctiques françaises ont des conditions climatiques variées, à l'image de l'histoire de leur colonisation.

À la recherche d'un nouvel Eldorado

Dès le Moyen Âge, les géographes supposent l'existence, de l'autre côté du monde habité, d'une masse continentale symétrique, la *Terra Australis Incognita* ; censée apporter de nouvelles richesses, elle fut le moteur des explorations dans l'hémisphère Sud. En réalité, la seule masse continentale découverte en 1820 est le glacial continent antarctique. Le Français Jules Dumont d'Urville explore les régions antarctiques et découvre des terres inconnues ; en 1840, il est le premier à mettre pied sur le continent antarctique qui devient la terre Adélie, du nom de son épouse. C'est la réalisation d'un rêve de conquêtes qui avait commencé dès 1522, lorsque le Portugais Juan Sebastian del Cano, un compagnon de Fernand de Magellan, avait aperçu l'île Amsterdam sur la route du retour. Cette île est

1. LE MANCHOT ADÉLIE est bien adapté à la plongée et au froid. Comme beaucoup d'oiseaux marins, il nidifie sur la côte du continent antarctique.

redécouverte par des marins hollandais, puis elle est oubliée jusqu'à ce que des commerçants de La Réunion demandent au gouvernement français d'en prendre possession, en 1843, ainsi que de sa voisine l'île Saint-Paul, afin qu'ils puissent exploiter les langoustes. En 1871, une famille réunionnaise s'installe sur l'île Amsterdam, mais elle en repart la même année abandonnant quelques bovins qui allaient se multiplier.

Le Malouin Nicolas Marion-Dufresne, capitaine de la Compagnie des Indes, voulait être le premier à explorer ce nouvel Eldorado, plus au Sud. Chargé de ramener à Tahiti un indigène qui avait suivi Louis Antoine de Bougainville jusqu'en France, il change de destination au décès de son passager, mais ne trouve que les îles Crozet. Dépit, il poursuit vers la Nouvelle-Zélande, où il est massacré par les Maoris, en 1772. Un mois après la mort de Marion-Dufresne, Yves de Kerguelen, officier de la Marine royale lancé dans cette «course au trésor», découvre l'archipel auquel on donnera son nom. À son retour à la Cour, il annonce un peu vite la découverte du fameux continent austral et de ses richesses entrevues. Il doit reconnaître son erreur après y être retourné deux ans plus tard et sa légèreté le conduit à la Bastille, d'où la Révolution française le sortira. L'explorateur anglais James Cook, alors qu'il est aussi en train de ramener un Tahitien chez lui, fait un crochet par l'île Kerguelen où il débarque à la fin de l'année 1776. Il en fait le tour... et la nomme île de la Désolation.

Les récits désillusionnés des découvreurs attirent pourtant une nouvelle vague d'aventuriers. Car l'abondance des éléphants de mer et des otaries dans ces îles subantarctiques vierges est devenue une source de profit à une époque où les villes s'éclairent à l'huile animale. Phoquières et baleiniers, souvent d'origine américaine, affluent et, en quelques dizaines d'années, les animaux marins sont menacés de disparition : les otaries s'éteignent pour une centaine d'années et les baleines sont menacées d'extinction par cette chasse industrielle. L'exploitation s'arrête entre 1930 et 1950 selon les régions, car la mise au point d'une huile minérale fait chuter les cours de ces richesses fragiles. Bien qu'elles soient dépourvues de richesses, ces îles du bout du monde n'ont pu rester à l'abri de la recherche du profit, mais, du moins, ont-elles conservé jusqu'à nos jours un patrimoine biologique unique au monde.

Autour des années 1950, une base permanente est mise en place par la France dans chacun des trois groupes d'îles des Terres australes et antarctiques françaises ainsi que sur l'archipel. Aujourd'hui, la recherche scientifique est la principale activité à terre et la pêche l'activité dominante en mer, mais, comme hier, la pression est grande sur les richesses biologiques, non par les sociétés françaises qui observent des quotas, mais par les pêcheurs sous pavillon de complaisance qui écument les eaux internationales, voire françaises.

La souveraineté de l'État français sur les îles de l'océan Indien est assurée par l'administration des Terres australes et antarctiques françaises, dont le siège est maintenant situé à La Réunion. Cet organisme, qui dispose d'une autonomie administrative et financière, est placé sous la tutelle du Secrétariat d'État à l'Outre-mer. La station Dumont D'Urville, en terre Adélie, est gérée par l'Institut français pour la recherche et la technologie polaires, un groupement d'intérêt public situé à Brest, dont la tutelle principale est le ministère de la Recherche.

L'Institut français pour la recherche et la technologie polaires constitue surtout une agence de moyens permettant aux laboratoires métropolitains de mener leurs recherches polaires et subpolaires en disposant de la lourde logistique nécessaire dans ces régions ; par exemple, un bateau ravitailleur de 120 mètres de longueur, le *Marion-Dufresne*, qui constitue aussi le plus grand navire océanographique français est à leur disposition. Dans chacun des quatre districts austraux (Kerguelen, Crozet, Amsterdam et terre Adélie), il existe une base à vocation scientifique. Depuis quelques années, l'Institut français pour la recherche et la technologie polaires anime aussi la recherche arctique, s'appuyant en particulier sur la base Jean Corbell, au Spitzberg, qui accueille depuis longtemps les chercheurs français, et dont les bâtiments ont été récemment rénovés.

La plus connue de ces îles est Kerguelen : sa superficie, égale à 7 000 kilomètres carrés, est comparable à celle de la Corse et sa longueur de côtes à celle de la France. Plus modeste dans ses dimensions, l'archipel Crozet (500 kilomètres carrés) est unique par sa richesse en oiseaux marins : 36 espèces s'y reproduisent, dont six espèces d'albatros et on y trouve 60 tonnes d'oiseaux par kilomètre carré, sans compter les éléphants de mer et les otaries !

Un patrimoine biologique unique, mais fragile

Comment peut-on expliquer la présence dans ces contrées rudes de la plus forte biomasse au monde ? Ces îles subantarctiques constituent les seules terres où viennent se reproduire les oiseaux et les mammifères marins qui se nourrissent sur les immensités océaniques environnantes, c'est-à-dire dans un rayon de 3 000 kilomètres à la ronde. Cette immense zone océanique est particulièrement riche : d'une part, les eaux froides sont très poissonneuses – c'est notamment le cas de l'océan Austral – et, d'autre part, trois fronts océaniques constituent des zones de contact entre masses d'eau de températures différentes ; cette configuration délimite quatre milieux marins qui abritent des proies abondantes et variées. Aussi toutes ces espèces de prédateurs marins les exploitent-elles, non seulement en surface, mais aussi en profondeur, de jour comme de nuit.

Dans les écosystèmes continentaux qui nous entourent, la matière organique se déverse par les fleuves, les terres enrichissant les mers. Dans les îles australes, c'est l'inverse. Les millions d'oiseaux et de mammifères qui se nourrissent dans les océans viennent se reproduire à terre et ils fertilisent les sols par leurs déjections, leurs mues et leurs cadavres.

Outre cette originalité de fonctionnement de ces écosystèmes insulaires, la faune et la flore sont très particulières, car ces îles océaniques jaillies du fond de l'océan ne sont accessibles que par l'eau ou par l'air. Les animaux et les plantes apportés par la mer ou par le vent ont évolué dans l'isolement, aussi ces communautés originales sont constituées de nombreuses espèces endémiques, c'est-à-dire qui n'existent qu'en cet endroit du monde. Comme les îles Galapagos ou Hawaï, ces sommets de volcans sous-marins sont des laboratoires de l'évolution.

Cette originalité a pour contrepartie une extrême fragilité, car l'introduction de rats, de chats, de chiens, de chèvres, de cochons ou de lapins bouleverse les équilibres établis

depuis des millénaires et se transforme en catastrophe écologique. À Kerguelen par exemple, quelques chats ont été volontairement introduits dans les années 1950 pour chasser les rats et les souris qui avaient été introduits, involontairement cette fois, par les phoquiens et les baleiniers du XIX^e siècle. Dans ce monde froid et humide dépourvu d'arbres ou d'arbustes, ces chats domestiques ont eu des difficultés à s'acclimater, mais ils ont vite trouvé que les pétrels qui établissent leurs nids dans des terriers étaient plus faciles à attraper que les rongeurs.

Des chasseurs essayèrent sans grand succès de se débarrasser des félins redevenus sauvages. Aussi les chats se multiplièrent-ils : plusieurs milliers d'entre eux éliminèrent des millions de pétrels. Lorsque leurs proies eurent disparu, les chats ne dépérirent pas pour autant, car ils chassèrent les lapins introduits volontairement par les premiers navigateurs. Ainsi, un nouvel équilibre s'est mis en place, mais après disparition de plusieurs espèces endémiques. Heureusement, les populations de pétrels qui nidifiaient sur les îles avoisinantes ont échappé à l'extinction.

De plus, ces oiseaux marins ont une stratégie démographique beaucoup plus lente que la plupart des espèces continentales, dont les pontes nombreuses

compensent une prédation systématique à terre. Ainsi, les pétrels se reproduisent très lentement, pondant au mieux un œuf par an.

Comme l'a montré notre banque de données portant sur 25 espèces des Terres australes et antarctiques françaises et sur 30 années de suivi sans interruption de reproducteurs bagués, les oiseaux marins insulaires peuvent vivre entre 30 et 60 ans et attendre cinq à dix ans pour commencer à pondre ; leurs populations ne peuvent donc se renouveler rapidement. Dans sa vie qui dure une cinquantaine d'années, un couple d'albatros fuligineux à dos sombre (une espèce à peine plus grosse qu'une poule) pond 11 œufs. Du fait de cette démographie que l'on qualifie de «ralentie», les oiseaux des îles océaniques, qui n'ont jamais été reliées à un continent, sont particulièrement vulnérables aux prédateurs introduits.

La biodiversité grignotée par les rats

Quand on compare deux îles voisines du même archipel Crozet, de tailles similaires et présentant les mêmes possibilités de nidification pour les pétrels, on constate que neuf espèces manquent sur l'île où le rat noir a été introduit : les navires des phoquiens pouvaient

mouiller facilement, et ils ont introduit malencontreusement des rats. D'une part, ces rongeurs ont un régime alimentaire très opportuniste et ils sont de redoutables prédateurs des couvées et des petits oiseaux. D'autre part, on a récemment mis en évidence que leur impact sur toutes les îles océaniques a été considérable, réduisant souvent de moitié le nombre des espèces d'oiseaux dont beaucoup étaient endémiques. Introduits il y a plusieurs centaines d'années dans de nombreuses îles du Pacifique par les Polynésiens, ils y ont fait des ravages.

Récemment, la guerre américano-japonaise a favorisé ces bouleversements écologiques : les troupes installées dans des îlots inhabités ont introduit des rats dont l'aire de colonisation a encore augmenté. Les catastrophes provoquées par l'introduction involontaire de rats se sont produites sans même que l'homme ne réalise l'action des animaux qu'il amenait avec lui sur les îles colonisées. Le rat est un facteur important et jusqu'à présent méconnu de la réduction de la biodiversité.

Nous avons trouvé sur l'île Amsterdam les ossements fossiles d'un minuscule canard pourvu de robustes pattes et de moignons d'ailes : au cours des millénaires, il avait perdu sa capacité de voler. Il a disparu après l'arrivée de l'homme sans même avoir été remarqué ; il a récemment été décrit comme une nouvelle espèce, comme d'autres oiseaux de la même île.

On ne peut ressusciter les espèces disparues, mais peut-on arrêter une disparition programmée ? Sur le plateau de l'île Amsterdam, la plus proche des terres habitées et, par conséquent, celle que l'homme a le plus modifiée, nous avons découvert, en 1983, un albatros original, de plus de trois mètres d'envergure, dont la population était réduite à moins d'une dizaine de couples reproducteurs. En fait, ils étaient gênés dans leur nidification par la présence des vaches qui avaient été abandonnées un siècle auparavant par un éleveur ; elles s'étaient multipliées jusqu'à transformer l'île en un vaste pâturage. Les vaches furent éliminées d'une moitié de l'île où la végétation reprit ses droits en quelques années ; parallèlement une clôture fut installée pour enclore le troupeau. Aujourd'hui, la population d'albatros d'Amsterdam augmente régulièrement, mais la stratégie démographique de ce Grand Albatros, qui

2. PORT JEANNE D'ARC est une ancienne station baleinière, à Kerguelen : les premiers bouleversements écologiques apportés par l'homme dans les îles subantarctiques l'ont été par les baleiniers, puis par les phoquiens, soit directement par les chasses, soit indirectement par les espèces continentales introduites sur ces îles, telles que les rats, les chats ou les lapins.



Photographie : Pierre Louvet

pond un œuf unique tous les deux ans, est si lente que la croissance de la population est faible.

Les pétrels sont un autre exemple de restauration écologique. L'île Saint-Paul est éloignée de l'île Amsterdam d'une centaine de kilomètres. Elle a été fréquentée par les navigateurs depuis plusieurs siècles. Ses pétrels, dont une espèce est endémique, ont été quasiment détruits par les rats, mais, heureusement, un îlot rocheux où nidifiaient ces espèces leur a servi de refuge. Grâce à l'aide de la Communauté européenne et de l'administration des Terres australes et antarctiques françaises, l'île a été quadrillée par hélicoptère et un appât empoisonné, mais biodégradable, a été dispersé. Les rats et les lapins introduits ont été éliminés, en quelques jours pour les premiers et en plusieurs mois pour les seconds, le travail étant poursuivi avec des chiens dressés à cet effet. Connaissant le rythme lent de reproduction des pétrels, nous pensions qu'il faudrait plusieurs années pour que la population soit reconstituée. En fait, quelques jours seulement après l'éradication des rats, des pétrels tentaient de se reproduire sur l'île principale, démontrant ainsi que l'îlot rocheux où ils s'étaient réfugiés était saturé : chaque année sans doute, ceux qui ne parvenaient pas à trouver une place pour pondre sur l'îlot essayaient de revenir sur l'île, sans succès, car les rats se nourrissaient de leurs œufs et de leurs poussins.

Un parc national des îles australes ?

Ainsi, les îles australes, bien que remarquablement protégées par leur éloignement et par leurs rudes conditions climatiques, ne sont pas à l'abri des perturbations humaines. Paradoxalement, en raison de leur isolement passé, elles sont même beaucoup plus sensibles aux introductions d'espèces étrangères que les espèces protégées métropolitaines. On peut même suivre l'anthropisation accélérée de ces écosystèmes. Ces îles australes étant terres de science depuis un demi-siècle, nous disposons de longues séries d'observations sur la faune et sur la flore, et la banque de données évoquée précédemment n'a pas d'équivalent dans le monde.

Un programme d'observations à long terme vient d'être mis en place dans ces îles sous le contrôle du Programme Environnement, Vie et Société

du CNRS et de l'Institut français pour la recherche et la technologie polaires. Les îles australes représentent un réseau unique au monde d'observatoires permanents de l'environnement. Parce que l'environnement doit être étudié sur le long terme, nous avons créé une zone atelier de recherches sur l'environnement antarctique et subantarctique, dont nous décrivons ici les activités : elle réunit plusieurs équipes qui travaillent dans les Terres australes et antarctiques françaises. Elle permet de surveiller les milieux aussi bien terrestres que marins et, notamment, l'océan Austral qui joue un rôle clé dans le climat de la Terre. Les prédateurs marins qui se reproduisent sur ces îles constituent des bio-indicateurs des ressources océaniques et il est possible, aujourd'hui, de les suivre en mer. Les premiers oiseaux suivis par satellite sur plusieurs milliers de kilomètres, l'ont été dans les îles australes. Le Programme Environnement, Vie et Sociétés est le plus ancien des programmes interdisciplinaires sur l'environnement. Il a pour mission de promouvoir, au sein du CNRS, une recherche interdisciplinaire sur l'ensemble des systèmes naturels ou artificiels où l'homme intervient ou est intervenu soit en les exploitant, soit en les aménageant.

Parce que les écologues qui cherchent à comprendre le fonctionnement des organismes et des milieux naturels ne peuvent rester spectateurs de la dégradation des derniers sanctuaires de



3. L'ETUDE DES ANIMAUX sur les îles subantarctiques est plus facile qu'ailleurs, car ils sont peu farouches : ici, après une prise de sang, un manchot royal est remis sur son œuf.

la planète, les scientifiques demandent la création d'un parc national français. Les trois groupes d'îles australes de l'océan Indien que nous avons décrites s'étendent sur 700 000 hectares, ce qui constitue une opportunité qui, à l'échelle de notre pays, ne se représentera ni par son ampleur ni par sa valeur patrimoniale. Les conflits d'usage y sont limités par l'absence de population autochtone et d'intérêts privés ; une seule administration gère ces domaines principalement consacrés à la recherche publique et où toutes les tentatives de développement à long terme ont échoué. À la demande de l'Australie, les îles Macquarie et Heard ont été classées sites du patrimoine mondial de l'humanité ; les îles australes françaises qui sont plus riches en qualité et en quantité d'espèces le seront-elles bientôt ?

Pierre JOUVENTIN est directeur de recherche au CNRS, à Montpellier, au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive.

P. JOUVENTIN et J.-P. ROUX, *Discovery of a new albatross*, in *Nature*, vol. 305, pp. 181, 1983.

T. MICOL et P. JOUVENTIN, *Restoration of Amsterdam Island, South Indian Ocean, following control of feral cattle*, in *Biological Conservation*, vol. 72, pp. 199-206, 1995.

P. JOUVENTIN, H. WEIMERSKIRCH, *Satellite tracking of Wandering albatrosses*, in *Nature*, vol. 343, pp. 746-748, 1990.

S.L. OLSON et P. JOUVENTIN, *A new species of small flightless duck from Amsterdam island, southern indian ocean (Anatidae : Anas)*, in *The Condor*, vol. 98, pp. 1-9, 1996.

P. JOUVENTIN, T. MICOL, Y. FRENOT et V. SARANO, *Dossier scientifique : Réserve naturelle des Terres Australes Françaises*. Comité Interministériel de l'Environnement Polaire, 1996.

T. WORTHY et P. JOUVENTIN, *The fossil Avifauna of Amsterdam Island, Indian Ocean*, in *Smithsonian contributions to paleobiology*, vol. 89, pp. 39-65, 1999.

La biodiversité dans les îles subantarctiques

YVES FRENOT • JEAN-LOUIS CHAPUIS • MARC LEBOUVIER

Les insectes et les plantes des îles subantarctiques sont rares et souvent spécifiques de ces régions. Grâce à divers mécanismes d'adaptation, ils résistent aux conditions climatiques rudes, mais toute nouvelle espèce introduite dans ces milieux est une menace pour leur survie.

Dans l'histoire de l'écologie et de la biogéographie, les îles bénéficient du statut privilégié d'archétype au même titre qu'un lac ou qu'une montagne. En raison de leur isolement, de la simplicité de leurs écosystèmes comparés à ceux des milieux continentaux, et de leur fragilité, les îles océaniques ont joué un rôle fondamental dans le développement des idées concernant l'écologie et l'évolution des espèces. Parmi les milieux insulaires, ceux situés dans la province subantarctique, entre le quarantième et le cinquantième parallèles Sud, intéressent particulièrement les biologistes : ils constituent des exemples extrêmes d'isolement.

L'archipel Crozet et les îles Kerguelen sont d'origine volcanique et abritent une flore et une faune originales et encore préservées. Toutefois, bien que la fréquentation humaine y soit récente et limitée, la biodiversité de ces îles est en pleine évolution, notamment en raison de l'impact croissant, qu'il soit direct ou indirect, des activités humaines. La richesse de ces îles réside dans la gamme des écosystèmes qui s'étend des écosystèmes naturels non modifiés à des milieux où l'influence de l'homme est notable.

Le nombre des espèces autochtones vivant dans les milieux terrestres subantarctiques est réduit. Ainsi, seules 22 plantes à fleurs poussent à Kerguelen et 16 à Crozet, sur l'île de la Possession. À titre de comparaison, la flore française métropolitaine compte près de 3 000 espèces. De même, chez les insectes, on dénombre 11 espèces de diptères à Crozet et seulement 6 à Kerguelen, mais plus de 6 500 espèces dans l'hexagone ! Chez les vertébrés terrestres, on ne rencontre aucun mammifère et seulement deux espèces d'oiseaux : le canard d'Eaton (*Anas eatoni*) et le bec en fourreau (*Chionis minor*). En revanche, ces

îles sont régulièrement fréquentées par de nombreuses espèces d'oiseaux marins et par trois mammifères marins, l'éléphant de mer (*Mirounga leonina*) et deux otaries à fourrure (*Arctocephalus gazella* et *Arctocephalus tropicalis*).

Les communautés terrestres sont relativement pauvres, mais l'endémisme est élevé : à Crozet, 90 pour cent des invertébrés sont propres à la région subantarctique de l'océan Indien et 55 pour cent ne sont présents que sur cet archipel. L'endémisme des espèces végétales est moins marqué puisque la majorité des espèces poussent dans la plupart des îles subantarctiques. Le lyallia (*Lyallia kerguelensis*), par exemple, est la seule plante supérieure réellement spécifique de Kerguelen (voir la figure 1).

Ainsi, les îles subantarctiques constituent la limite Sud de l'extension du territoire de nombreux organismes. Même si les conditions climatiques n'y sont pas extrêmes, les températures sont basses toute l'année et représentent un facteur limitant pour le développement et pour la reproduction de nombreuses espèces d'invertébrés et de végétaux.

Les contraintes de l'environnement subantarctique, qui constituent de très fortes pressions de sélection, ont favorisé des adaptations morphologiques et physiologiques particulières. Ainsi, de nombreux insectes ne peuvent voler : l'aptérisme est particulièrement développé. Sur les 11 espèces de diptères autochtones présentes à Crozet, seules quatre sont aptes à voler, et les autres ont des ailes plus ou moins réduites. Le stade extrême de cette évolution est observé chez *Anatanta aptera*, une mouche spécialisée dans la dégradation des fientes et des cadavres dans les colonies d'oiseaux marins : Philippe Vernon, à l'Université de Rennes, a montré que chez cette espèce dont les ailes ont totalement disparu, les muscles des ailes ont été remplacés, dans le thorax, par des réserves lipidiques qui lui permettent de résister à des périodes de jeûne prolongé, lorsque les colonies sont désertées par les oiseaux, en hiver.

Sur ces îles, les oiseaux et les mammifères marins jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres en les approvisionnant d'énormes quantités de matières organiques d'origine océanique. Les invertébrés qui décomposent la matière organique dominent par le nombre de leurs espèces et par leur abondance ; leurs prédateurs sont quasi absents et les herbivores réduits à quelques charançons. Jusqu'à une période récente, aucun mammifère terrestre herbivore ou carnivore n'avait fréquenté ces îles.

Ces particularités rendent les communautés insulaires fragiles face aux perturbations susceptibles de se produire, notamment face à l'introduction d'espèces végétales et animales étrangères. L'évolution récente de la biodiversité des communautés terrestres, liée à l'arrivée d'espèces invasives risque d'entraîner de profondes modifications dans la structure et dans le fonctionnement de ces écosystèmes.

Au XIX^e siècle, les phoquières et les baleiniers qui fréquentaient les archipels Crozet et Kerguelen ont introduit, volontairement ou par accident, de nombreux mammifères, sauvages ou domestiques. Si les porcs ou le vison d'Amérique ne se sont pas implantés, sept espèces (le chat, le mouflon, le mouton, le lapin, le rat noir, le renne et la souris) sont encore présentes dans ces îles, dont trois ont un impact notable sur le fonctionnement des écosystèmes locaux : le rat noir, surtout sur l'île de la Possession, le lapin et le chat, essentiellement à Kerguelen. Dans cet archipel, le plus touché par les mammifères introduits, toutes les îles ne sont pas soumises aux déprédations des sept espèces et, souvent, une à quatre de ces espèces seulement sont présentes sur le même espace. Certaines îles sont indemnes d'introductions ; elles constituent de ce fait des systèmes de référence, conférant à l'archipel de Kerguelen les qualités d'un « laboratoire » naturel où l'on peut étudier l'impact des espèces introduites.

La biodiversité végétale

Certains végétaux également se sont adaptés aux rudes conditions climatiques des îles subantarctiques. C'est notamment le cas du chou de Kerguelen (*Pringlea antiscorbutica*), une espèce emblématique de ces régions, probablement héritée du Tertiaire. Albert-Jean Dorne et Serge Aubert du

Centre d'études nucléaires, à Grenoble, et Françoise Hennion de l'Université de Rennes, étudient les mécanismes de la photosynthèse et le métabolisme du carbone de cette espèce de chou ; ils étudient également le rôle joué par certaines substances dans sa résistance aux stress environnementaux, notamment au gel.

Une étude récente de la flore introduite sur les îles Crozet et Kerguelen nous a permis de montrer que les phoquières et les baleiniers ont apporté peu d'espèces végétales. En revanche, le nombre d'espèces étrangères qui se sont installées dans ces îles depuis l'établissement des bases permanentes, dans les années 1950-1960, a augmenté de façon spectaculaire. Aujourd'hui encore, le nombre des introductions ne cesse de croître. La quasi-totalité des espèces introduites appartient à la flore des régions tempérées de l'hémisphère Nord et, notamment, à la flore française. Toutes les espèces récemment introduites sont présentes sur les bases, mais celles qui ont colonisé l'ensemble des îles sont assez peu nombreuses. Citons le pâturin annuel *Poa annua*, une graminée aujourd'hui présente sur presque toutes les îles péri-antarctiques, ou le pissenlit *Taraxacum officinale*, à Kerguelen. Les espèces introduites étant essentiellement localisées sur les bases, on en conclut que les navires ravitailleurs, dont le fret provient essentiellement de France, constituent le principal vecteur de ces introductions.

Certaines pratiques facilitent l'établissement d'espèces étrangères. Ainsi, à proximité de la base Alfred Faure, à Crozet, on rejette en surface les eaux usées ce qui favorise le développement de nombreuses espèces nitrophiles. Ce n'est pas le cas à Kerguelen, où les effluents sont rejetés en mer. Aux introductions accidentelles s'ajoutent des introductions directement liées aux activités d'élevage, pratiquées à Kerguelen. Ainsi, dans les années 1910, lors de l'installation de la ferme de Port-Couvreux, 1 600 moutons en provenance des Malouines ont été implantés sur la presqu'île de la Grande Terre. Bien que cet élevage ait

1. QUELQUES VÉGÉTAUX ET INSECTES colonisent les îles autour de l'Antarctique. Ces espèces sont souvent endémiques et ont élaboré des mécanismes d'adaptation au froid. Ainsi, la mouche *Anatalanta aptera* (ci-dessus) a perdu sa capacité de voler, et les muscles des ailes ont été remplacés par des réserves lipidiques qui lui permettent de survivre en hiver, lorsque la nourriture est rare. Le charançon des îles Crozet, *Bothrometopus randi*, est absent de Kerguelen (page de gauche, dessin de E. Crafford, in S. Afr. J. Antarct. Sci. (1986), reproduit avec l'autorisation des auteurs). Le lyallia, *Lyallia kerguelensis* (ci-contre) est une plante qui ne pousse que sur les îles Kerguelen.

Le lapin dans l'archipel de Kerguelen

Introduit en 1874 par des marins pour constituer une réserve alimentaire en cas de naufrage, le lapin occupe aujourd'hui la plus grande partie de l'île principale de l'archipel de Kerguelen et neuf autres îles. En l'absence de compétiteurs et de prédateurs efficaces, et malgré des conditions climatiques rigoureuses, le lapin s'est facilement adapté à son nouvel environnement. Quelques dizaines d'années après son introduction, son impact sur les communautés végétales alertait déjà les botanistes qui fréquentaient l'archipel. Le lapin, par le creusement de ses terriers, érode les terrains qu'il colonise et, en outre, il réduit notablement la richesse spécifique des communautés végétales. Quand certaines espèces végétales disparaissent, les insectes inféodés à ces plantes sont menacés également. De surcroît, le lapin perturbe aussi le peuplement de pétrels nidifiant dans des terriers : d'une part, il détruit les sites de reproduction et, d'autre part, il contribue au maintien de la population de chats. Introduit au début des années 1950, le chat a une répartition voisine de celle du lapin. Ils seraient entre 3 500 et 6 500 selon les estimations de Dominique Pontier, de l'Université de Lyon (voir page 51). Les chats survivent au cours de la mauvaise saison en se nourrissant de lapins, leur principale proie hivernale ; durant l'été ils prélèvent plusieurs centaines de milliers de pétrels.

Compte tenu des dégradations occasionnées par le lapin, le contrôle de la population a été envisagé dès 1955-1956 par l'introduction du virus de la myxomatose. Malgré l'absence de vecteurs de la maladie (puces et moustiques), le virus s'est propagé par contact, occasionnant une réduction importante de l'effectif en lapins. Toutefois, en raison de ce mode de transmission, la virulence des souches de myxomatose a rapidement diminué et les lapins sont devenus résistants à cette maladie : les populations de lapins se sont progressivement reconstituées. Au cours des années 1990, le virus de la myxomatose ne jouait plus qu'un rôle mineur dans la régulation des populations. Afin d'améliorer la circulation des virus à forte virulence, les biologistes ont introduit expérimentalement, sur une île de l'archipel, en 1988, *Spilopsyllus cuniculi*, une puce spécifique du lapin. Depuis quelques années, après une phase d'installation assez longue, ce parasite contribue effectivement à une meilleure transmission du virus de la myxomatose : la densité de lapins a

notablement diminué. Cette diminution semble insuffisante pour obtenir une réelle restauration écologique de ces îles.

Afin d'analyser la capacité de restauration des îles dégradées, un programme d'éradication du lapin a été lancé en 1992 sur l'île Verte, l'île Guillou et l'île aux Cochons. Après un état des lieux détaillé, le lapin a été éliminé par empoisonnement à l'aide d'un anticoagulant, le chlorophacinone, respectivement en 1992, 1994 et 1997-1999. Au cours des années suivantes, les biologistes ont étudié les réactions des communautés végétales et animales. On a d'abord confirmé l'impact considérable du lapin sur ces îles, où seuls quelques pieds de chou et d'azorelle avaient subsisté sur des falaises inaccessibles aux lapins. Avant intervention, la densité de lapins était proche de neuf par hectare sur les îles Verte et Guillou et de 16 sur l'île aux Cochons. Une seule opération d'empoisonnement a permis d'éradiquer totalement le lapin des deux premières îles, mais deux campagnes ont été nécessaires sur l'île aux Cochons. Ces opérations ont eu lieu en hiver, ce qui a permis de réduire au maximum leur impact sur les autres espèces subantarctiques, absentes à cette période de l'année.

Sur les îles Verte et Guillou, l'élimination du lapin s'est traduite par une augmentation notable des différentes espèces végétales. Toutefois, la recolonisation par les espèces disparues est très lente, notamment en ce qui concerne le chou et l'azorelle qui atteignent leur maturité sexuelle après plusieurs années de croissance. Ainsi, après installation des premiers pieds de chou issus de graines arrivées sur les côtes de l'île Verte par flottage, quatre années ont été

nécessaires pour produire les graines qui seront à l'origine de la colonisation de zones intérieures de l'île. Sur l'île Guillou, où les falaises constituaient des refuges pour des pieds reproducteurs de chou, d'azorelle, ou d'autres espèces menacées par le lapin, la restauration des communautés végétales est plus rapide. Pour les communautés animales, aucune évolution notable n'a encore été observée, même si, sur l'île Verte, on constate une augmentation de la richesse spécifique des peuplements d'invertébrés et du nombre de couples reproducteurs de pétrels à terriers. Au cours de l'expérimentation, des perturbations d'ordre climatique ont modifié la recolonisation : l'augmentation des températures et surtout les sécheresses estivales récentes ont entraîné une mortalité importante des jeunes pieds de chou et de l'acaena. L'espace

ainsi libéré a été rapidement colonisé par le pissenlit.

Ces premiers résultats montrent que l'on peut restaurer les communautés originelles après éradication du lapin. Cependant ces processus sont lents et risquent d'être perturbés par les changements climatiques et par la compétition accrue entre plantes introduites et espèces locales.

Le chou de Kerguelen et l'azorelle (ci-contre) ne subsistent que sur les îles dépourvues de lapins. Sur les îles où le lapin est présent (ci-dessus) ces deux espèces ont presque disparu, laissant la place à de vastes prairies, où l'acaena forme l'essentiel de la végétation.



été abandonné et qu'aucune activité n'ait eu lieu depuis 1931, on observe encore aujourd'hui, autour des bâtiments en ruines, de nombreuses graminées introduites avec le fourrage de ces animaux. Dans les années 1970, des graminées fourragères ont été également semées sur quatre îles de l'archipel. Ces semis visaient à augmenter les ressources alimentaires des moutons et des mouflons, introduits respectivement en 1952 et 1957.

Jusqu'à présent, les espèces végétales introduites restent localisées et se disséminent peu ou lentement autour de leurs points d'introduction. Rares sont celles qui, aujourd'hui, constituent une réelle menace pour les espèces locales. Une exception toutefois : *Stellaria alsine*, une petite plante des milieux humides, apparue à Crozet au début des années 1990. Aujourd'hui, elle s'étend sur la base Alfred Faure en de larges taches où elle a totalement éliminé les autres plantes. On la rencontre également, plus ponctuellement, à plus de quatre kilomètres de la base. Cette espèce, qui produit de nombreuses graines facilement dispersées par le vent et qui peut se reproduire par fragmentation des rameaux, semble constituer une menace pour les tourbières et autres communautés des habitats humides de l'île de la Possession.

Depuis 1996, nous avons suivi l'influence du climat sur la floraison des espèces végétales introduites sur les bases de Crozet et de Kerguelen. Nous avons montré que certaines d'entre elles trouvent dans le climat subantarctique des conditions qui limitent leur reproduction. Ainsi, l'achillée *Achillea ptarmica* n'a pas fleuri à Crozet depuis 1982, date de sa première observation ; en 1998, elle a présenté quelques boutons floraux. La houlque laineuse, *Holcus lanatus*, produit plus ou moins de graines d'une année sur l'autre. Ces espèces, aujourd'hui cantonnées à des sites restreints, car elles ne produisent pas assez de graines, pourraient, si la température locale s'élevait ne serait-ce que de quelques dixièmes de degrés, augmenter considérablement leur production de graines et, par conséquent, leur pouvoir de dissémination : elles menaceraient alors la flore locale.

Chez les insectes, nous disposons de modèles originaux qui, du fait du petit nombre d'espèces et de la simplicité des écosystèmes, permettent d'aborder plus facilement qu'ailleurs les relations entre espèces autochtones



2. LA FERME DE PORT-COUVREUX est construite en 1911 par les frères Bossières, armateurs au Havre, pour y développer l'élevage du mouton. En 1913, plus d'un millier de bêtes en provenance des îles Malouines sont débarquées, mais elles ne survivent pas. Avec ces animaux, du fourrage a probablement été importé et, aujourd'hui encore, la végétation autour des anciens bâtiments est dominée par des graminées introduites.

et espèces introduites. Ainsi, l'importation des moutons à Port-Couvreux s'est accompagnée de l'introduction d'un petit carabe, *Ooapterus soledadinus*, originaire lui aussi des îles Malouines. Il fait partie des très rares prédateurs de Kerguelen s'attaquant aux insectes. Il n'a fallu que 30 ans pour que la mouche autochtone *Anatalanta aptera* disparaisse de Port-Couvreux, et seul *Ooapterus* subsiste aujourd'hui dans ce secteur. L'aptérisme de l'entomofaune locale, frein aux échanges rapides entre les milieux, contribue vraisemblablement à fragiliser ces insectes face à l'introduction d'un prédateur efficace tel qu'*Ooapterus* qui n'a lui-même qu'un seul ennemi, la souris.

Quand les insectes importés menacent la flore locale

Comme pour les espèces végétales, un réchauffement climatique favoriserait le développement de certains insectes. C'est le cas par exemple de la mouche bleue, *Calliphora vicina*, introduite à Kerguelen dans les années 1970. Après être restée cantonnée, les premières années, aux bâtiments chauffés de la base de Port-aux-Français, cette espèce parvient aujourd'hui à se reproduire à l'extérieur, et elle occupe désormais une grande partie de l'Est de l'archipel. Pendant le printemps et l'été australs 1997-1998, les conditions météorologiques ont été plus chaudes et moins pluvieuses, et nous avons constaté que le nombre de *Calliphora* a décuplé et que sa période d'activité a

augmenté d'un mois par rapport aux années antérieures. Cette année-là, la compétition entre la mouche étrangère *Calliphora* et la mouche autochtone *Anatalanta*, dont les larves exploitent les mêmes ressources alimentaires (fientes, cadavres...), a été particulièrement forte.

Le cas du papillon des plantes crucifères, *Plutella xylostella*, est également démonstratif. Cette espèce, très commune dans les régions tempérées, a sans doute été importée régulièrement dans toutes les îles subantarctiques avec les légumes frais qui sont apportés pour nourrir le personnel des bases. Jusqu'à présent, aucune infestation des crucifères locales n'a été observée dans les îles françaises, mais, à Marion, une île subantarctique sud-africaine, *Plutella* a été observée sur le chou de Kerguelen dès 1986 et le réchauffement climatique des années 1980-1990 a contribué à son extension sur cette île. Les chenilles de ce papillon représentent aujourd'hui une menace sérieuse pour le chou de Kerguelen, sur l'île Marion.

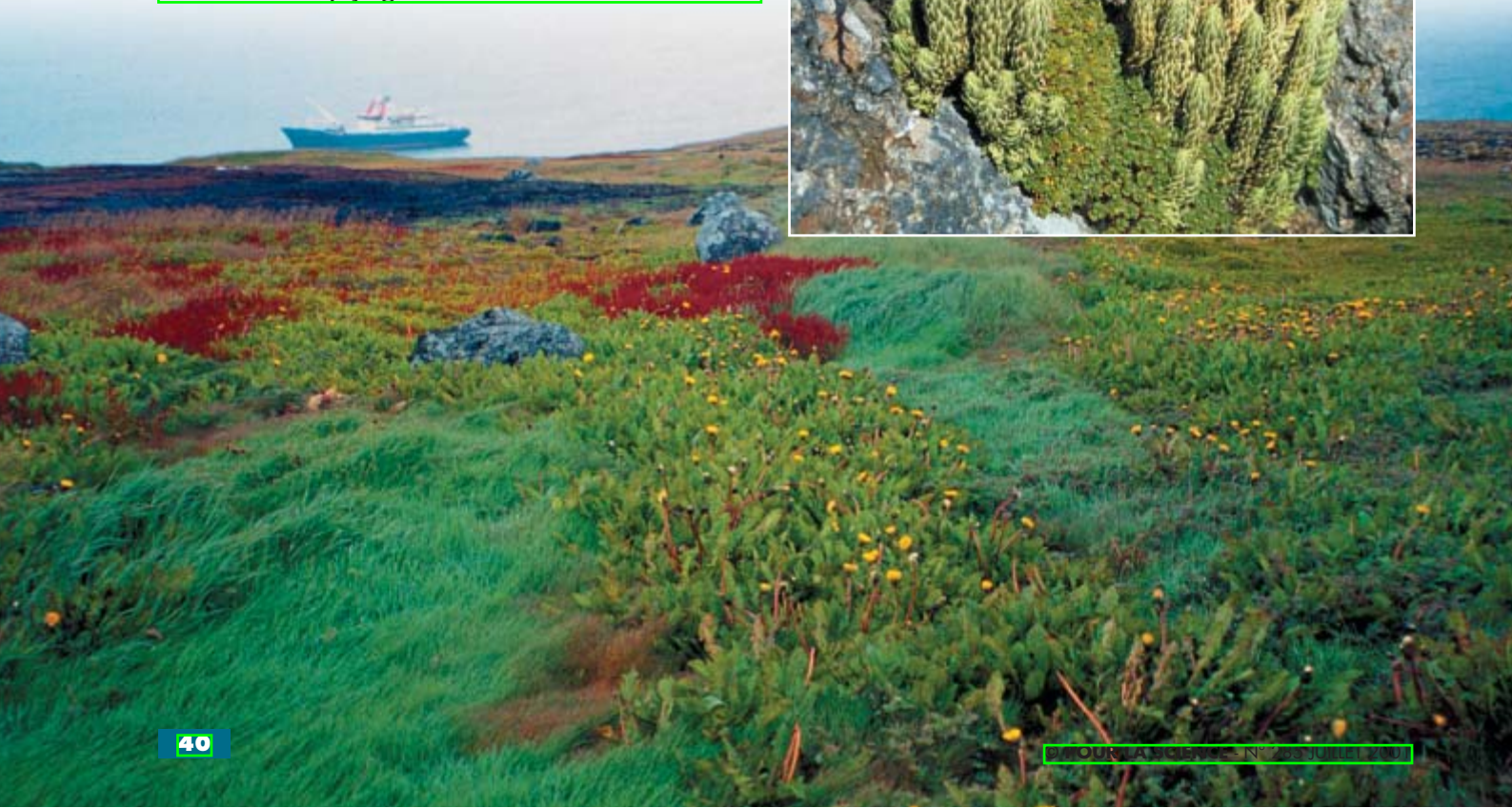
Nombre de critères montrent que la biodiversité des communautés terrestres subantarctiques est en pleine évolution, sous l'effet conjugué des changements climatiques et de la fréquentation humaine qui risque de s'accroître encore à l'avenir. L'augmentation de la demande touristique pour cette région du monde démontre que le public, amateur de terres vierges et protégées, a su reconnaître dans ces territoires des milieux exceptionnels par l'originalité de leur faune, de leur flore, ainsi que par la beauté de leurs paysages.



Pin d'extrême Nord
Vives Frenot
CNRS
FRIT



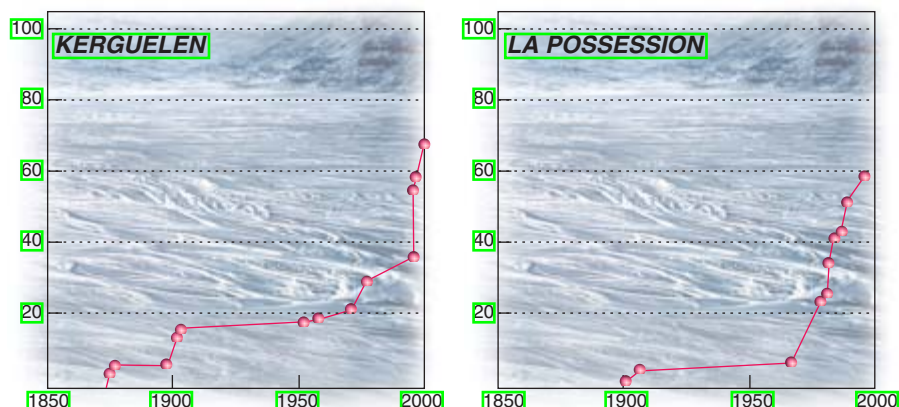
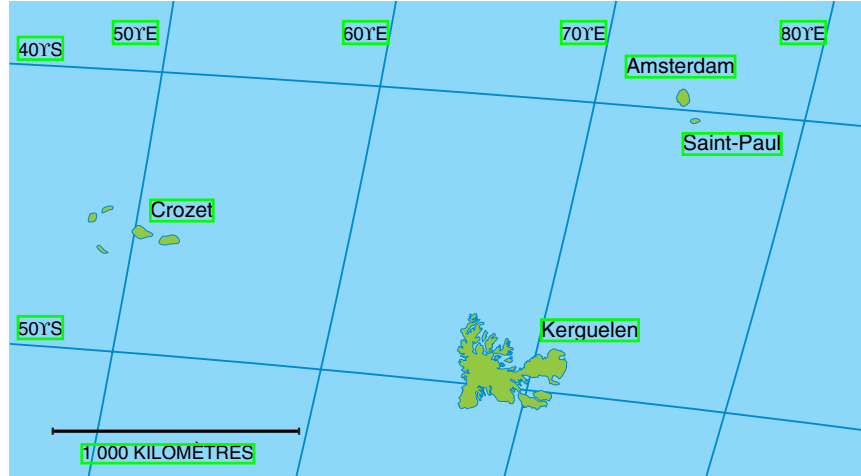
3. LES ESPECES VEGETALES des îles subantarctiques sont peu nombreuses : une vingtaine, contre 3 000 en France. Ce sont essentiellement le chou de Kerguelen (*ci-dessus*), la graminée *Festuca contracta* (*en haut à droite*), abondante à Kerguelen, ou *Lycopodium saururus* (*ci-contre*), qui pousse dans les zones humides et sur les plateaux rocheux. Elles sont menacées par les espèces étrangères introduites par bateau. À Crozet, pissenlit, petite oseille et graminées introduites (*ci-dessous*) font des taches de couleurs inhabituelles dans ces paysages.



Près de 15 000 touristes visitent chaque année les régions polaires Sud, principalement la péninsule antarctique, mais le tourisme se développe également dans les îles subantarctiques : par exemple, en 1989, la station baleinière de Grytviken, en Géorgie du Sud, accueillait quatre navires touristiques, représentant 500 passagers ; en 1999, ce sont 26 bateaux, avec à leur bord 2 500 touristes, qui ont visité la station. Dans les îles subantarctiques françaises, le tourisme représente une douzaine de passagers présents à bord du *Marion-Dufresne* lors des quatre rotations logistiques qu'il effectue chaque année. Toutefois, si cette activité se développe à l'avenir, elle constituerait une nouvelle menace pour ces milieux fragiles : davantage d'espèces risquent d'être introduites en raison de l'augmentation de la fréquence des navires, les sols risquent d'être dégradés par les randonneurs, les colonies de reproduction d'oiseaux d'être dérangées. Il est indispensable que ce développement touristique soit accompagné de mesures strictes d'encadrement et d'aménagements spécifiques des bases et des sites visités pour concilier accueil des touristes et protection de l'environnement.

Nous commençons aujourd'hui à entrevoir les grandes tendances de l'évolution actuelle de la biodiversité subantarctique. Nos résultats mettent en évidence l'absolue nécessité de disposer d'observations sur le long terme pour pouvoir surveiller l'évolution de cette biodiversité et, notamment, l'introduction de nouvelles espèces ou la raréfaction d'espèces autochtones, d'évaluer les conséquences de l'évolution des communautés sur le fonctionnement de ces écosystèmes fragiles et d'apporter aux gestionnaires les informations nécessaires à la mise en place de mesures garantissant la conservation de ces milieux exceptionnels. Le statut de zone atelier récemment octroyé par le CNRS et le soutien apporté par l'Institut polaire à ces recherches devraient nous permettre d'atteindre ces objectifs.

Dans ce contexte fragile toute modification du climat global risque d'avoir des conséquences notables qui s'ajoutent aux menaces déjà mentionnées. Peut-on avoir une idée de la modification du climat dans cette région du monde? Nous manquons de recul pour pouvoir affirmer que les



4. L'INTRODUCTION DE NOUVELLES ESPÈCES DE PLANTES a coïncidé avec la fréquentation des îles subantarctiques par l'homme. Les phoquières du XIX^e siècle ont introduit peu d'espèces, mais l'établissement de bases permanentes en 1951, à Kerguelen, et en 1964, sur l'île de la Possession, à Crozet, a eu pour conséquence un accroissement spectaculaire des espèces étrangères. Cette tendance se poursuit aujourd'hui, parce que les navires y sont de plus en plus nombreux.

changements, observés depuis le milieu des années 1970 à Kerguelen, relèvent d'une évolution plus globale du climat. La station météorologique de Port-aux-Français ne date que d'une cinquantaine d'années, mais nous disposons de sources antérieures d'informations. Ainsi, les récits des phoquières, au XIX^e siècle, décrivent un climat apparemment plus rigoureux qu'aujourd'hui, avec de fortes précipitations de neige durant plusieurs mois par an. De surcroît, l'étude des moraines frontales des glaciers de Kerguelen a mis en évidence des oscillations glaciaires (des avancées ou des

reculs du front des glaciers) de faible ampleur depuis la fin du XVII^e siècle, période correspondant au Petit Âge glaciaire dans l'hémisphère Nord. En revanche, à partir de 1975, on note une accélération du retrait des glaces : le front du glacier Ampère, par exemple, a reculé de plus de quatre kilomètres depuis 1974. La calotte glaciaire Cook elle-même a perdu plus de 100 mètres d'épaisseur en certains endroits de sa périphérie. La rapidité et l'ampleur de ces phénomènes attestent de l'importance des changements climatiques actuels dans cette région du monde.

Les auteurs sont membres de l'Unité Mixte de Recherche «Ecobio» du CNRS et de l'Université de Rennes. Yves FRENOT et Marc LEBOUVIER travaillent à la Station biologique de Paimpont, et Jean-Louis CHAPUIS au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Y. FRENOT et al., *Datation de quelques sédiments tourbeux holocènes et oscillations glaciaires aux îles Kerguelen*, in C. R. Acad. Sci. Paris, vol. 320, pp. 567-573, 1997.

J.-L. CHAPUIS et al., *Growth and repro-*

duction of the endemic Cruciferous species Pringlea antiscorbutica in Kerguelen Islands, in Polar Biol., vol. 23, pp. 196-204, 2000.

Y. FRENOT et al., *Human activities, ecosystem disturbances and plant invasions in subantarctic Crozet, Kerguelen and Amsterdam Islands*, in Biological Conservation, vol. 101, pp. 33-50, 2001.

J.-L. CHAPUIS et al., *Eradication of the rabbit (Oryctolagus cuniculus) by poisoning, on three islands of the subantarctic archipelago of Kerguelen*. Wildl. Res., sous presse.

Prédateurs marins et changements climatiques

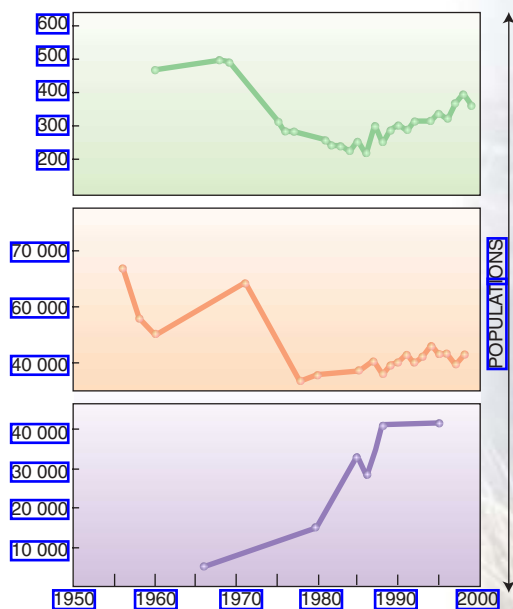
H. WEIMERSKIRCH • C. BARBRAUD • C. GUINET • O. CHASTEL • Y. CHEREL

Le suivi à long terme de la démographie des populations d'oiseaux et de mammifères marins, couplé à l'étude de leur écologie alimentaire fournissent de précieuses informations sur la variabilité de leur environnement et sur les changements climatiques globaux qui touchent l'océan Austral.

Entre les quarantièmes rugissants et les cinquantièmes hurlants, les oiseaux marins, tels les albatros et les pétrels abondent, même à des milliers de kilomètres des côtes les plus proches. Plus près du continent, la densité et la diversité des espèces augmentent et apparaissent les manchots et d'autres groupes, tels les pinnipèdes. Puis, à proximité immédiate des îles se multiplient colonies d'oiseaux et de mammifères marins que l'on peut approcher et étudier sans difficultés. Bien qu'ils viennent à terre pour se reproduire, ces animaux dépendent des res-

sources marines. La communauté des oiseaux et des mammifères marins de l'océan Austral est probablement la plus importante au monde et se nourrit de crustacés (notamment du krill antarctique, *Euphausia superba*), de poissons et de calmars. Contrairement aux autres composantes de l'écosystème, exclusivement marines, les oiseaux et les pinnipèdes sont facilement accessibles à terre pendant la reproduction, ce qui permet d'étudier leur démographie (en suivant des animaux marqués) ou leur comportement alimentaire en mer, grâce aux techniques de télémétrie.

Les travaux réalisés depuis 12 ans dans le Laboratoire d'écologie de Chizé sur le régime alimentaire et sur les déplacements en mer associés à l'activité de pêche des oiseaux marins et des pinnipèdes permettent aujourd'hui de définir les secteurs de l'océan d'où ces prédateurs tirent leurs ressources marines. De telles informations sont maintenant disponibles pour plusieurs espèces d'oiseaux et de pinnipèdes marins, telles que les albatros, les manchots et les otaries. Elles montrent que la plupart des espèces ne prospectent pas l'océan Austral au hasard,



1. LE SUIVI DES POPULATIONS d'albatros (en haut) et d'éléphants de mer (au milieu) montre que vers 1970 plusieurs populations se sont effondrées. Au contraire, depuis 1950, les effectifs de manchots royaux (en bas) se sont reconstitués.

mais qu'elles concentrent leur activité de pêche dans des secteurs océanographiques à forte productivité, souvent utilisés par les pêcheries, et identifiés à partir de leurs caractéristiques physiques, telles que la température de surface de l'océan, la concentration en chlorophylle, les courants marins et la profondeur. Les prédateurs marins sont aussi utilisés comme bio-indicateurs de la répartition des ressources marines et de leur évolution dans le temps et dans l'espace. Certains prédateurs concentrent leurs activités de pêche dans des secteurs particuliers, tels que le front polaire pour les manchots royaux ou le plateau péri-insulaire pour les albatros à sourcils noirs. Au contraire, d'autres espèces prospectent des surfaces considérables ; ainsi, les grands albatros des îles Crozet exploitent un secteur océanique de près de dix millions de kilomètres carrés, des eaux antarctiques au Sud jusqu'aux eaux subtropicales au Nord.

La mobilité de ces prédateurs est telle que des espèces peuvent cohabiter sur un même site, mais exploiter des environnements marins très éloignés. Chaque prédateur est ainsi caractéristique d'un environnement océanographique particulier, où il se nourrit.

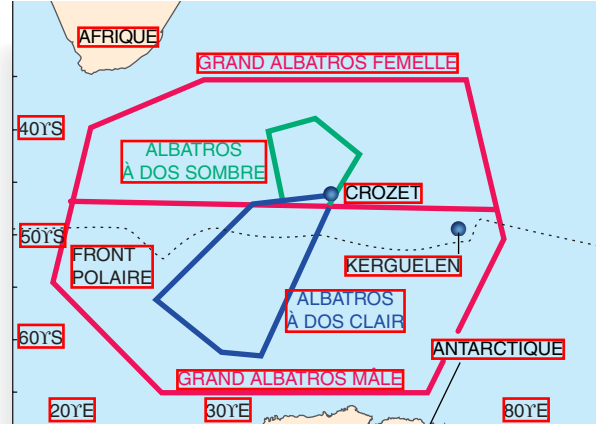
Les populations d'oiseaux et de mammifères marins des îles australes sont suivies à travers un réseau de sites antarctiques et subantarctiques par

plusieurs pays, notamment par la Grande-Bretagne, l'Afrique du Sud, les États-Unis et l'Australie. C'est toutefois dans les Terres australes et antarctiques françaises, grâce à l'Institut polaire, que sont réalisés les suivis les plus longs (près de 50 ans pour certaines espèces).

La démographie des oiseaux marins

À Crozet, à Kerguelen, à Amsterdam et en Terre Adélie, une vingtaine d'espèces d'oiseaux et de mammifères marins sont ainsi dénombrées régulièrement. L'évolution des populations au cours des 40 dernières années indique que certaines espèces, comme les manchots royaux, les manchots Adélie et les otaries à fourrure ont augmenté notablement, alors que les populations d'autres espèces, telles que les albatros, les éléphants de mer, les manchots empereurs et les gorfous sauteurs, ont diminué. Simultanément, on estime les paramètres démographiques en marquant, après les avoir capturés, les animaux adultes et les jeunes de ces colonies ; ces animaux sont identifiés à l'aide de marques individuelles (bagues métalliques, transpondeurs....), et leurs performances reproductrices sont régulièrement contrôlées.

On estime les paramètres démographiques des populations, tels la survie adulte, la survie des jeunes, la dispersion, le recrutement et la fécon-



2. ZONES D'ALIMENTATION de trois espèces d'albatros de Crozet suivies par balise Argos. L'albatros fuligineux à dos sombre (en vert) exploite des zones situées dans les eaux subtropicales. L'albatros fuligineux à dos clair (en bleu) exploite les eaux antarctiques situées au Sud du front polaire. Le grand albatros (en rouge) explore une vaste zone, mais les mâles s'alimentent au Sud de Crozet et les femelles au Nord.

dité, ainsi que leurs variations inter-annuelles. Ces espèces vivent longtemps (certains albatros atteignent l'âge de 70 ans) et sont peu fécondes (en général un jeune par an). Tout changement du taux de croissance d'une population résulte d'une modification de la survie adulte. Ainsi, les populations de manchots empereurs, de grands albatros et d'éléphants de mer ont notablement diminué au cours des années 1970 : nous avons montré que la baisse de la population nicheuse des grands albatros de Crozet était due à une augmentation de la mortalité adulte, surtout de celle des femelles. D'où vient cette différence ? Elle réside dans le fait



que mâles et femelles de cette espèce exploitent des secteurs océanographiques différents. Ainsi les femelles se nourrissant plus au Nord étaient en contact avec les flottilles de palangriers dont les hameçons destinés à la capture des thons subtropicaux tuent des milliers d'oiseaux chaque année.

Cet exemple montre que les fluctuations des effectifs ne sont pas obligatoirement la seule conséquence de la variabilité environnementale. Les activités humaines peuvent influencer directement ou indirectement sur les populations. Ainsi, les populations d'otaries ou de manchots royaux en forte augmentation actuellement ont été exploitées massivement jusqu'au début du XX^e siècle et les effectifs du XIX^e siècle ne sont même pas encore reconstitués aujourd'hui.

On a montré que des anomalies environnementales sévissant avant ou au début de la saison de reproduction perturbent le nombre d'individus qui se reproduisent, tandis que les conditions défavorables pendant la reproduction diminuent la survie des individus l'hiver suivant. Au cours d'une étude réalisée sur une communauté de huit espèces d'albatros et de pétrels des îles Crozet et Kerguelen, nous avons cherché à comprendre comment la variabilité environnementale perturbe la reproduction de ces espèces. Des vagues d'augmentation de la température des eaux de sur-

face, dues au phénomène El-Niño, traversent l'océan Austral tous les quatre à cinq ans. Nous avons montré que, pour les espèces exploitant les eaux antarctiques localisées au Sud du front polaire, l'apparition, dans le Sud des archipels, de températures de surface anormalement chaudes réduit les performances reproductrices.

Variabilité environnementale et changements globaux

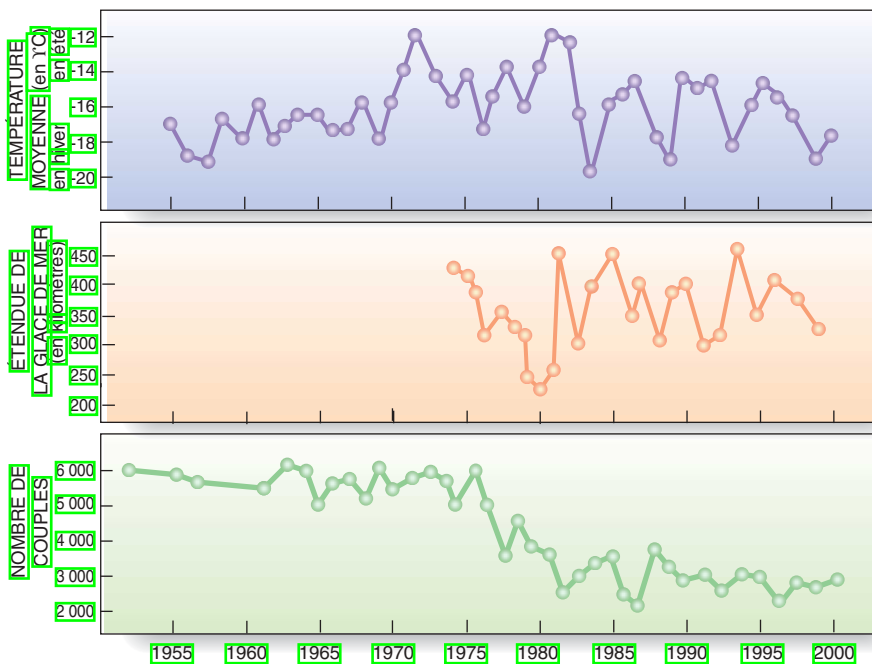
Lorsque ces épisodes chauds apparaissent pendant la période qui précède la ponte, bon nombre d'oiseaux adultes en mauvaise condition physique s'abstiennent de se reproduire ou échouent dans leur tentative de reproduction. Au contraire, les espèces qui pêchent dans les eaux subtropicales localisées au Nord des archipels sont favorisées par ces événements chauds et leur succès reproducteur s'améliore. Ainsi, l'augmentation de la fréquence ou de l'intensité des événements chauds dans l'océan Austral, associée à un réchauffement planétaire global, aurait des effets contrastés sur la communauté des prédateurs supérieurs. Certaines espèces seraient favorisées et pourraient voir leurs effectifs augmenter, alors que d'autres tendraient à disparaître de Crozet et de Kerguelen. Certaines populations coloniseraient des sites plus proches de leurs zones d'alimentation.

L'Antarctique est un laboratoire parfait pour l'étude de l'influence des changements globaux sur les écosystèmes, car l'atmosphère, l'océan et la glace de mer y sont en interaction étroite. En effet, l'écosystème marin dépend de la variabilité à long terme et à court terme de la glace de mer et des conditions océanographiques. Ainsi, la production du krill antarctique est favorisée lorsque la glace de mer est étendue. Or les manchots empereurs se reproduisent sur la glace de mer, en hiver, et se nourrissent de krill et de petits poissons pélagiques.

Pour la population de Terre Adélie, on dispose de données démographiques à long terme, sur près de 50 ans. Après avoir brutalement diminué dans les années 1970, les effectifs des manchots empereurs sont aujourd'hui stables. Nous avons montré que ce déclin était dû à une hausse de la mortalité adulte qui était elle-même liée aux anomalies de plusieurs paramètres océanographiques reliés à l'onde circumpolaire antarctique. La mortalité des manchots empereurs adultes augmente lorsque les températures de surface de la mer sont anormalement élevées et lorsque l'étendue de la glace de mer est réduite.

On ne disposait pas de mesures satellitaires dans les années 1970, mais les relevés de la station météorologique installée à proximité de la colonie de manchots mettent en évidence l'apparition à cette époque d'un épisode anormalement chaud et durable, associé à une faible étendue de la glace de mer. Ces anomalies prolongées ont déclenché une baisse de la survie, qui a elle-même entraîné une chute de la population de manchots empereurs en Terre Adélie de près de 50 pour cent. La population ne s'est pas reconstituée depuis, mais ses effectifs fluctuent avec une périodicité de quatre à cinq ans, c'est-à-dire celle de l'onde antarctique circumpolaire. L'utilisation de modèles démographiques montre que la fluctuation cyclique de la population résulte de la baisse, tous les quatre à cinq ans, de la survie des adultes, lors de l'arrivée d'eaux chaudes et de la rétraction de l'étendue de la glace de mer. Cet exemple est le premier à démontrer que des anomalies climatiques prolongées réduisent directement la survie adulte et, par conséquent, les populations des prédateurs marins.

La mesure des paramètres démographiques des manchots empereurs



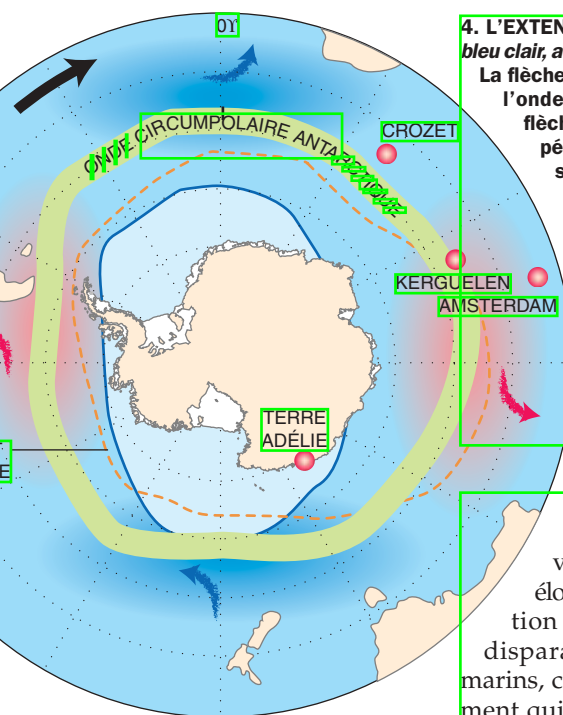
3. EVOLUTION DES PARAMETRES DEMOGRAPHIQUES du manchot empereur de la terre Adélie. Dans les années 1970, au cours d'une période chaude anormalement longue (en haut), la population des manchots a notablement diminué (en bas). Durant cette période, l'étendue de la glace de mer était réduite (au milieu). Aujourd'hui, la population de ce manchot s'est stabilisée.

ainsi que les enregistrements météorologiques antérieurs aux données satellitaires ont permis de préciser que la chute de l'étendue de la glace de mer antarctique avait eu lieu, au moins dans le secteur de la terre Adélie, dans les années 1970 et non pas dans les années 1960 comme on le pensait auparavant. De plus cette diminution de la glace de mer est vraisemblablement liée à un brusque réchauffement général de l'océan Indien dans les années 1970. Ce réchauffement, mesuré par les températures enregistrées dans les stations météorologiques, a été confirmé par la diminution brutale d'un grand nombre de populations d'oiseaux de mer et de pinnipèdes.

Le rôle de la glace de mer

Toutefois, cette diminution de l'étendue de la glace de mer antarctique n'a pas eu que des effets négatifs sur les populations animales : d'une part, la glace ayant fondu, certaines côtes du continent antarctique ont été libérées et les nouveaux sites disponibles ont été colonisés par des oiseaux marins pour la reproduction ; d'autre part, contrairement au manchot empereur, certaines espèces, tel le manchot Adélie, pourraient profiter de la diminution de l'extension de la glace de mer. Les effectifs du manchot Adélie augmentent depuis le début des années 1980, sans doute parce que la surface de la glace de mer disloquée, sa zone d'alimentation de prédilection, a augmenté.

De telles périodes d'extension du manchot Adélie lors d'épisodes de réchauffement avaient été mises en évidence par l'étude d'anciens sites de reproduction. Ainsi, l'analyse des ossements d'oiseaux marins déposés entre le Pléistocène (il y a quelque quatre millions d'années) et aujourd'hui, sur l'île de l'Ascension dans l'océan Atlantique Sud, indique qu'au maximum des glaciations, la température de l'océan était notablement inférieure autour de cette île. La faune aviaire était alors composée soit d'espèces aujourd'hui éteintes, soit d'espèces subantarctiques, tel le puffin fuligineux, qui se reproduisent aujourd'hui à des milliers de kilomètres plus au Sud. Aujourd'hui, seules nichent à Ascension des espèces



4. L'EXTENSION DE LA GLACE DE MER (en bleu clair, au centre) change selon les années. La flèche noire indique le déplacement de l'onde circumpolaire antarctique, les flèches bleues représentent les températures anormalement froides à la surface de la mer et les flèches rouges les températures anormalement chaudes. Les zones d'anomalies chaudes sont associées à une diminution de l'étendue de la glace de mer et les anomalies froides, à une extension. L'onde met huit à neuf ans pour faire le tour de l'Antarctique et les anomalies chaudes et froides alternent tous les quatre à cinq ans.

peu tendance à se disperser. Or la colonisation de nouveaux habitats favorables, mais éloignés, est parfois l'unique solution pour que la population ne disparaisse pas. Chez les oiseaux marins, ce sont les jeunes essentiellement qui se dispersent. Nous avons montré, par exemple, que chez une population dont les effectifs ont été réduits, les jeunes ont davantage tendance à coloniser de nouveaux horizons.

Grâce aux études à long terme d'oiseaux et de mammifères marins, on peut simuler les conséquences d'un changement chronique des conditions environnementales sur les prédateurs supérieurs. Ces informations reflètent des changements des ressources marines exploitées par ces prédateurs. Ce type d'approche interdisciplinaire est novateur dans la mesure où il met en relation des équipes d'océanographes, de biologistes marins et d'écologistes qui confrontent des séries de données environnementales, physiques et biologiques aux séries démographiques provenant des suivis à long terme des populations de prédateurs marins supérieurs.

tropicales comme les frégates. De surcroît, il y a 6 000 ans, l'Antarctique a connu une période nommée «penguin optimum». Puis, lors d'une période de refroidissement climatique qui eut lieu il y a entre 2 000 et 3 000 ans, la population de manchots a diminué.

Ces exemples montrent que les communautés de prédateurs évoluent en fonction des modifications à court et à long terme du climat et de l'environnement marin. Outre les variations cycliques liées à des phénomènes tels que l'onde circumpolaire antarctique, les effectifs des populations présentent des tendances à long terme : augmentation, stabilité ou diminution (et éventuellement extinction) de certaines populations ou espèces. L'analyse de l'évolution des paramètres physiques de l'océan Austral et des paramètres démographiques des communautés de ces prédateurs autorise des prévisions quant à l'abondance future de ces populations face aux changements climatiques.

On observe aussi un changement de l'aire de répartition des différentes espèces. De tels changements ont déjà été constatés pour certaines espèces d'oiseaux en Europe. Toutefois, les changements climatiques actuels semblent plus rapides que les changements climatiques antérieurs, et les capacités des espèces d'oiseaux et de mammifères marins à coloniser de nouveaux sites sont peut-être limitées : ces espèces, dont les sites de reproduction sont rares, ont

Les auteurs appartiennent au Laboratoire d'écologie du CNRS, à Chizé.

C. Barbraud et H. Weimerskirch, *Emperor penguins and climate change*, in *Nature*, vol. 411, pp. 183-186, 2001.

H. Weimerskirch et R.P. Wilson, *Oceanic respite for wandering albatrosses*, in *Nature*, vol. 406, pp. 955-956, 2000.

C. GUINET et al., *Spatial distribution of the foraging activity of Antarctic fur seal (Arctocephalus gazella) females in relation to oceanographic factors : a scale-dependant approach using geographic information systems*, in *Marine Ecology Progress Series*, sous presse.

Les manchots, auxiliaires des océanographes

J. B. CHARRASSIN • Y. LE MAHO • G. DUHAMEL • Y. H. PARK • C. A. BOST

En équipant les prédateurs marins, tels les manchots, de capteurs de plus en plus miniaturisés et précis, on suit l'évolution de certaines ressources océaniques et celle des températures, qui reflètent la variabilité du climat.

Les marins observent les oiseaux en mer pour deviner la localisation et l'abondance des bancs de poissons qu'ils recherchent. Aujourd'hui, on étudie le comportement des prédateurs de l'océan Austral pour évaluer les conséquences de la variabilité climatique sur les richesses naturelles de cet océan.

L'océan Austral, le plus vaste des océans du globe, est l'un des derniers grands écosystèmes encore relativement peu perturbés par l'homme. Il abrite des biomasses animales très importantes malgré un développement récent des pêcheries et une surexploitation passée de certaines ressources, telles les baleines et les otaries à fourrure. Les petits crustacés, les tuniciers (des animaux marins primitifs), les calmars et les poissons du grand large consti-

tuent l'essentiel des stocks. La production annuelle de krill, petit crustacé, oscillerait entre 300 et 700 millions de tonnes. Une autre grande partie de ces ressources est constituée des «poissons lanternes», dont la biomasse est estimée à 200 millions de tonnes.

Ces ressources se répartissent en bandes concentriques autour du continent Antarctique, les masses d'eau circulant d'Ouest en Est. Cette répartition tient aussi aux propriétés physico-chimiques des eaux australes : elles subissent des variations interannuelles notables liées à des phénomènes climatiques. L'onde circumpolaire antarctique est l'une des manifestations de cette variabilité. Cette anomalie cyclique, probablement consécutive aux épisodes El Niño, fait le tour de l'Antarctique en huit ans, en entraînant dans son cortège

des fluctuations des températures de surface et de l'étendue des glaces. Ces phénomènes ont un impact notable sur les écosystèmes de l'océan Austral. Cependant, on ignore les conséquences du réchauffement à moyen terme sur les ressources de cet océan et, pour étudier cet impact, il nous faut suivre à long terme divers paramètres hydrographiques, notamment la température des eaux, et estimer la disponibilité des ressources marines. Les mesures physiques peuvent être menées en routine depuis des stations fixes ou par des satellites, mais comment pouvons-nous suivre les ressources? Cette question est ardue en raison de la répartition hétérogène de ces ressources, de l'immensité de l'océan, du coût des campagnes en mer et des difficultés logistiques liées à la rigueur du climat.



1. DES MANCHOTS ROYAUX sont capturés (à gauche) pour servir de bio-indicateurs des ressources de l'océan Austral. On place dans leur estomac une sonde de température (au centre), qui reflète l'activité de recherche alimentaire. On les équipe aussi de systèmes d'acquisition de données (par exemple la profondeur de la plongée ou la vitesse de nage) ou d'une balise de repérage. Sur la page de droite, le mont Ross, vu de la mer. La forme lenticulaire des nuages est caractéristique de ces îles qui entravent peu la circulation atmosphérique.

Or, les prédateurs marins, oiseaux et pinnipèdes notamment, dépendent totalement des ressources de l'océan, même s'ils reviennent à terre pour se reproduire. Ils se déplacent sur de grandes distances, ils ont un large spectre alimentaire. Au sommet des réseaux alimentaires, ils intègrent les modifications potentielles des composantes physiques et biologiques de l'environnement marin : ils sont de plus en plus considérés comme de précieux bio-indicateurs des ressources de l'océan Austral.

De par l'importance de leurs populations, ils jouent par ailleurs un rôle considérable dans les réseaux trophiques de l'océan Austral. Ainsi, l'ensemble des colonies d'oiseaux totalise quelque 190 millions d'individus reproducteurs, soit une biomasse aviaire dépassant 300 000 tonnes. Près des deux tiers de cette biomasse sont répartis le long des côtes et des îles antarctiques. On estime que les oiseaux marins de l'océan Austral consomment chaque année 56 millions de tonnes de ressources, soit 34 millions de tonnes de crustacés, 14 millions de tonnes de céphalopodes (des mollusques) et 8 millions de tonnes de poissons. Quant aux mammifères marins, on évalue à plus de 15 millions le nombre des pinnipèdes (otaries et phoques) et on estime leur consumma-

tion annuelle à plus de 70 millions de tonnes d'organismes vivants.

Ainsi oiseaux et mammifères marins consomment bien davantage que les 85 millions de tonnes capturées chaque année par toutes les pêcheries du Globe. Toutefois, les ressources marines exploitées par l'homme se trouvent à des niveaux de la chaîne alimentaire supérieurs à ceux de la plupart des organismes exploités par les oiseaux et par les mammifères de cette région du monde.

Le choix des manchots

Les manchots semblent d'excellents bio-indicateurs des ressources de l'océan Austral. Les quatre espèces qui se reproduisent dans la zone antarctique – le manchot à jugulaire, le manchot Adélie, le manchot papou et le manchot empereur – constituent 66 pour cent des effectifs et 98 pour cent de la biomasse aviaire. En zone subantarctique, les manchots (gorfous macaroni, sauteurs, royaux et papous) ne l'emportent plus en nombre sur les autres oiseaux marins, mais ils constituent encore 80 pour cent de la biomasse d'oiseaux. Ainsi, l'ensemble des populations de manchots consomme chaque année environ 18 millions de tonnes de proies. Un seul couple de manchots Adélie doit four-

nir à chacun de ses deux poussins près de 40 kilogrammes de nourriture. De surcroît, les manchots sont plus faciles à capturer que les autres prédateurs marins. Enfin, ils sont remarquablement adaptés au vol sous-marin et à la plongée, en dépit de leur inaptitude au vol aérien. Ainsi le manchot empereur est capable d'atteindre des profondeurs dépassant 500 mètres et de rester sous l'eau 20 minutes en apnée.

Il y a une quinzaine d'années, on ignorait encore presque tout de l'alimentation en haute mer de ces prédateurs. Puis, les progrès liés au développement de la micro-électronique et de la micro-informatique nous ont permis de découvrir les détails de leur mode d'exploitation du milieu marin : des capteurs et des enregistreurs mesurent l'activité en plongée, les vitesses et les accélérations, les prises alimentaires, et les balises Argos fournissant la localisation en mer. Avec le soutien financier et logistique de l'Institut français pour la recherche et la technologie polaires, nous avons étudié en détail les interactions du manchot royal et des poissons pélagiques des îles Crozet et Kerguelen, dans le Sud de l'océan Indien.

Ce prédateur se nourrit exclusivement des abondants poissons lanternes (myctophidés), qui ne sont pas encore exploités massivement par l'homme.





C. L. 2003

2. MANCHOTS ADELIE partant en mer. Ces prédateurs se nourrissent de krill et de petits poissons qu'ils capturent entre 40 et 100 mètres de profondeur.

Ce modèle de l'étude des relations entre les prédateurs et leurs proies présente un autre intérêt : les poissons lanterne sont très sensibles aux modifications des caractéristiques thermiques de la couche supérieure de l'océan.

Grâce à l'utilisation de balises Argos, nous avons établi que les déplacements en mer des manchots indiquent la localisation des zones où se concentrent les poissons lanternes. Ainsi durant l'été, les manchots royaux des îles Crozet se dirigent surtout vers les eaux du front polaire, frontière qui sépare les principales masses d'eau de l'océan Austral, à quelque 400 kilomètres au Sud de Crozet. Les eaux antarctiques froides y plongent sous les eaux subantarctiques plus chaudes. Les manchots royaux s'alimentent préférentiellement sur le front polaire, où abondent les poissons lanternes. Accessoirement, ils vont se nourrir vers une autre zone frontale, le front subantarctique, située à 350 kilomètres au Nord-Est de Crozet, lieu de la rencontre des eaux subantarctiques fraîches et des eaux chaudes subtropicales.

Partant en mer pour un voyage durant habituellement de 7 à 20 jours, ils suivent dès leur départ un cap assez constant. Après une phase de nage à vitesse soutenue (entre 5 et 12 kilomètres par heure) dans les premiers kilomètres, ils enchaînent des plongées profondes durant quatre à huit minutes, alternant avec de brèves respirations en surface. De jour, leur activité de plongée et de nage est quasi ininterrompue, à des profondeurs le plus souvent comprises entre 100 et 250 mètres. La stratégie de ces prédateurs consiste à ajuster en permanence leur angle de descente

en plongée afin de prospecter au mieux les grandes profondeurs, tout en avançant rapidement vers la zone frontale où les eaux froides et les eaux chaudes se rencontrent et où les proies abondent. Ils passent ainsi plus de la moitié du temps sous l'eau, en plongées de déplacements ou de prospection alimentaire.

La recherche active des proies, reflétée par le nombre des plongées, la proportion du temps passé à plonger et la distance parcourue verticalement par les oiseaux, augmente dans la zone du front polaire, où les manchots séjournent environ deux jours. Le retour vers la colonie a lieu en trajectoire directe, en deux jours de nage continue, aussi bien de jour que de nuit.

L'étude d'un autre prédateur plongeur, l'otarie à fourrure subantarctique, menée par l'équipe de Christophe Guinet, du Centre CNRS d'études biologiques de Chizé, a montré une stratégie similaire. Ces otaries (qui sont des mammifères) semblent aussi bénéficier d'une connaissance précise des zones d'alimentation les plus profitables : elles se dirigent directement vers leur zone de pêche. À Kerguelen, les otaries ne commencent leurs plongées qu'après avoir franchi la bordure du plateau de l'archipel dans les eaux à l'Est du front polaire, où la productivité marine est la plus forte.

En Antarctique, les manchots empeureurs explorent activement les pentes du plateau sous-marin, dans les aires dégagées des glaces. Dans ces zones où la répartition des ressources est également prévisible, ils explorent méthodiquement les fonds en plongeant entre 150 et 300 mètres de profondeur.

Les séries de chalutages réalisés dans la zone frontale polaire à l'Est de Kerguelen par le navire *La Curieuse* ont confirmé le potentiel bio-indicateur des manchots et des otaries. L'analyse des bols alimentaires rapportés par les manchots à leur poussin (essentiellement des poissons lanternes) a fourni des informations biologiques similaires à celles issues des pêches scientifiques menées par le navire dans la zone de pêche de ces prédateurs, dont les déplacements étaient suivis par satellite. Prédateur opportuniste, le manchot ne sélectionne pas ses proies en fonction de leur taille, mais capture les individus les plus abondants. Nous avons évalué les classes de tailles et d'âges des poissons les plus nombreux dans la zone pélagique étudiée en analysant le bol alimentaire des manchots. Nous avons mesuré le diamètre des otolithes retrouvées dans ce bol alimentaire (les otolithes sont de petites concrétions calcaires de l'oreille interne des poissons, qui résistent à la digestion). La taille des otolithes dépend de l'âge et de la taille des poissons, de sorte que nous déterminé les classes d'âges les plus représentées dans la zone pélagique de Kerguelen.

La capture des proies en mer

Le bol alimentaire rapporté reflète surtout le dernier repas de l'oiseau avant son retour à la colonie, mais ce repas intervient au grand large, et l'oiseau ne s'alimente quasiment pas au cours de son retour à la colonie : c'est bien le reflet de la constitution de la zone de pêche.

Pour pouvoir utiliser les prédateurs en mer comme des bio-indicateurs des ressources océaniques, on doit connaître non seulement les déplacements des prédateurs pour savoir à quel endroit et à quelle profondeur ils s'alimentent, mais aussi déterminer la fréquence de capture de ses proies. On a d'abord tenté d'utiliser une sonde de température placée avec précaution dans l'estomac de grande taille (jusqu'à trois litres) des oiseaux : on estime que la température stomacale diminue lors de l'ingestion des proies capturées dans les eaux froides. Toutefois, la précision de cette méthode dépend du remplissage de l'estomac, de la taille des proies et de la température abdominale, qui baisse au cours des plongées à grande profondeur. Avec la

participation d'André Ancel et d'Yves Handrich du Centre d'écologie et de physiologie énergétiques (CNRS), à Strasbourg, et en collaboration avec l'Institut de recherche polaire de Tokyo, nous avons mis au point une méthode plus précise, fondée sur la mesure directe de la température dans l'œsophage des manchots, au moyen de micro-sondes. En équipant un manchot d'une sonde de ce type et d'un enregistreur de plongée, on peut mesurer à quel moment et pour quel palier de la plongée l'oiseau capture ses proies, avec une précision de l'ordre de 20 mètres. Les premières estimations ont permis de calculer qu'un manchot royal de 11 kilogrammes capture entre 600 et 1 600 grammes de poisson par jour en mer. L'essentiel des prises intervient en plongée profonde et dans la phase de remontée.

Grâce aux capteurs dont sont équipés les manchots et qui fournissent la localisation en mer, et aux sondes internes qui mesurent les prises alimentaires avec un minimum d'impact sur leur comportement, les biologistes disposent de nouveaux outils pour évaluer la disponibilité de certaines ressources. Ainsi, on peut calculer le succès et l'effort de pêche du prédateur, pour chaque secteur océanique prospecté, en connaissant le nombre de kilomètres parcourus et les paliers de profondeur atteints. Les profondeurs où le succès de pêche est le meilleur indiquent les zones de concen-

tration des proies, et le suivi annuel de ces prédateurs participe à l'évaluation de certaines ressources, difficile à réaliser dans ces contrées inhospitalières.

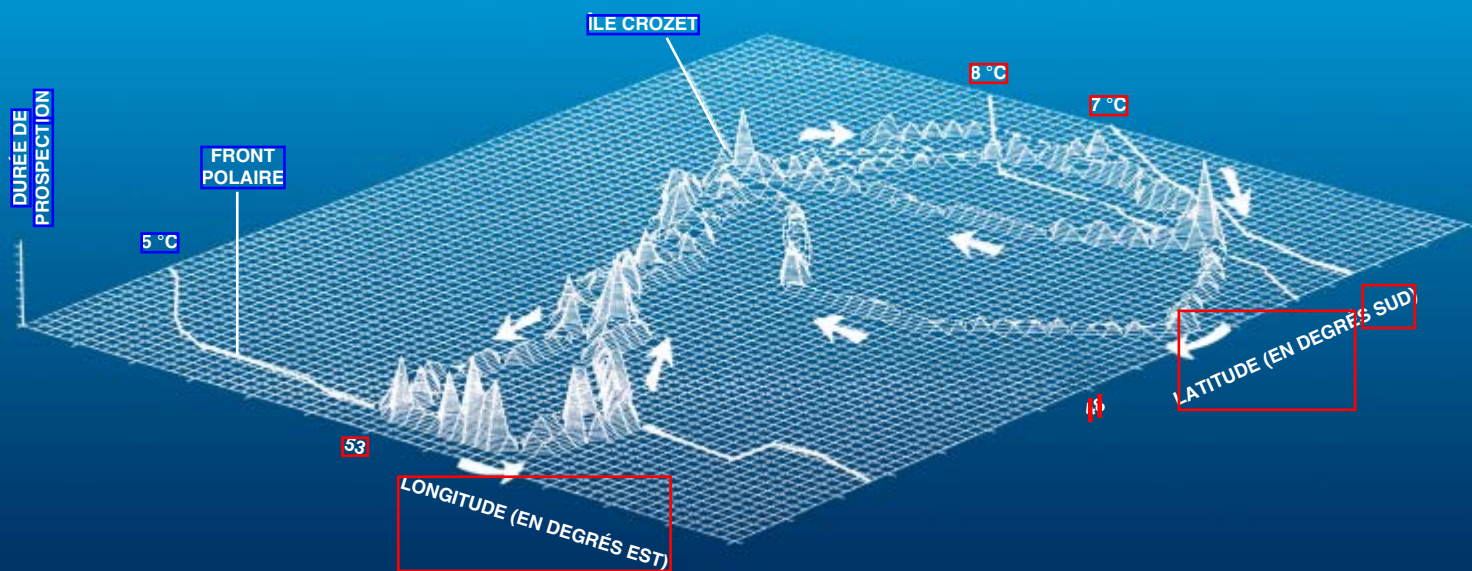
L'utilisation de bio-indicateurs – qui complète les études océanographiques classiques – présente certaines limitations, telles que la nécessité de recapter l'animal équipé, l'existence de variations interindividuelles dans les techniques de pêche, le degré de spécialisation des prédateurs vis-à-vis de certaines ressources et la mise au point d'outils informatiques puissants pour traiter toutes les données recueillies. Toutefois, les méthodes classiques ont elles-mêmes leurs limites : l'effarouchement des bancs de poissons par l'arrivée du chalut, la difficulté de détecter certaines espèces à l'écho-sondeur, le coût des campagnes océanographiques.

Ces études, qui n'ont pas pour objet de fournir aux pêcheries des informations sur la localisation des bancs de poissons, peuvent révéler une surexploitation locale de certaines populations avant que l'équilibre biologique ne soit rompu et que la dynamique des populations de prédateurs ne soit perturbée. Ainsi, Donald Croll, de l'Université de Santa Cruz, a montré que l'exploitation du krill par les pêcheries de la péninsule antarctique (bien qu'elle soit encore limitée) menace déjà les ressources alimentaires des populations de manchots durant la reproduction.

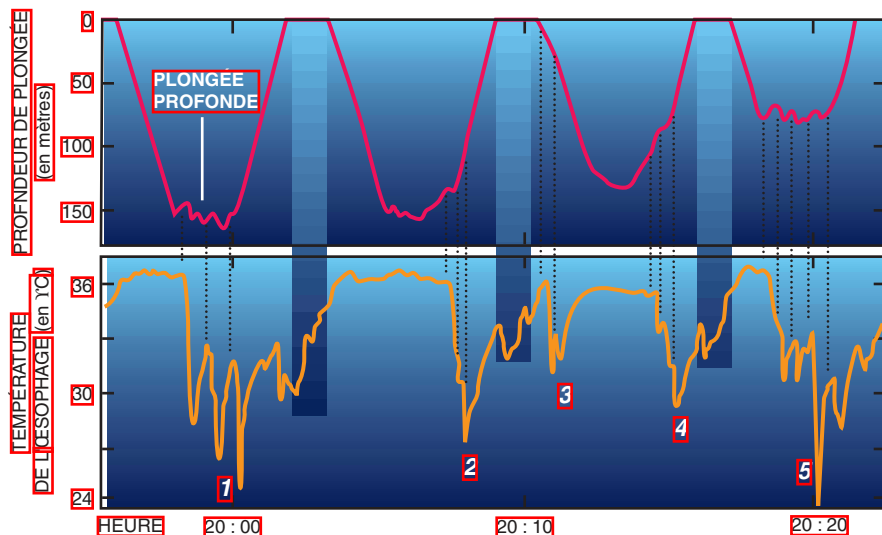
Le suivi des prédateurs en mer

Outre l'impact des pêcheries, on peut aussi évaluer, grâce au suivi des prédateurs marins, celui de la variabilité climatique sur les ressources de l'océan Austral. Ainsi, nous avons montré que la structure thermique de la couche océanique supérieure impose la répartition verticale des bancs de poissons recherchés par les manchots. Cette étude a été menée en comparant les plongées des manchots royaux et la température océanique enregistrée simultanément au cours de leurs plongées. Quelle que soit la saison, les manchots plongent sous la thermocline saisonnière, c'est-à-dire la limite entre la couche océanique profonde et la couche mélangée de surface, car les poissons s'y concentrent. La thermocline est plus épaisse en hiver qu'en été, en raison des vents violents qui brassent la couche océanique de surface et de l'homogénéisation de la colonne d'eau liée au refroidissement hivernal. Cette modification des caractéristiques physiques se traduit par des plongées hivernales plus profondes (jusqu'à 440 mètres contre 350 mètres en été).

Si les manchots suivent fidèlement les migrations saisonnières en profondeur de leurs proies, leurs déplacements en mer reflètent aussi les fluctuations physiques interannuelles. Lorsque la position géographique du



3. TRAJECTS EN MER (ci-dessus) de trois manchots royaux des îles Crozet suivis par des balises Argos, au cours de leur recherche de nourriture. Les pics correspondent aux zones où les ressources sont les plus abondantes.



4. LA PROFONDEUR DES PLONGÉES (en haut) et les captures (en bas) ont été enregistrées chez un manchot royal équipé d'un enregistreur de la pression hydrostatique et d'une micro-sonde mesurant la température interne. Cinq séries de prises alimentaires (de 1 à 5) ont été enregistrées : elles correspondent à une baisse de la température œsophagienne. On constate que les prises alimentaires ont généralement lieu à la profondeur maximale de la plongée (1,2 et 5).

front polaire varie dans la partie indienne de l'océan Austral, la répartition en mer des manchots royaux change : ainsi, en 1996, ils ont dû augmenter leur trajet pour atteindre les zones poissonneuses (de plus de 55 pour cent) et leur effort de plongée a augmenté en raison de l'éloignement du front. Les séjours en mer étaient plus longs, de sorte que l'approvisionnement des poussins a diminué : le succès reproducteur a diminué.

Afin de mieux évaluer l'impact de la variabilité climatique sur les chaînes alimentaires de l'océan Austral, les écophysiologistes du Centre d'écologie et de physiologie énergétiques de Strasbourg et les océanographes du Laboratoire d'océanographie physique du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, ont entrepris d'installer un observatoire de la disponibilité à moyen terme des ressources pélagiques dans la zone atelier de Kerguelen-Crozet. Lors de cette étude, on suivra par télémétrie le succès de pêche des manchots royaux équipés, les performances démographiques et les variations interannuelles du calendrier de reproduction dans diverses colonies. On suivra également la variabilité climatique dans la même zone atelier grâce à des stations hydrologiques permanentes, et à l'altimétrie satellitaire (TOPEX-POSEIDON et bientôt JASON). Le suivi du cycle reproducteur du manchot royal est effectué par Michel Gauthier-Clerc, grâce au système ANTAVIA mis au point par Jean-Paul Gendner, à Strasbourg. Par ce dispositif, chaque individu d'une colonie est

automatiquement reconnu : la détection est assurée grâce à des antennes enterrées sur le lieu où passent les oiseaux, ce qui permet de les identifier grâce à des transpondeurs implantés sous leur peau ; un transpondeur est une étiquette électronique sans batterie qui pèse moins d'un gramme et qui permet l'identification automatique d'un animal sans qu'il soit nécessaire de le capturer plusieurs fois. À terme, on pourra modéliser les conséquences du réchauffement climatique sur les principaux réseaux de l'écosystème austral.

Nous pensons aussi utiliser les manchots et autres prédateurs plongeurs comme des plates-formes océanographiques mobiles, et obtenir à leur insu des données physiques inédites sur le milieu océanique. Ainsi, avec Malik Koudil, du Centre océanologique de Marseille, nous avons reconstitué la courbe

des températures dans la zone du front polaire à partir des profils de températures obtenus en profondeur par les manchots royaux de Kerguelen équipés d'un dispositif qui enregistrait en continu la pression hydrostatique et la température environnante, et d'une balise Argos, qui donnait la position géographique de ces animaux. George Boehlert et ses collègues de l'administration américaine des océans et de l'atmosphère (NOAA) ont équipé 16 éléphants de mer de capteurs de profondeur et de température couplés à un émetteur Argos, au cours d'une étude menée sur trois ans dans le Nord-Est du Pacifique. Au cours de leurs migrations, ces phoques de grande taille (pesant jusqu'à une tonne et demi) s'éloignent jusqu'aux îles Aléoutiennes, en parcourant près de 100 kilomètres par jour. Plongeant parfois jusqu'à plus de 800 mètres, ils ne reviennent respirer à la surface que brièvement, environ toutes les 20 minutes. Au cours d'une période de trois mois, plus de 22 000 données de températures de l'eau ont été obtenues dans une zone océanique où seulement 52 mesures ont été réalisées par des méthodes classiques au cours de la même période. En utilisant les données récupérées au cours des migrations de neuf éléphants de mer seulement, sur trois ans, 76 000 profils de températures ont été obtenus.

L'utilisation des grands prédateurs marins, tels les éléphants de mer, comme auxiliaires océanographiques est intéressante, car, en raison de leur taille, on peut les équiper d'appareils très précis, mais encombrants. D'autres applications sont en cours, dans d'autres écosystèmes, avec des espèces telles que les baleines, les thons, et les requins, équipés de capteurs de plus en plus miniaturisés et précis.

J.-B. CHARRASSIN, Y. LE MAHO et C.-A. BOST mènent leurs recherches au Centre d'écologie et de physiologie énergétiques du CNRS, à Strasbourg. Au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, G. DUHAMEL est professeur dans le Laboratoire d'ichtyologie et Y. PARK maître de conférences dans le Laboratoire d'océanographie physique.

C. GUINET et al., *Foraging behaviour of satellite-tracked king penguins in relation to sea-surface temperatures obtained by satellite telemetry at Crozet archipelago, a study during three austral summers*, in *Marine Ecology Progress Series*, vol. 150, pp. 11-20, 1997.

C.-A. BOST et al., *Foraging habitat and food intake of satellite tracked king penguins during the austral summer at Crozet archipelago*, in *Marine Ecology Progress Series*, vol. 150, pp. 21-33, 1997.

M. KOUDIL et al., *Seabirds as Monitors of Upper-Ocean Thermal Structure. King Penguins at the Antarctic Polar Front, East of Kerguelen Sector*, in *Comptes Rendus de L'Académie des Sciences, Sciences de la Vie*, vol. 323, pp. 377-384, 2000.

J.-B. CHARRASSIN et al., *Feeding behaviour of free-ranging penguins determined by oesophageal temperature*, in *Proceeding Royal Society of London B*, vol. 268, pp. 151-157, 2001.

Le chat dans l'écosystème subantarctique

Les écosystèmes insulaires ont, plus que les écosystèmes continentaux, souffert des introductions d'espèces animales : depuis le début du XVII^e siècle, 93 pour cent des 176 espèces d'oiseaux éteintes vivaient sur des îles océaniques. De toutes les espèces de prédateurs introduites, le chat est souvent considéré comme l'espèce la plus nuisible pour les espèces natives. Pour évaluer précisément l'impact du chat sur la faune aviaire des îles, nous avons étudié le fonctionnement des populations de chats et leurs interactions avec l'ensemble des proies, natives (oiseaux) et introduites (lapins et rongeurs).

Le chat présent sur tous les continents, l'est aussi sur au moins 118 des 131 principaux groupes d'îles. Dans les milieux insulaires subantarctiques, le chat se nourrit exclusivement du produit de sa chasse. La disponibilité et la répartition spatiale des proies modifient la densité des chats, la structuration sociale, le système d'appariement, le succès de reproduction et la démographie. Ainsi, contrairement aux chats errants des villes qui vivent en grands groupes sociaux dans de petits domaines qui se chevauchent, les chats des îles subantarctiques vivent solitaires dans de vastes domaines séparés.

Plusieurs introductions ont eu lieu au XIX^e et au début du XX^e siècle, mais quatre chats seulement seraient à l'origine de la population actuelle de la grande île de l'archipel des Kerguelen. Deux chats furent débarqués en 1951 pour lutter contre les rongeurs et les lapins qui proliféraient. Ils disparurent rapidement de la station de Port-aux-Français et, sans savoir si l'espèce s'était éteinte, deux autres chats ont été introduits en 1956. Ces chats se sont parfaitement adaptés aux nouvelles conditions, et leurs descendants, d'abord cantonnés aux abords de Port-aux-Français, ont colonisé l'île en longeant les côtes. En 1974, le cinquième de l'île était envahi par les chats. L'effectif était estimé à 2 500 chats en 1974 et à 3 500 chats en 1977. La phase de croissance exponentielle est terminée. Aujourd'hui, nous estimons que la densité des chats sur les îles subantarctiques varie entre un et trois chats par kilomètre carré (cette densité atteint 1 000 chats par kilomètre carré dans certains jardins publics ou cimetières).

Le succès de la colonisation de Kerguelen tient à l'abondance des proies, à la possibilité d'utiliser des terriers qui protègent les chatons contre les variations des conditions climatiques et contre d'éventuels prédateurs aériens (les skuas), à l'absence d'autres prédateurs terrestres et à la quasi-absence de parasites du chat.

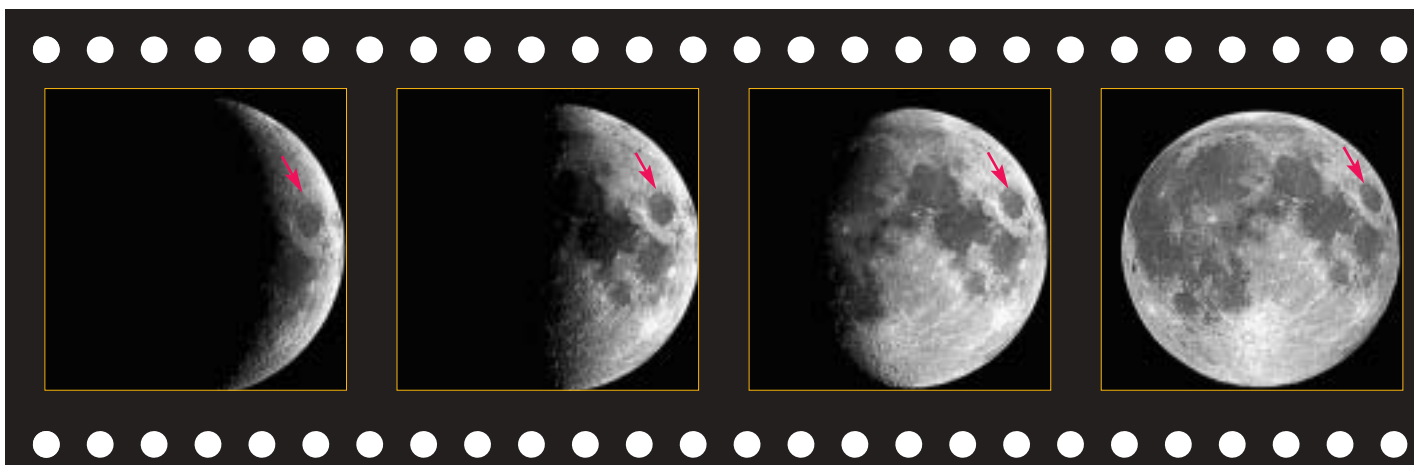
Le chat est un prédateur opportuniste et son régime alimentaire reflète la disponibilité des proies. Bien que le lapin constitue la principale ressource alimentaire du chat, on estime qu'en 1976, les quelque 3 500 chats présents sur l'île ont prélevé plus d'un million d'oiseaux. Huit espèces d'oiseaux surtout sont concernées par la prédation du chat : le pétrel bleu (*Halobaena caerulea*), le pétrel à tête blanche (*Pterodroma lessonae*), le pétrel noir (*Pterodroma macroptera*), le pétrel de Kerguelen (*Pterodroma brevirostris*), le pétrel à menton blanc (*Procellaria aequinoctialis*), le pétrel plongeur commun (*Pelecanoides urinator*), le pétrel de Wilson (*Oceanites oceanicus*) et le prion de la désolation (*Pachyptila desolata*). Toutes ces espèces ont évolué en l'absence de prédateurs mammaliens et n'ont développé aucun mécanisme de défense ou de fuite ; les espèces les plus menacées sont celles qui nichent dans des terriers comme le pétrel bleu et le prion de la désolation. Même si aucune extinction d'espèce d'oiseaux n'a été observée – les petites îles sont dépourvues de chats et servent de refuge aux oiseaux – la prédation du chat a certainement un impact notable sur les populations d'oiseaux, à Kerguelen. Les programmes de conservation sont de plus en plus ciblés sur le contrôle des effectifs de chats sur les îles.

Ni la chasse ni le piégeage ni l'utilisation d'appâts empoisonnés n'ont donné de résultats sur l'archipel des Kerguelen, parce qu'il est trop vaste et que le terrain est difficile d'accès. L'introduction d'un virus pathogène a été également envisagée. L'absence de pathogènes rend les chats des Kerguelen particulièrement vulnérables à l'introduction d'agents infectieux contre lesquels ils n'ont aucune défense immunitaire. Une telle introduction a été réalisée sur l'île Marion, où l'introduction du chat est en partie responsable de l'extinction locale du pétrel plongeur. Le virus choisi a été introduit en 1977 et a permis de réduire de 82 pour cent l'effectif de la population au bout de six ans. Nous avons confirmé à partir d'un modèle mathématique que le virus de la panleucopénie stabilise l'effectif de chats de l'île Marion autour de 300 au bout de dix ans. L'éradication du chat sur l'île Marion n'a été obtenue qu'en 1991, soit 15 ans après l'introduction du virus, en associant durant cinq ans, tir, empoisonnement et piégeage des chats survivants. Le succès reproducteur du pétrel noir, qui variait entre 0 à 20,5 pour cent durant la période où le chat était présent sur l'île, est remonté à 59,6 pour cent après son éradication. Cependant, l'introduction d'une infection virale ou bactérienne dans une population indemne peut être lourde de conséquences et une telle opération ne peut avoir lieu que si la spécificité de l'agent pathogène ne fait aucun doute. De plus, le succès obtenu à Marion ne garantit pas le même succès à Kerguelen.

Le chat a incontestablement des effets négatifs... mais il en a aussi de positifs. Sur les îles Kerguelen ou sur l'île Amsterdam, rongeurs et lapins abondent et ont des effets néfastes sur les populations d'oiseaux endémiques soit directement par la prédation (c'est le cas des rongeurs) ou indirectement par la destruction de l'habitat (les lapins). Les tentatives de réduction de la population de chats sur l'île Amsterdam y auraient favorisé l'augmentation du nombre de surmulots *Rattus norvegicus* et de souris *Mus musculus* : sur cette île, les chats se nourrissent essentiellement de souris et de surmulots. La modélisation des interactions des oiseaux insulaires et des mammifères introduits (rat et chat) a montré que l'explosion démographique de la population de prédateurs intermédiaires (les rats) consécutive à l'élimination brutale du chat aboutirait à une extinction rapide des proies communes aux deux prédateurs, les oiseaux. Une population limitée de chats maintient les populations de rongeurs et de lapins à des niveaux suffisamment bas pour que leur impact soit réduit.

La protection des espèces menacées passe par un contrôle des effectifs de chats. L'éradication des chats à Kerguelen, difficilement envisageable, n'est pas souhaitable si elle n'est pas accompagnée de l'élimination des lapins qui constituent la principale source de nourriture des chats, surtout l'hiver, lorsque la plupart des oiseaux sont en mer. De surcroît, en fonction de la démographie des proies, les effets de la prédation peuvent être plus ou moins dramatiques selon que les prédateurs tuent les jeunes (œufs, poussins, juvéniles) ou les adultes, ou encore selon que le prélèvement est occasionnel ou systématique. On a montré que les effectifs des populations d'oiseaux à courte durée de vie sont très sensibles à la prédation des jeunes, tandis que, pour les espèces d'oiseaux qui vivent longtemps, les effectifs des populations diminuent quand les prédateurs s'attaquent aux adultes. Aujourd'hui, nous suivons la population de chats des îles Kerguelen afin de préciser ses comportements de prédation et afin de déterminer les espèces les plus exposées, qui devront être protégées en priorité.

Dominique PONTIER, Emmanuelle FROMONT, Ludovic SAY
UMR-CNRS 5558, Université Claude Bernard-Lyon 1



Les danses spatiales de la Lune

ERIC BOIS

La Lune est soumise à des balancements réguliers autour d'une configuration d'équilibre stable. On connaît aujourd'hui avec précision les origines de ces balancements, nommés «librations».

Fidèle depuis quelques milliards d'années, la Lune tourne autour de la Terre. Son mouvement ne se limite pas à cette simple révolution : elle tourne aussi sur elle-même et nous montre ainsi toujours la même face. Outre l'attraction de la Terre, elle subit d'importantes perturbations de la part du Soleil et des autres planètes du Système solaire, ce qui engendre de nombreuses complications. Le mouvement de la Lune est si complexe que Newton lui-même disait qu'il lui donnait mal à la tête ! Toutefois, aujourd'hui, les mouvements les plus fins de la rotation de la Lune sont connus avec une si grande précision, que la Lune pourrait servir de «détecteur» des moindres interactions entre la Terre et la Lune, et même au sein du Système solaire.

Les premières mesures de la distance entre la Terre et la Lune apparaissent au III^e siècle avant notre ère.

L'astronome grec Aristarque de Samos estime la distance entre la Terre et la Lune à 121 000 kilomètres (au lieu de 384 400 kilomètres en moyenne). Environ 200 ans plus tard, l'astronome et mathématicien grec Hipparque réduit l'erreur à dix pour cent, puis Ptolémée la réduit à un pour cent, au II^e siècle de notre ère. Au XVIII^e siècle, les astronomes français Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande et Nicolas Louis de La Caille obtiennent une distance moyenne à 0,2 pour cent près, en observant la Lune simultanément sur un même méridien terrestre (Lalande se tenait à Berlin et La Caille au Cap).

Dans les années 1950, l'exactitude fait un bond grâce aux premiers échos radar sur la Lune : l'erreur est de l'ordre du kilomètre. En 1969, Neil Armstrong marche sur la Lune et, lors de ce vol *Apollo XI*, le premier panneau réflecteur est déposé : l'ère de la télémétrie laser commence pour

la Lune. Trois stations terrestres mesurent la distance de la Terre à la Lune par cette technique : au Texas, à Grasse, en France, et à Hawaïi. Le principe est simple : un laser de forte puissance émet une séquence d'impulsions en direction d'un réflecteur déposé à la surface de la Lune. Le faisceau laser est émis par un télescope qui, en retour, recueille la lumière réfléchie par le réflecteur lunaire. Une horloge atomique mesure le temps mis par les photons pour effectuer l'aller-retour (environ 2,5 secondes). Connaissant la vitesse de la lumière, on déduit la distance entre la Terre et la Lune au moment du tir laser. Ainsi, dans les années 1990, l'incertitude sur la mesure passe à quelques centimètres.

Aujourd'hui, à peine deux centimètres d'incertitude limitent l'exactitude sur la mesure obtenue par la station française, seule sur la Terre à



1. LEVER DE LUNE SUR LA TERRE. Notre satellite a un mouvement très complexe : outre sa révolution et sa rotation, il effectue de légers balancements nommés «librations». Certaines de ces librations sont visibles de la Terre : en suivant l'évolution d'un cratère (par exemple, celui marqué d'une flèche rouge) (*en haut, à gauche*), on voit qu'il se décale et qu'il se rapproche du bord supérieur de la Lune. Les librations sont si importantes qu'elles découvrent des régions normalement hors de notre vue : nous voyons 59 pour cent de la surface totale de la Lune, au lieu de 50 pour cent si les librations n'existaient pas.

poursuivre les records de précision. Cette incertitude est surtout due aux perturbations atmosphériques subies par le faisceau laser. Des réflecteurs ont été déposés sur le sol lunaire à des endroits différents en longitude et en latitude, de sorte que l'on mesure également la rotation de la Lune sur elle-même avec une précision angulaire voisine d'une milliseconde. La télémétrie laser-Lune a stimulé des progrès importants dans les théories sur les mouvements de la Lune.

La Lune, en tournant sur elle-même, effectue de nombreux balancements, des «librations» provoquées par des mécanismes physiques, gravitationnels ou non, internes ou externes à la Lune. La plupart des librations sont imperceptibles, mais d'autres sont visibles à l'œil nu. Quand on suit la position d'un cratère visible de la Lune, il se trouve plus ou moins près du bord de la Lune, signe que celle-ci «libre» (voir la figure 1). D'où viennent les librations? Elles ont des origines variées, et il aura fallu trois siècles pour qu'elles soient identifiées, comprises et classées.

Pour comprendre les librations de la Lune, décrivons son mouvement. Comme pour toute planète, le mouvement global de la Lune se décompose en deux modes : un mouvement de translation curviligne ou «mouvement orbital» (la révolution autour de la Terre), et un mouvement de rotation autour de son centre de masse, mouvement dit «spin».

Au XVII^e siècle, grâce à Isaac Newton, intégrant les travaux de Johannes Kepler et ceux d'Edmond Halley, la description des orbites célestes passe d'un statut géométrique et ciné-

matique à un statut dynamique. Ainsi, la deuxième loi de Newton relie le mouvement d'un corps céleste aux forces qui le produisent et le perturbent au cours du temps. D'après les lois de Kepler, une planète décrit une trajectoire elliptique. S'il n'y avait pas de perturbations liées aux autres planètes du Système solaire, l'orbite de la planète serait une ellipse parfaite, fixe et invariable. À cause des autres planètes, l'astre dévie de son orbite keplerienne et décrit des trajectoires variables, mais qui restent confinées dans une couronne (voir la figure 2).

La Lune : une exception !

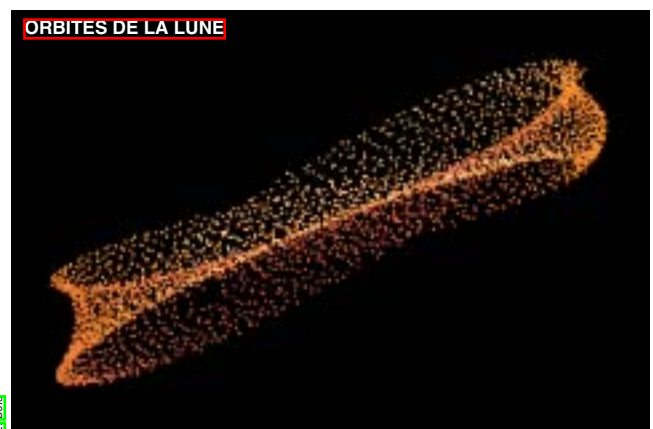
L'orbite keplerienne décrit correctement l'orbite moyenne d'une planète du Système solaire. Ceci n'est plus vrai dans le cas de la Lune. La présence du Soleil rompt en effet la simplicité keplerienne prévue pour le problème des deux corps : le mouvement orbital de la Lune relève du problème des trois corps. Ses trajectoires consécutives prennent une forme de couronne torsadée très complexe, surtout quand on prend en compte toutes les perturbations pour calculer son mouvement avec une grande précision (voir la figure 2). On considère que le plan de l'orbite de la Lune est incliné de cinq degrés en moyenne par rapport à l'écliptique (l'écliptique est le plan qui contient le Soleil et le plan orbital moyen de la Terre).

L'orbite de la Lune est complexe, mais sa rotation sur elle-même ne l'est pas moins. Elle tourne sur elle-même dans la même période de temps qu'elle effectue une révolution autour

de la Terre, soit 27 jours, 7 heures, 43 minutes et 11,5 secondes. En bref, elle tourne sur elle-même et autour de la Terre en même temps, c'est pourquoi elle présente toujours la même face à la Terre. Son axe de rotation polaire fait un angle moyen de un degré et 35 minutes avec le pôle de l'écliptique, c'est-à-dire l'axe perpendiculaire au plan de l'écliptique (voir la figure 3). La Lune est également soumise à un mouvement de précession, telle une toupie : son axe de rotation décrit un cône autour du pôle de l'écliptique, dans le sens inverse de celui de sa rotation (voir la figure 4).

Le mouvement de la Lune présente une particularité : il réalise un double synchronisme. Premièrement, la Lune décrit une révolution autour de la Terre dans le même temps qu'une rotation sur elle-même. Ce mouvement synchrone de la rotation et du mouvement orbital moyen, ou encore «résonance spin-orbite», a une période de 27,3 jours. Le deuxième synchronisme se produit entre la précession de l'axe de rotation lunaire et une seconde précession, celle du plan de l'orbite lunaire par rapport au plan de l'écliptique (voir la figure 4). Ces deux précessions ont une période de 18,6 ans. Ce double synchronisme engendre deux fréquences supplémentaires, dites «fréquences de résonance», de 2,9 ans et de 80,1 ans. Toutes les perturbations de la rotation de la Lune reviennent selon quatre fréquences : 27, 3 jours, 18,6 ans, et les deux fréquences de résonance de 2,9 ans et 80,1 ans.

La rotation complète de la Lune (sa rotation moyenne et ses librations)



2. LES ORBITES DE LA TERRE ET DE LA LUNE ont des formes géométriques très différentes. Les orbites consécutives de la Terre (ici, une centaine sont représentées) sont contenues dans une couronne elliptique, tandis que celles de la Lune forment une couronne torsadée

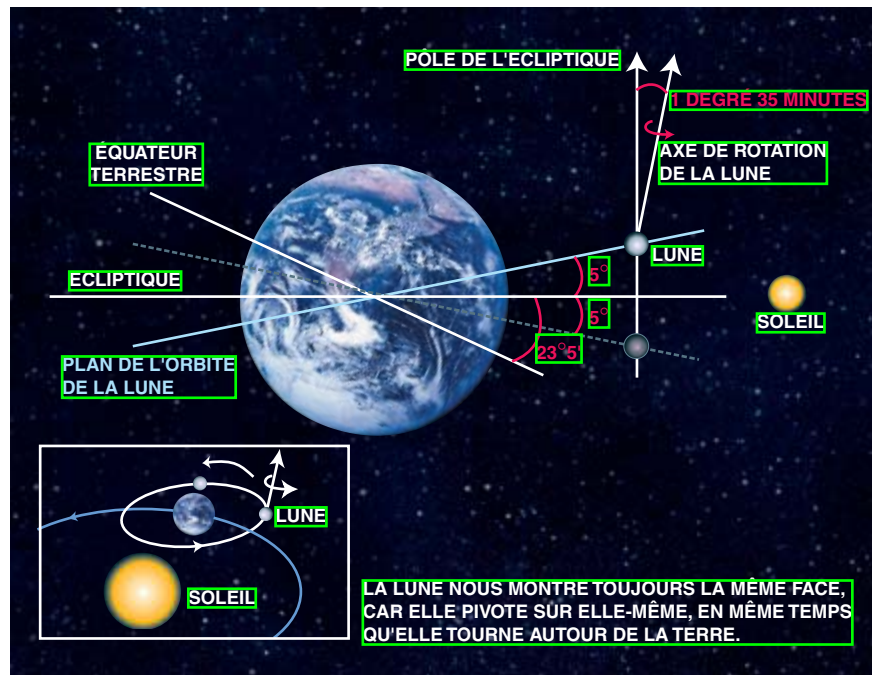
complexe (vue ici par la tranche). Les orbites de la Lune ne relèvent pas du problème des deux corps (la Terre et la Lune), mais des trois corps, en raison de la proximité du Soleil, dont la masse est plus de 330 000 fois plus élevée que celle de la Terre.

est décrite par les équations traditionnelles de la rotation des corps solides sur eux-mêmes (équations d'Euler). Elle peut être représentée par les angles d'Euler dans l'espace réel à trois dimensions (espace dit de configuration) (voir l'encadré de la page 58). Dans l'espace des phases (l'espace où le corps étudié est repéré par ses positions, mais aussi par ses vitesses), les libérations dites «géométriques» traduisent des solutions quasi périodiques aux équations de rotation, présentes sous forme d'îles de libérations autour de points fixes qui, eux, correspondent à des solutions périodiques. Les libérations lunaires sont des mouvements quasi périodiques (autour des quatre fréquences précédemment citées).

Les libérations sont très nombreuses et fortement imbriquées. Leur classification est fondée sur la distinction entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique de la Lune. Les deux familles sont les libérations potentielles, dont les causes sont gravitationnelles (elles correspondent à une variation d'énergie potentielle de la Lune), et les libérations cinétiques, dont les causes ne sont pas gravitationnelles, mais directement liées au mouvement qui les produit (elles correspondent à une variation d'énergie cinétique de la Lune). Pour les sous-familles de libérations, on relie le nom de la libération à sa cause, selon sa nature. Cette méthode de désignation, simple et évolutive, permet de rester proche de l'interprétation physique directe.

Dans les libérations potentielles, on trouve les libérations dites de «figure principale», dues aux perturbations engendrées par des masses ponctuelles (les astres sont considérés comme des points) sur la «figure» de la Lune (la figure dynamique représente la répartition spatiale de la masse dans le corps) ; les libérations dites d'«interaction figure-figure», qui prennent en compte les figures des astres dont les potentiels interagissent avec celui de la Lune. Les libérations cinétiques contiennent les libérations centrifuges, produites par des déformations internes à la Lune, provoquées, par exemple, par la présence d'un noyau liquide (voir la figure 5).

Une sous-classe commune aux libérations potentielles et aux libérations cinétiques contient les libérations



3. LA LUNE TOURNE autour de la Terre en 27,3 jours. Le plan de son orbite forme un angle de cinq degrés par rapport au plan de l'écliptique (le plan contenant le Soleil et l'orbite moyenne de la Terre). Elle tourne aussi sur elle-même en 27,3 jours ; son axe de rotation est incliné de un degré et 35 minutes par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique, nommée pôle de l'écliptique. La révolution et la rotation s'effectuent dans le même sens et sont synchronisées : la Lune nous montre toujours la même face.

dites accidentelles. Il s'agit de libérations résiduelles sans cause permanente dans le temps. Elles peuvent être déclenchées par un impact important de météore, qui introduit de l'énergie cinétique supplémentaire (libérations cinétiques), ou par le passage proche et rapide d'un autre corps céleste (libérations potentielles).

Modèle relativiste

Pour étudier les libérations réelles dans le détail et approfondir leurs origines, il a fallu mettre au point un modèle global de la Lune, issu de l'intégration du Système solaire dans son ensemble, afin d'y «prélever» ensuite un mouvement précis de la Lune. Les progrès des mesures astronomiques sont à l'origine de modèles théoriques toujours plus précis et plus complets. Les limites du «négligeable» ne cessent de reculer, et les approximations d'hier n'ont plus cours. Toutefois, les observations à la microseconde près ne suffisent pas à donner la cause du phénomène.

Désormais, l'objectif n'est plus seulement de construire des éphémérides : prédire n'est pas toujours expliquer. On construit parfois des solutions sous forme de séries formelles dont on ajuste progressivement les paramètres aux

observations. Les pseudo-solutions ainsi obtenues ne peuvent expliquer les phénomènes, même si elles donnent des prédictions sur les positions. Au contraire, un modèle physique, construit à partir des lois de la physique, allie prévision et compréhension des phénomènes.

Le Système solaire est constitué de sous-systèmes dont les interactions empêchent qu'on les considère comme tout à fait indépendants et isolés. Le système Terre-Lune est l'un de ces sous-systèmes immergés dans le Système solaire. Pour construire une théorie moderne de la Lune qui rende compte de la dynamique du système Terre-Lune en ayant une précision compatible avec celle des observations de télémétrie, on ne pouvait plus se limiter à la seule intégration des équations du mouvement de la Lune, modifiées par les perturbations provoquées par les autres astres du Système solaire ; ni se contenter d'une description newtonienne de la gravitation ; ni, l'on s'en doute, considérer les corps comme ponctuels.

Nous avons intégré le Système solaire dans son ensemble (le Soleil, les planètes, une série d'astéroïdes et la Lune), c'est-à-dire que nous avons intégré les équations de tous ces corps (au lieu de les traiter seulement

comme des perturbations), afin d'y prélever ensuite le mouvement spin-orbite de la Lune, avec une cohérence relativiste «postnewtonienne» jamais réalisée jusqu'à présent. Expliquons en quoi consiste une formulation postnewtonienne.

La théorie de la relativité générale représente la réalité physique par un champ continu. En l'occurrence, il s'agit d'un champ de gravitation où les masses «particulières», les étoiles et les planètes par exemple, sont considérées

comme des singularités de ce champ, et non plus comme des systèmes discrets de points matériels isolés les uns des autres. Ce concept rend impossible l'idée d'une mécanique céleste purement relativiste. Cependant, les formulations dites postnewtoniennes permettent, en dérivant des solutions approchées aux équations d'Einstein, d'intégrer dans un cadre relativiste le problème des «N corps» sur la base de la description de la gravitation donnée par la théorie d'Einstein.

Notre modèle, mis au point avec Alain Journet et David Vokrouhlicky, est le seul qui combine, dans ce cadre post-newtonien, la rotation des corps sur eux-mêmes et leurs mouvements dans le champ de gravitation local. Il tient compte de la distribution de la masse dans les corps (c'est-à-dire de leur figure dynamique) et de leurs déformations dues aux marées. Grâce à ce modèle, en 1995, nous avons identifié une troisième famille de librations : les librations relativistes.

Et pourtant, elle libre !

Jusqu'à ces dernières années, une distinction était établie entre les librations vues de la Terre (librations dites «apparentes») et celles censées traduire des balancements «plus réels» de la Lune (librations dites «physiques»). En réalité, cette distinction provient de l'utilisation de deux repères de référence différents. Dans la classification actuelle, l'ensemble des librations est considéré dans un repère de référence unique.

Les librations apparentes contiennent deux familles, les librations «diurnes» et les librations «optiques». Les librations optiques se divisent aussi en deux familles : les librations optiques en longitude et les librations optiques en latitude. Elles ont été observées au XVII^e siècle par l'astronome allemand Johannes Hevelius et par Galilée. Toutes ces librations apparentes se combinent et voilà pourquoi, au total, la face visible de la Lune représente 59 pour cent de sa surface totale, et non 50 pour cent.

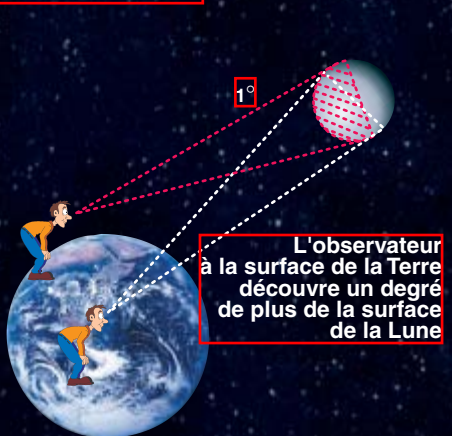
Les librations apparentes, observées depuis la Terre, proviennent de la configuration géométrique de la Lune par rapport à la Terre. Toutefois, la Lune est soumise à des balancements qui lui sont propres. Newton eut le premier l'idée d'un mouvement de balancement réel de la Lune qui se superposerait à sa rotation. Ces librations étaient nommées librations physiques. Cette distinction entre les librations apparentes et les librations physiques est conventionnelle et liée à l'histoire de leur découverte... sur Terre. La Lune libre, c'est un phénomène réel, et ses librations sont visibles depuis la Terre.

a) Les librations diurnes proviennent d'un phénomène de parallaxe. L'observateur terrestre ne se trouve pas au centre, mais à la surface de la Terre et il tourne avec la Terre. Il ne voit pas la même surface de la Lune qu'un observateur qui serait situé au centre. Tout se passe comme si la Lune avait bougé : l'amplitude de ces librations diurnes atteint un degré.

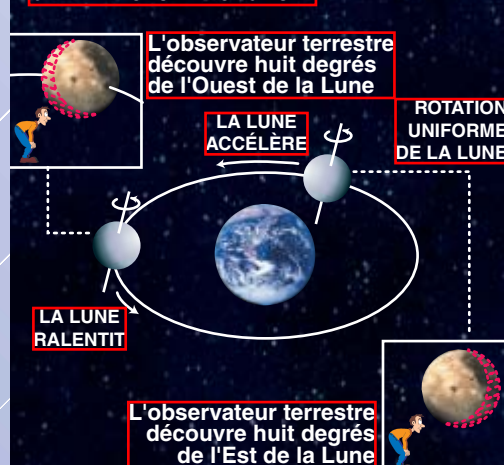
b) Dans les librations en longitude, la face visible de la Lune semble se déplacer de huit degrés tantôt vers l'Est, tantôt vers l'Ouest. La raison est simple : la vitesse de révolution de la Lune varie entre le périégée (vitesse maximale) et l'apogée (vitesse minimale), alors que sa vitesse de rotation est relativement uniforme. La rotation est en avance ou en retard sur la révolution. Quand la Lune s'éloigne de la Terre, sa vitesse radiale est inférieure à la vitesse moyenne de sorte qu'elle semble tourner sur elle-même trop vite, dévoilant des régions normalement cachées. De même, quand elle se rapproche de la Terre, sa vitesse radiale devient supérieure, et elle semble ne pas tourner assez vite sur elle-même. À nouveau, une partie de la région normalement cachée est dévoilée.

c) Dans les librations optiques en latitude, la Lune semble osciller du Nord au Sud, et l'on aperçoit des régions polaires normalement dissimulées. L'équateur de la Lune est incliné d'environ 6,5 degrés par rapport à son plan orbital, de sorte qu'au cours de sa précession, elle présente un peu plus son hémisphère Nord ou Sud.

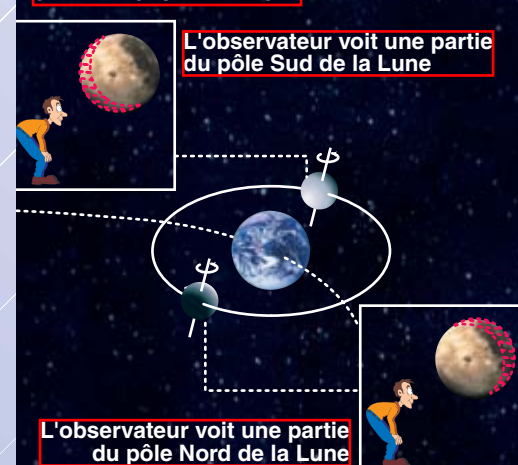
a. LIBRATIONS DIURNES

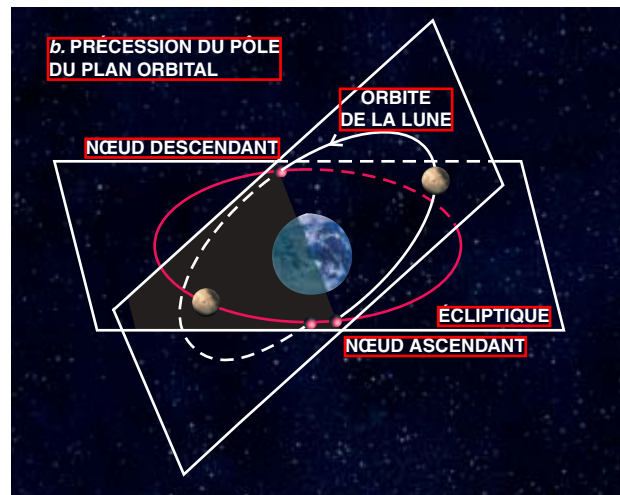
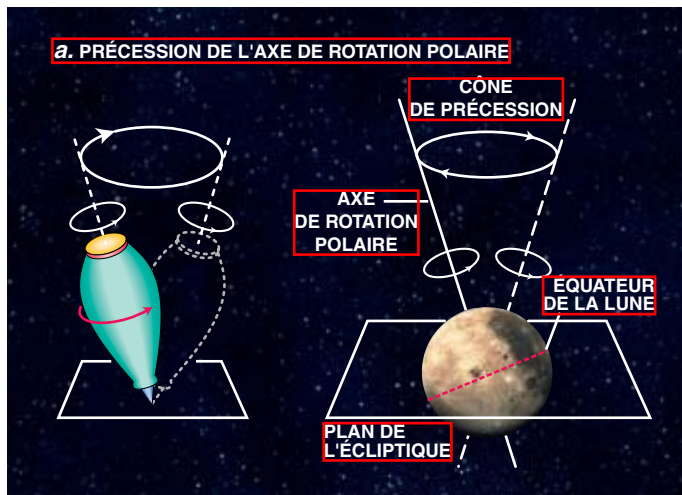


b. LIBRATIONS EN LONGITUDE



c. LIBRATIONS EN LATITUDE





4. LE MOUVEMENT DE PRÉCESSION ressemble à celui d'une toupie. La Lune a deux mouvements de précession. Le premier concerne son axe de rotation polaire : il tourne autour d'une position moyenne et décrit un cône en 18,6 ans (a). Le second concerne le pôle de son plan orbital (l'axe perpendiculaire à son plan orbital), qui décrit lui aussi un cône (b). L'orbite de la Lune croise le plan de

l'écliptique en deux points, nommés nœud ascendant et nœud descendant. À cause de cette seconde précession, à chaque fois que la Lune croise le plan de l'écliptique, les nœuds sont un peu décalés des nœuds précédents. Les nœuds retrouvent leur position initiale au bout de 18,6 ans. Les deux précessions sont synchronisées selon la période de 18,6 ans.

Dans le modèle, on retrouve un ensemble de termes identiques aux termes newtoniens et un autre ensemble de termes proportionnels au facteur $1/c^2$, où c est la vitesse de la lumière. Nous nommons cette seconde catégorie de termes, les contributions «strictement» relativistes. Les libérations relativistes correspondent à ces contributions dans le mouvement de rotation de la Lune. L'amplitude de ces libérations atteint une milliseconde de degré avec des périodes de 18,6 ans et 80,1 ans. Les libérations relativistes constituent une troisième famille de libérations à part entière. Elles atteignent le seuil de la précision actuelle des observations.

Dans le cas de la rotation de la Terre, les contributions «strictement» relativistes sont près de deux ordres de grandeur inférieures à la précision des observations sur la rotation de la Terre. La Lune se présente donc comme une meilleure candidate que la Terre pour la vérification de ce type de termes relativistes prévus par les développements théoriques des équations d'Einstein. Par ailleurs, elle pourrait aussi servir de détecteur ou de «témoin» de phénomènes autres, telles les interactions du Système solaire, comme nous venons de le montrer sur un cas : la figure dynamique du Soleil.

Le Soleil est très légèrement aplati à ses pôles, mais la valeur de cet aplatissement, qui se situe entre 10^{-8} et 10^{-5} , n'est pas connue avec précision. Or, l'aplatissement solaire a un effet

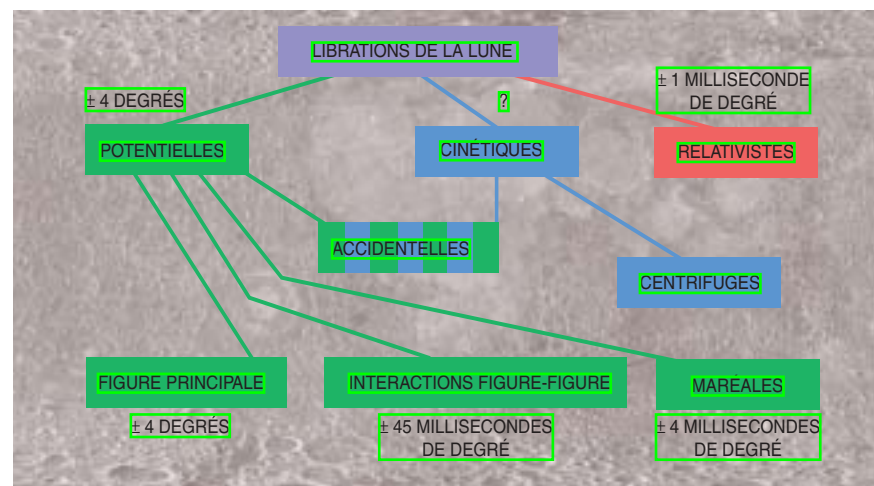
gravitationnel sur les libérations lunaires. Nous avons calculé les libérations produites par cet effet et déterminé celles qui sont compatibles avec les libérations connues. Nous avons ainsi réduit en retour la fourchette des valeurs possibles en estimant la borne supérieure à 3×10^{-6} .

Le noyau de la Lune est-il liquide?

Nous utilisons aussi notre modèle pour étudier les libérations créées par le cœur de notre satellite. Le noyau de la Lune reste très mystérieux : on ne connaît ni sa taille ni sa nature. Des sismographes ont été posés sur le sol lunaire et mesurent toutes les secousses. Plusieurs milliers de séismes profonds se produisent

chaque année. Cependant, le signal est très faible et se propage lentement. Les tremblements du sol lunaire semblent contrôlés par les déformations de la croûte, liées aux marées. Malgré ces mesures, on ignore si le noyau de la Lune est solide, liquide ou visqueux. Le noyau serait probablement petit. S'il est métallique, son rayon est inférieur ou égal à 600 kilomètres. S'il est liquide, son rayon est inférieur ou égal à 400 kilomètres.

Quoi qu'il en soit, le rapport de la masse du noyau à la masse totale de la Lune est faible, moins de 15 pour cent (pour un rayon de 400 kilomètres), alors qu'il atteint 50 pour cent pour Mercure et 33 pour cent pour la Terre. La description du noyau de la Lune est importante, car les astronomes remontent aux mécanismes de formation des



5. TABLEAU RÉCAPITULATIF des familles et sous-familles de libérations, et de leurs amplitudes maximales.

planètes notamment grâce à la connaissance des noyaux planétaires.

Comment utiliser les descriptions hyperfines de la rotation de la Lune pour résoudre l'énigme du noyau ? De la même façon qu'on peut identifier un œuf cru d'un œuf dur sans les casser, seulement en les faisant tourner sur eux-mêmes : les deux œufs ne pré-

sentent pas un mouvement de rotation identique ! L'œuf dur a une rotation régulière qui diminue progressivement, tandis que la rotation de l'œuf cru présente des oscillations, à cause du jaune qui bouge à l'intérieur.

Nous avons construit une représentation simple de noyau lunaire dans notre modèle global des librations de

la Lune. Nous lui avons attribué différentes compositions et tailles. Pour chacun des noyaux, nous avons calculé les librations lunaires et sélectionné celles qui sont compatibles avec les observations. Certaines des librations calculées ont une fréquence de 2,9 ans, c'est-à-dire une des fréquences de résonance du système. Seul un noyau très

Les librations de la Lune décrites par trois angles

La description de la rotation complète de la Lune s'obtient par la résolution des équations générales de la rotation d'un corps solide. La solution de ces équations, paramétrée par des angles dits d'Euler (à gauche, ci-dessous), donne l'évolution temporelle de la rotation de la Lune (sa rotation moyenne et ses librations) (à droite, ci-dessous).

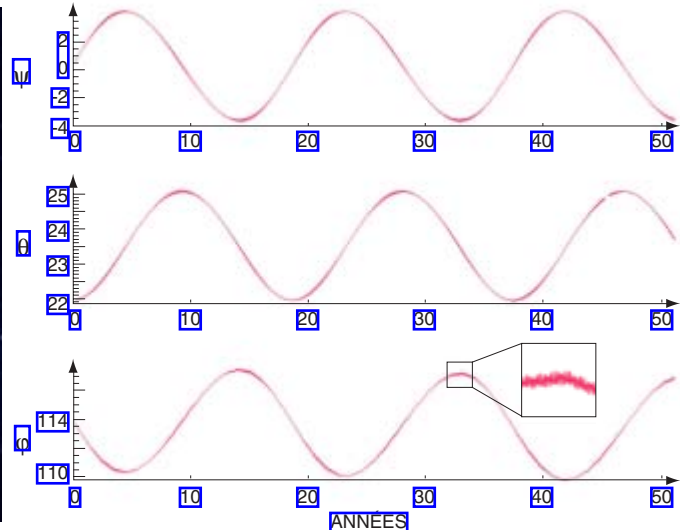
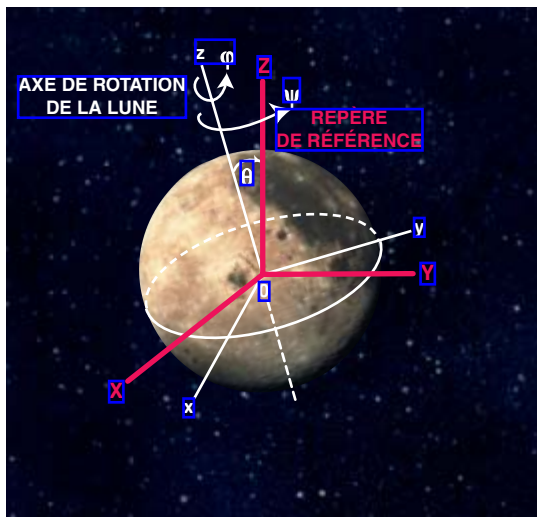
L'évolution de ces angles exprime la rotation d'un repère $Oxyz$, lié à la Lune, par rapport à un repère de référence $OXYZ$ non-tournant, centré sur le centre de masse de la Lune. Le plan de référence OXY est ici un équateur terrestre fixe, défini comme plan de référence à une date donnée (le plan «J2000»).

La rotation de la Lune autour de son axe polaire Oz est représentée par l'angle φ (cette rotation élémentaire est nommée «rotation propre»). L'angle θ représente les variations de l'inclinaison de l'axe polaire lunaire par rapport à l'axe de référence OZ (θ est l'angle dit de «nutation»). Enfin, l'angle ψ représente la «précession» de l'axe polaire lunaire Oz autour de l'axe de référence OZ . La Lune tourne sur elle-même en 27,3 jours, mais l'angle φ a été tracé sans cette rotation uniforme et rapide, afin que l'on distingue les oscillations périodiques.

Les trois angles oscillent avec une période majeure de 18,6 ans, conduite par la précession des nœuds de la Lune. Ces larges oscillations, de plusieurs degrés d'amplitude, rendent compte des librations apparentes optiques (celles «vues de la Terre», c'est-à-dire liées à la configuration relative de la Lune par rapport à la Terre). L'angle θ varie régulièrement entre 22 et 25 degrés

(l'équateur terrestre J2000 est incliné de 23,5 degrés par rapport au plan de l'écliptique et l'axe polaire lunaire oscille autour d'un angle de 1,5 degré par rapport au pôle du plan de l'écliptique). Cet angle θ représente les librations apparentes optiques en latitude (à l'exception de celles de période égale à 27,3 jours, non représentées ici). La modulation en ψ de 18,6 ans rend compte des librations apparentes optiques en longitude (toujours sans celles de période égale au mois lunaire). Dans la présente «expérience numérique», tout ce passe comme si l'observateur était situé au centre de la Terre. Les librations dites diurnes ne sont donc pas représentées.

De plus petites oscillations se superposent aux trois grandes modulations de période 18,6 ans : elles sont visibles dans l'épaisseur du trait. Il s'agit de toutes les autres librations, dont les amplitudes sont plus faibles. Leurs amplitudes sont au maximum de l'ordre de 500 secondes de degré en ψ et φ , et 250 secondes de degré en θ . Une modulation intermédiaire apparaît en φ , due à l'action gravitationnelle directe du Soleil sur la rotation de la Lune : sa période est de un an. Les librations furent nommées «physiques», et elles traduisent les déviations au mouvement moyen décrit par les lois empiriques de Cassini. Les deux types de librations («apparentes» et «physiques») ne sont ni plus ni moins physiques, et tout aussi réelles, l'une que l'autre. Dans les équations de la rotation de la Lune, les librations apparentes et la plus grande des librations «physiques» correspondent au même terme perturbatif, c'est-à-dire à l'action gravitationnelle directe de la Terre sur la rotation de la Lune.



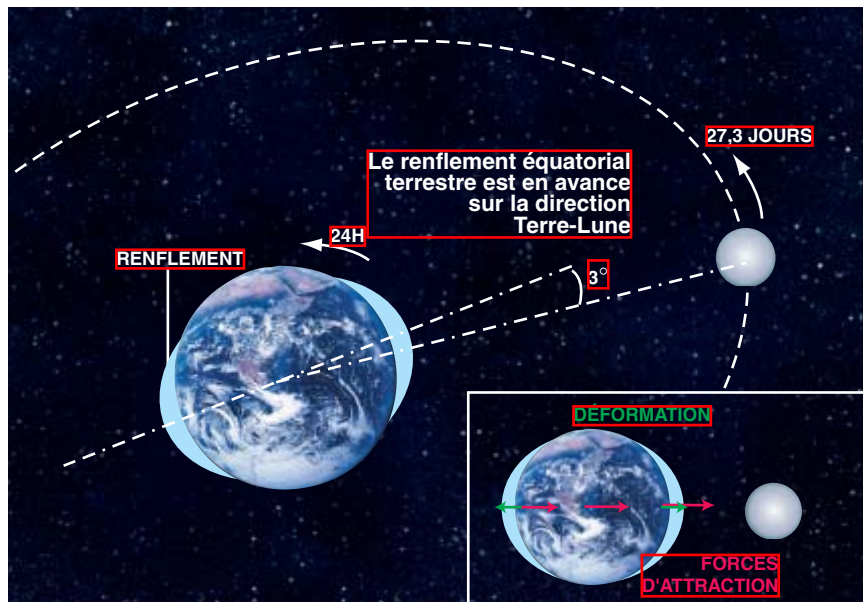
petit (environ 200 kilomètres de rayon), s'il est liquide ou très visqueux, est compatible avec l'ensemble des libractions connues aujourd'hui. Si sa taille est supérieure, alors le noyau est plus dense. Pour lever cette ambiguïté, nous modélisons aujourd'hui d'autres types de noyaux lunaires en tirant profit des modélisations du noyau terrestre.

Grâce à notre modèle, nous avons étudié les marées lunaires et montré qu'elles conduisent à des libractions spécifiques. Sur la Terre, les marées sont dues à l'attraction de la Lune, qui déforme le globe terrestre dans son ensemble. Réciproquement, la Terre attire la Lune, et cette attraction provoque des marées lunaires, sous forme de déformations solides de la Lune, qui engendrent des libractions dites libractions maréales. Nous avons calculé leur amplitude : elle vaut quatre millisecondes de degré. Elles suffisent à provoquer un bulbe équatorial lunaire dans la direction moyenne de la Terre.

À cause de l'inclinaison de l'équateur de la Lune sur son orbite, ce bulbe oscille légèrement en latitude autour de l'équateur lunaire. En outre, une partie de l'énergie maréale se dissipe dans la structure interne de la Lune où des déformations inélastiques engendrent des libractions de même allure que les libractions maréales, mais d'amplitude beaucoup plus faible (au moins un ordre de grandeur). La Lune est en fait plus élastique qu'inélastique. Nous avons déduit de l'ensemble de ces libractions une amplitude de marée radiale du globe lunaire de quelques centimètres en direction de la Terre.

La Lune s'éloigne de la Terre !

Les phénomènes des marées ont des conséquences étonnantes. La Terre provoque un renflement de la Lune et, inversement, la Lune engendre aussi un renflement du globe terrestre au niveau de l'équateur dans la direction de la Lune et ce renflement est symétrique. En effet, la force exercée par la Lune est plus forte sur le côté qui fait face à la Lune (le plus proche) que sur la face opposée (la plus éloignée de la Lune). L'attraction subie par le centre de la Terre se situe entre ces deux extrêmes. En tout point du globe terrestre dans la direction de la Lune, la différence entre la force d'attraction lunaire qui s'exerce en ce



6. LA LUNE S'ÉLOIGNE DE LA TERRE. Elle crée un renflement du globe terrestre dans son ensemble au niveau de l'équateur en direction de la Lune. Or, la Terre tourne sur elle-même plus rapidement que la Lune ne tourne autour de la Terre. De ce fait et à cause de la viscosité terrestre, ce bourrelet de marées se réalise toujours un peu en avance sur la direction Terre-Lune (avec un angle de trois degrés). Cette avance accélère la Lune sur son orbite, et élargit donc son orbite : la Lune s'éloigne de la Terre à raison de un à trois mètres par siècle.

point et celle exercée au centre conduit à la déformation globale de la Terre : elle « se dilate » dans la direction de la Lune, c'est-à-dire qu'un bulbe apparaît de part et d'autre de la Terre (voir la figure 6).

Par ailleurs, le milieu terrestre est visqueux, ce qui introduit une inertie entre l'action et l'effet. La Terre tourne plus vite sur elle-même que la Lune autour de la Terre : par exemple, en six heures, la Terre fait un quart de tour sur elle-même, alors que la Lune ne se déplace sur son orbite que d'un angle faible vu de la Terre (voir la figure 6). Par conséquent, le bourrelet formé à l'équateur de la Terre se produit toujours un peu en avance sur la direction Terre-Lune.

Cette avance permanente se stabilise à 12 minutes de temps, soit un angle de trois degrés. Le bourrelet a

tendance à attirer en avance la Lune sur son orbite avec une accélération d'environ de 25 secondes par siècle. Son orbite s'élargit donc et la Lune s'éloigne de la Terre à raison de un à trois mètres par siècle carré.

Par conservation du moment angulaire général de la Lune, ce mécanisme d'éloignement s'accompagne d'un ralentissement de la Lune sur elle-même, et le synchronisme est conservé. Conséquence de l'éloignement de la Lune : la rotation de la Terre sur elle-même ralentit. Il en résulte un rallongement de la durée du jour. Nous n'assisterons pas aux conséquences ultimes de ces changements qui se déroulent au-dessus de nos têtes. Ces évolutions sont infimes et imperceptibles à l'échelle humaine. Et même si la Lune s'éloigne peu à peu, elle continue de nous montrer la même face.

Éric BOIS est responsable de l'équipe Dynamique non-linéaire à l'Observatoire astrophysique de Bordeaux.

É. BOIS et D. VOKROUHLICKY, *Relativistic Spin Effects in the Earth-Moon System*, in *Astron. and Astrophys.*, vol. 300, pp. 559-567, 1995.

É. BOIS, F. BOUDIN et A. JOURNET, *Secular Variation of the Moon's Rotation Rate*, in *Astron. and Astrophys.*, vol. 314, pp. 989-994, 1996.

X. NEWHALL et J. WILLIAMS, *Estima-*

tion of the Lunar Physical Librations, in *Celest. Mech.*, vol. 66, pp. 21-30, 1997.

É. BOIS et J.-F. Girard, *Impact of the quadrupole moment of the Sun on the Dynamics of the Earth-Moon System*, in *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, vol. 73, pp. 329-338, 1999.

É. BOIS, *Connaissance de la libration lunaire à l'ère de la télémétrie laser-Lune*, Comptes rendus de l'Académie des sciences (Paris), tome 1, série IV, pp. 809-823, Paris 2000.

Prothèses dentaires chez les Étrusques

GASPARE BAGGIERI • MARINA DI GIACOMO

Des prothèses en or datant du VII^e au IV^e siècle avant notre ère, servaient à remplacer des dents disparues ou à décorer des dents encore en place. Les Étrusques avaient découvert que l'or est un matériau biocompatible.

Le naturaliste Apulée (125 – 170) écrivait : « Bien en évidence et offerte au regard de tous, la bouche est l'organe dont se sert continuellement l'homme, pour embrasser ou pour parler avec quelqu'un, pour discuter en public ou réciter les prières au temple. Plus que de n'importe quelle autre partie de son corps, un orateur de la plus belle éloquence doit prendre soin de sa bouche, siège de son âme, porte de sa parole, commencement de ses pensées. »

Les pathologies dentaires de l'homme moderne sont vraisemblablement apparues en même temps que l'humanité et l'ont accompagné au cours de son évolution. Le Pithécanthrope et l'Australopithèque souffraient sans doute déjà de caries. Toutefois, même si les preuves sont peu nombreuses, on peut pourtant supposer que, jusqu'à la fin du Néolithique, les pathologies de la bouche étaient rares. C'est seulement au cours du Néolithique, il y a près de 10 000 ans, que sont apparus la cuisson des aliments, l'agriculture et l'élevage, qui ont abouti à la sédentarisation et à l'autosuffisance alimentaire d'*Homo sapiens sapiens*. Les maladies des dents et de la bouche sont sans doute apparues simultanément. Il semble que, selon le contexte anthropologique, sociologique, historique et géographique, trois à dix pour cent de ces populations étaient atteintes.

Les premiers témoignages de caries dentaires ont été retrouvés sur des vestiges étrusques qui datent du VII^e au II^e siècle avant notre ère. Les Étrusques, présents entre le delta du Pô, la côte de la mer Tyrrhénienne et l'Italie, ont souffert de caries dentaires et de pertes de dents. L'examen des différentes collections ostéologiques disponibles en Italie, qui proviennent de presque toutes les zones de peuplements étrusques connues, sont riches de plus de 1 300 pièces, dont près de 600 pour la seule nécropole de Pontecagnano, en Campanie.

Nous pensons que l'incidence des caries a progressivement augmenté au cours de la période hellénisante (entre le IV^e et le I^{er} siècle avant notre ère) de trois à quatre pour cent jusqu'à cinq à six pour cent, car le régime alimentaire est devenu plus raffiné et plus riche.

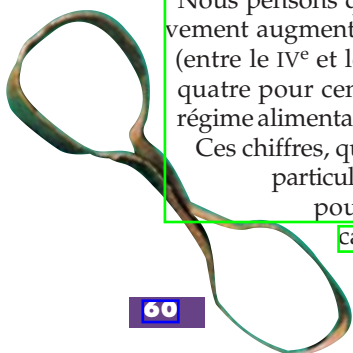
Ces chiffres, qui ne concernent que des campements particuliers dans quelques localités, témoignent pourtant d'une relative progression des caries durant l'époque classique.

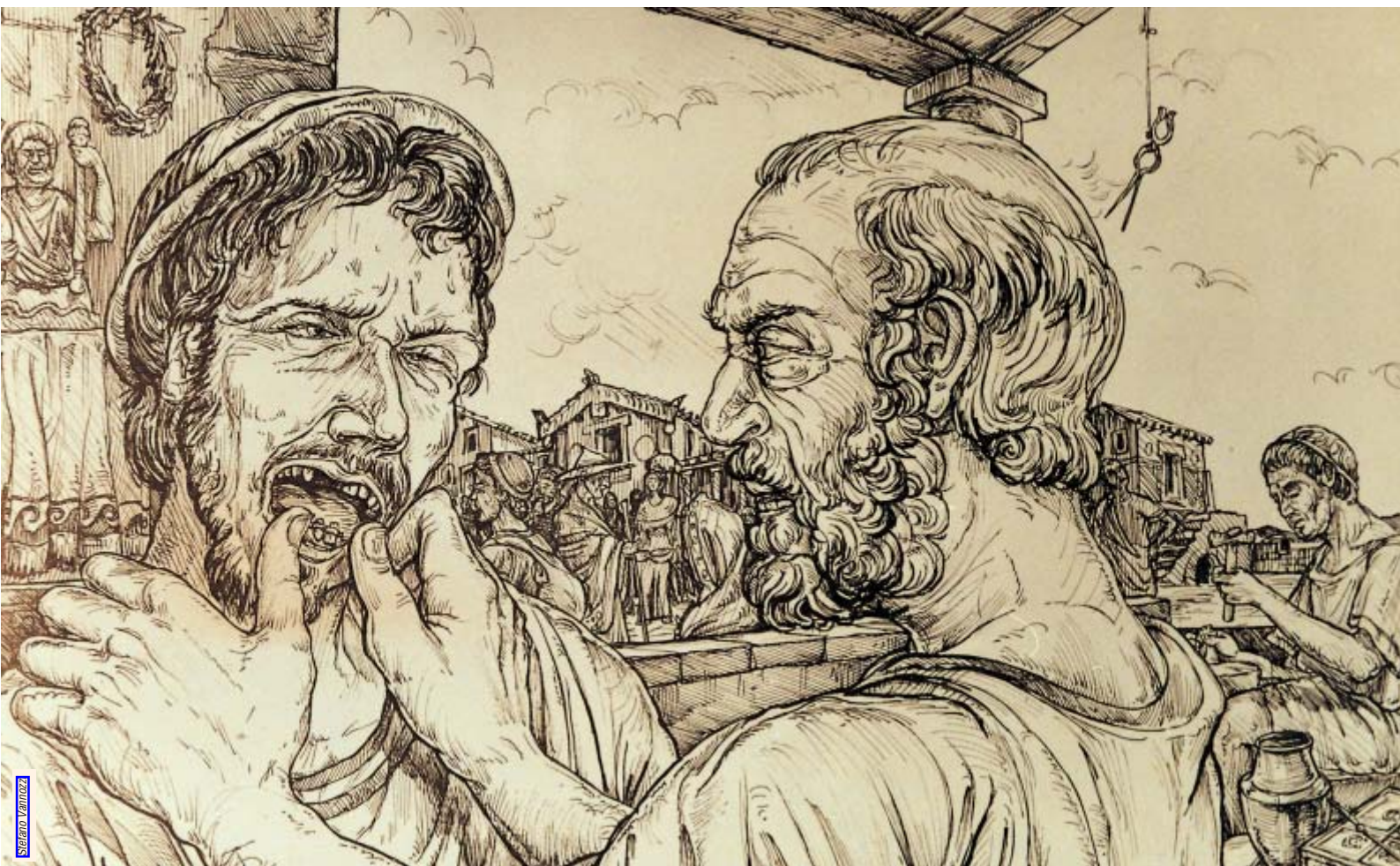
Un régime riche en hydrates de carbone est un terrain favorable au développement des caries. La proportion de personnes atteintes de caries dans les populations romaines et moyenâgeuses varie entre 3 et 12 pour cent, pour atteindre 16 pour cent à la Renaissance. À la fin du XV^e siècle, de nouveaux aliments provenant des terres colonisées se substituent aux aliments existants et favorisent cet accroissement. Le sucre apparaît sur les tables en Europe (il était connu des arabes, mais peu consommé) et devient la principale raison du développement des caries ; cet aliment favorise les caries plus que le miel. Le sucre, produit en quantité toujours supérieure et à un prix toujours décroissant, est utilisé comme additif dans de nouveaux aliments, tel le cacao, ou pour faire de la confiture : c'est le principal responsable des maladies dentaires. Selon les grands organismes internationaux de santé publique, la carie toucherait aujourd'hui près de 80 pour cent de la population mondiale, ce qui en fait l'une des maladies les plus fréquentes.

Caries chez les Étrusques

Ainsi à la fin de l'âge de bronze, les populations du centre de l'Italie, notamment les Étrusques, commencent à souffrir de maladies de la bouche, et l'incidence de ces pathologies progresse. Même si les chiffres traduisent une présence limitée de la maladie, au moins dans les campements étudiés, la carie dentaire se manifeste déjà sous toutes les formes connues aujourd'hui, avec ses complications. Certaines dents présentent une attaque modérée de l'émail, d'autres une attaque agressive avec ou sans destruction du ciment et de la dentine, qui atteint parfois la pulpe. Nous avons aussi observé des ostéolyses alvéolaires, c'est-à-dire des résorptions de l'os des alvéoles, qui résultaient vraisemblablement de la présence de kystes qui témoignent de complications dues à des infections du parodonte, l'ensemble constitué du ciment, des tissus qui fixent chaque dent dans son alvéole, de l'os alvéolaire et de la gencive.

Dès le IX^e siècle avant notre ère, le régime alimentaire commence à changer avec l'introduction de la vigne et de l'olivier : le vin et l'huile conditionneront désormais les habitudes alimentaires. De plus, les échanges culturels et commerciaux qui ont lieu en Méditerranée, dès la fin du VIII^e siècle





1. L'ART DE L'ODONTOLOGIE semble ancien : on a retrouvé des prothèses dentaires qui datent des Étrusques, c'est-à-dire qui ont été fabriquées et portées entre le VII^e et le IV^e siècle avant notre ère. Les prothèses, en or, auraient eu pour objet de remplacer des dents tom-

bées ou arrachées (en haut à gauche) ou pour fixer des dents déchaussées. Elles semblent avoir eu parfois un rôle décoratif (en haut à droite et page de gauche). Les Étrusques, qui utilisaient l'or pour ces prothèses, avaient compris que ce matériau est biocompatible.



2. LA PROTHÈSE DE CITTA DELLA PIEVE, découverte dans les environs de Chiusi, dans la province de Pérouse, nous est parvenue encore en place dans la bouche de sa propriétaire décédée, vraisemblablement vers l'âge de 18 ans. Le crâne est dans un assez bon état de conservation, la mandibule a encore toutes ses dents, sauf une incisive centrale ; enfin, l'usure dentaire est peu importante. La prothèse dentaire est composée de deux lames très minces, larges d'un peu plus de trois millimètres, qui s'étendent, tel un ruban, d'une prémolaire à l'autre, entrant et sortant par les espaces interdentaires. Les facettes semblent avoir été interrompues au niveau des extrémités comme si elles avaient été coupées ; peut-être n'y avait-il qu'un seul anneau, qui avait surtout une fonction d'ornementation. C'est une prothèse simple à anneau unique. Elsa Pacciani, anthropologue au Ministère de la culture, à Florence, a établi la composition de l'alliage de cette prothèse : elle contient 98 pour cent d'or.

avant notre ère, renforcent les changements d'habitudes alimentaires. Certains aliments absents auparavant apparaissent et l'on a montré que le pain, le miel, le fromage maigre et les fruits secs, telles les figues ou les dattes, favorisent la décalcification et, par conséquent, l'apparition des caries.

L'extraction était, semble-t-il, le remède le plus fréquent au mal dentaire, comme l'atteste l'abondance des dispositifs en or imaginés par les Étrusques, qui, ancêtres des prothèses dentaires modernes, se substituaient aux dents arrachées. Malheureusement, très peu de ces objets nous sont parvenus, peut-être parce qu'ils étaient exceptionnels, réservés à l'élite aristocratique. De plus, l'incinération, rite funéraire qui coexistait avec l'inhumation tout au long de la civilisation étrusque, faisait fondre ou endommageait ces proto-prothèses. Les inévitables violations de sépultures par des pilliers attirés par la perspective de récupérer des objets en or ont considérablement bouleversé les sites. Enfin, lors des fouilles et des inventaires de sépultures, les proto-prothèses ont parfois été confondues avec une boucle d'oreille, un anneau, un médaillon ou tout autre ornementation.

Les restes des prothèses dentaires retrouvés en Italie sont tous en or ou en alliage à forte teneur en or, et ils reflètent souvent une grande maîtrise de l'art aurifère. Les prothèses attestées et

originales sont au nombre de six : deux sont déposées au Musée étrusque de Tarquinia, une au Musée falisque de Civitacastellana et une au Musée archéologique de Florence. En fait, il y avait autrefois à Florence deux prothèses, mais l'une d'elles a été perdue lors des inondations de 1966. En outre, on trouve, toujours dans la capitale florentine, au Musée archéologique national, la prothèse dite de *Populonia*, mais son authenticité n'est pas avérée.

Le premier matériau biocompatible

La première étude, commencée en 1992, a été menée sur la prothèse de Civitacastellana, particulièrement intéressante parce qu'elle présente des éléments crâniens et mandibulaires. Nous avons cherché à déterminer la position occupée par la prothèse sur la mandibule ; l'appareil prothétique était placé sur le maxillaire inférieur au niveau des molaires gauches (voir l'encadré ci-contre). La prothèse, dans un excellent état de conservation, était parfaitement adaptée et ses caractéristiques physiques, tels son poids et son épaisseur, nous font penser que nous nous trouvons face aux premières applications d'une technique qui prend en compte le problème de la biocompatibilité et qui utilise des métaux précieux, normalement destinés à un tout autre

usage. Avec le physicien Giovanni Gigante, le chimiste Pino Guida et l'archéo-métallurgiste Claudio Giardino, qui ont effectué les analyses spectrales, nous avons analysé des échantillons en fluorescence X et nous les avons observés au microscope.

Aujourd'hui, cinq des sept prothèses dentaires ont été examinées, ce qui nous permet d'élaborer un scénario concernant l'apparition des techniques de fabrication de métaux biocompatibles avec l'appareil bucco-dentaire et leur utilisation.

Quatre prothèses proviennent de l'Étrurie antique et confirment l'existence de pratiques médicales remarquables. L'origine de ces objets reste imprécise, car ils auraient été inventoriés dès la fin du XIX^e siècle, mais les données sont incomplètes. Des informations précieuses, telles que la description de la tombe et des vestiges archéologiques, sa localisation exacte, ou encore la présence de restes humains, font défaut.

Au début des recherches sur la civilisation étrusque, des reproductions fidèles des plus belles pièces mises au jour ont été fabriquées, notamment des miroirs de bronze, des trépieds, de la vaisselle décorée et, bien sûr, des bijoux en or. Toutefois, les nombreux défauts dans la finition des prothèses étudiées et leur esthétique confirment leur authenticité. Les prothèses de Palestrina et de Falerii semblent être les plus anciennes, datant du VII^e siècle avant notre ère, les quatre autres datant des V^e et IV^e siècles, c'est-à-dire au moment où Hippocrate de Cos (-460/-377), encyclopédiste et médecin, exerçait en Grèce. Ce dernier a notamment décrit des pathologies de la bouche et de l'articulation temporo-mandibulaire dans ses traités *Les épidémies* et *Les articulations*.

Le fait que l'on écrive sur *La bouche et ses pathologies* au temps d'Hippocrate témoigne de l'existence d'une instrumentation adéquate destinée aux soins odonto-stomatologiques. L'instrumentation médico-chirurgicale antique attestée concerne presque exclusivement l'époque impériale. La plupart des objets utilisés avaient plusieurs fonctions : pinces, leviers, spatules, sondes et curettes étaient certainement également utilisés en chirurgie, en ophtalmologie ou en cosmétologie.

À l'époque de Pompéi, les pinces d'extraction dentaire, *odontagra*, utilisées pour les dents, et *rizagra*, pour les racines, présentent des détails

La prothèse de Civitacastellana

Elle appartenait à un homme décédé vers l'âge de 40 ans et présente des éléments crâniens et mandibulaires.

C'est l'unique prothèse que l'on sait dater avec précision. Elle fut découverte lors des fouilles conduites au XIX^e siècle par Francesco Mancinelli Scotti dans une tombe de la nécropole de Valsiarosa. La tombe avait été saccagée, mais cet objet unique a pourtant été retrouvé en place, dans la bouche. Aujourd'hui, cette prothèse est exposée au Musée national archéologique de Civitacastellana.

L'absence totale de dents a rendu difficile la localisation de la prothèse. Plusieurs hypothèses ont été avancées : en position postérieure gauche ou droite sur le maxillaire supérieur, sur les molaires gauches ou droites du maxillaire inférieur, ou dans une position plus antérieure. Nous avons cherché à retrouver sa position exacte : il semble que ce soit sur les dents supérieures antérieures. Après avoir essayé diverses positions sur les arcades, nous avons constaté que l'ensemble des os de la crête maxillaire et de la prothèse est ajusté pour les incisives centrale et latérale ainsi que pour la canine supérieure.

L'appareil pèse 1,96 gramme ; son apparence est robuste, il est épais de quelques micromètres et il est haut de plus de six millimètres. Ses anneaux sont presque carrés et façonnés comme si l'on avait cherché à reproduire l'anatomie des faces palatines des

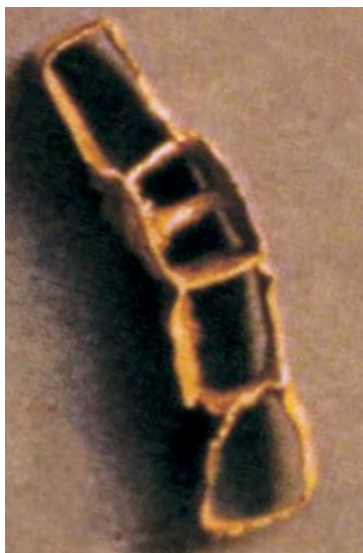
dents (sans doute pour insérer le dispositif sur les incisives supérieures). Cependant, un petit pivot dans l'un des sièges évoque la présence d'un élément artificiel qui aurait été placé à la suite de la perte ou de l'extraction d'une dent.

Nous connaissons la date de cette prothèse puisque la sépulture date elle-même du VII^e siècle avant notre ère. Cette datation précise en fait un objet de référence, qui nous a permis d'établir une chronologie possible des dispositifs prothétiques retrouvés : les prothèses de Chiusi et celle de Tarquinia A, à cerclage unique, seraient les plus récentes ; celles de Tarquinia B et de Stricurn seraient plus anciennes ; celles de Palestrina et Falerii Veteres remonteraient à la période la plus archaïque.

La composition

Nous avons analysé le métal de la prothèse : l'or est présent dans une proportion variant de 50 à 75 pour cent. La somme de la proportion d'or et de la proportion d'argent atteint 95 pour cent, ce qui explique la bonne résistance de l'alliage à la corrosion de la cavité buccale. Il est étonnant de constater que la proportion des composants des alliages d'or et d'argent rejoint les recommandations officielles des organismes sanitaires internationaux et des associations odontologiques d'aujourd'hui !

De surcroît, ces objets soigneusement manufacturés, qui satisfaisaient aux contraintes de tolérance chimique et immunologique de la bouche, étaient remarquablement légers, adaptables et ductiles. On peut ainsi les considérer comme les premiers témoins de prothèses en biomatériaux bien tolérés.



remarquables qui traduisent une réflexion sur la résistance et sur la puissance de ces instruments. L'exécution de ces objets de bronze est extrêmement soignée, notamment celle des manches qui assurent une excellente maniabilité et, par conséquent, un travail plus précis sur la dent ou sur la racine. Ils appartiennent à une instrumentation odontologique incomparable, presque moderne.

Certains papyrus égyptiens mentionnent quelques rares pratiques de soins dentaires, mais ces éléments ne suffisent pas à prouver l'existence d'un

savoir-faire en odontologie. Des prescriptions pour les maladies de la langue et pour les caries, ainsi que des techniques d'obturation des dents y sont consignées. «Pour éliminer les ulcères des dents, un autre remède consiste à renforcer les gencives : lait de vache, dattes fraîches, caroubes sèches. Laisser le tout reposer toute une nuit, exposer à la rosée du matin, puis mastiquer pendant neuf jours.»

Quant aux prothèses proprement dites, on ne dispose d'aucun élément archéologique évoquant cette pratique. L'examen d'une centaine de momies

n'a jamais révélé la présence de fil utilisé pour fixer des dents déchaussées. Au mieux, il est fait mention à Guizèh (vers -2500) de restes de squelettes contenant trois molaires concrétionnées reliées entre elles par un fil d'or. C'est le témoignage le plus ancien d'un acte odontologique.

Si ces pratiques étaient connues au début de l'ère chrétienne, on ne peut cependant pas exclure qu'il y ait eu une connaissance instrumentale antérieure, peut-être moins précise et moins bien adaptée, mais largement diffusée. Certains traités de l'époque impériale grecque, qui parlent de techniques chirurgicales et pharmacologiques, se réfèrent à des procédés connus et fréquents dans le monde étrusque. Pour le traitement, on préparait d'abord une décoction à base d'extraits de plantes et de tisanes. Si c'était inefficace, on faisait des offrandes aux dieux en sollicitant leur bienveillance. En dernier ressort, on pratiquait l'extraction de la dent.

La perte de dents, surtout celles de devant, représentait dans l'aristocratie de haut rang une perte d'image qui pouvait devenir un handicap social notable. Pour recouvrer une belle dentition et son sourire, on pratiquait des implants de prothèses dentaires en or. Le poète latin de la péninsule ibérique Martial (vers 40 à 103) rapporte que l'empereur Domitien (51-96) avait l'habitude de «mettre» une dent en or, probablement comme ornementation. À l'époque romaine, dès le V^e siècle, la loi interdit d'enterrer quelqu'un avec des objets en or, sauf s'il s'agit de prothèses dentaires. Ainsi, les prothèses étaient d'abord considérées comme des éléments de récupération esthétique avant d'être des objets de récupération fonctionnelle : c'était des soucis esthétiques qui motivaient l'implantation d'une prothèse. Les prothèses dentaires étrusques sont toutes façonnées pour être insérées sur des groupes de dents antérieurs, plus particulièrement celles du maxillaire supérieur.

Insérer une prothèse pouvait être aussi un moyen de soigner des gingivites, des abcès, des irritations, une mastication difficile ou des inflammations purulentes. Même si ces lésions sont assez fréquentes dans des restes mandibulo-maxillaires, nous ignorons celles qui résultent de l'usage de prothèses dentaires.

Les alliages de fer étaient connus en Étrurie, où la tradition métallurgique

Les prothèses de Tarquinia

Les informations à notre disposition sont trop minces pour identifier la provenance de ces deux prothèses découvertes à la fin du XIX^e siècle sur la zone archéologique de Tarquinia. Le gisement de Tarquinia, au même titre que celui de Palestrina, est très riche en éléments historiques de nature médicale. Au début du XX^e siècle, trois prothèses sont signalées au Musée archéologique de Tarquinia. La première prothèse (a) examinée est constituée d'un anneau unique pouvant accueillir trois dents centrales de la mâchoire supérieure. Elle a une largeur de 2,5 millimètres et pèse 0,5 gramme.

Cette prothèse a été analysée par fluorescence X, de sorte que l'on en a établi la composition. En observant la surface externe au microscope (avec un grossissement égal à 70), on repère la ligne de jonction de la soudure. En agrandissant encore (170 fois), on observe une trame désordonnée provoquée vraisemblablement par l'usure mécanique due à la mastication. Il s'agit d'un dispositif appliqué sur les dents antérieures que la personne a sans doute conservé assez longtemps de son vivant. Cette prothèse aurait été façonnée entre le VI^e et le IV^e siècle avant notre ère.

La deuxième prothèse de Tarquinia (b) présente, contrairement à la précédente, un système multiple d'anneaux, monté pour pouvoir accueillir chaque dent à une place déterminée. Cinq dents de l'arcade inférieure étaient ainsi emprisonnées dans une sorte d'attelle de quelque trois millimètres de hauteur, semblable à ce que l'on pratique aujourd'hui. Deux dents se trouvent encore dans la prothèse, une incisive centrale et une seconde prémolaire inférieure. La surface externe est marquée par l'empreinte des dents d'origine, mais peu d'usure mécanique (sa présence dans la bouche aurait été de courte durée). Elle daterait du IV^e siècle avant notre ère.



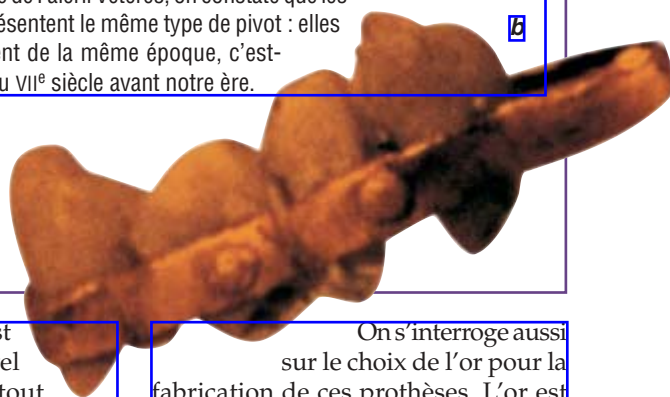
Les prothèses de Satricum et de Palestrina



a prothèse de Satricum (a) est une prouesse technique odontologique : dans l'attelle destinée à entourer quatre dents de l'arcade mandibulaire, une capsule d'or a été introduite par soudure. Cette capsule, haute de 10 millimètres, pèse 1,2 gramme ; elle a été obtenue en combinant deux facettes qui s'adaptent exactement sur une incisive latérale inférieure. Une analyse par fluorescence aux rayons X a mis en évidence la présence de points de soudure à l'argent. De plus, les bords de la cavité de la dent naturelle sont façonnés. On peut suivre des sillons qui évoquent de probables soins dentaires au moyen de curettes, en vue d'une possible obturation. La capsule d'or qui se substitue à la dent manquante, les soudures faites à l'argent et la présence de deux stries profondes évoquent une cassure ou une sensation d'inconfort qui auraient obligé l'«odontologiste» à modifier l'appareil. Déposée auprès du

Musée archéologique national de Villa Giulia, la dent daterait du VII^e ou du VI^e siècle avant notre ère. Le principe d'une capsule d'or posée à la surface ou à la place d'une dent sera redécouvert par Girolamo Fabrizio D'Acquapendente (1533-1619), mais pratiqué avec succès seulement un siècle plus tard par le chirurgien dentiste Pierre Fauchard (1678-1761).

La prothèse de Palestrina (b) présente trois dents dont une incisive centrale fracturée longitudinalement, sans reste de crâne. Sur un cerclage de quelque trois millimètres de hauteur, qui enserre les dents centrales de la mâchoire supérieure, des anneaux minces de séparation ont été exécutés et deux petits pivots en or remplacent des incisives au centre et sur le côté. Le façonnage de la prothèse montre qu'elle se substituait à deux dents, perdues naturellement ou peut-être extraites. Elle est conservée au Musée archéologique national de Villa Giulia. Quand on la compare à la prothèse de Falerii Veteres, on constate que les deux présentent le même type de pivot : elles dateraient de la même époque, c'est-à-dire du VII^e siècle avant notre ère.



locale commence dès le Premier Âge du fer, vers le X^e siècle avant notre ère, comme l'attestent les éléments d'ornementation retrouvés dans les sépultures de cette période. L'orfèvrerie se développe en Étrurie au début du VII^e siècle avant notre ère, quand sont introduites, grâce au développement des échanges avec l'Orient méditerranéen, des nouvelles techniques : par exemple la granulation ou le filigrane obtenus en soudant de fins fils d'or ou de petites sphères d'or microscopiques. On a ainsi retrouvé une coupe de cette période sur laquelle était soudée plus de 137 000 de ces petites sphères d'un diamètre moyen de 0,3 millimètre.

Même si, dans l'Antiquité, l'or n'a jamais été un métal disponible en grande quantité, le nombre d'objets retrouvés dans les tombes de la région montre qu'une opulente aristocratie étrusque avait un accès facile aux métaux précieux. Ces réseaux commerciaux étaient peut-être alimentés par les gisements localisés dans la partie septentrionale de l'Italie, entre les Alpes et le Pô. Ces gisements sont mentionnés par des auteurs classiques, notamment par Pline l'Ancien (23-79).

L'or était extrait soit du sable des cours d'eau, sous forme de pépites ou de paillettes, soit directement des filons aurifères affleurant dans la roche. L'or

natif n'est jamais pur : il est sous forme d'alliage naturel avec d'autres métaux, surtout l'argent. Son extraction ne nécessitait pas, alors, de techniques complexes, de sorte que l'or a été l'un des premiers métaux utilisés par l'homme : on en retrouve des traces dans la nécropole bulgare de Varna, qui date de près de 6 500 ans. Les prothèses étrusques qui ont été examinées sont considérées comme datant d'une période où les techniques métallurgiques étaient déjà bien maîtrisées, ce qui semble quelque peu en désaccord avec le caractère exceptionnel de ces pièces. Toutefois, cette rareté tient, d'une part, aux pratiques d'incinération et, d'autre part, à la fragilité de ces prothèses que l'on identifie avec certitude seulement quand elles sont encore liées aux dents, lesquelles doivent avoir été conservées en connexion anatomique.

On s'interroge aussi sur le choix de l'or pour la fabrication de ces prothèses. L'or est la marque d'un statut social élevé, tout en ayant une certaine valeur magique, ce qui en fait le matériau idéal pour les bijoux ou les amulettes destinées aux personnes de haut rang. Il résiste bien à la corrosion de la cavité buccale, ce que ne font pas d'autres métaux ou alliages, tels les alliages de cuivre et de fer. Les alliages d'or sont très stables, ce qui est une raison de leur compatibilité avec les tissus biologiques. Les prothèses découvertes en Étrurie peuvent même être considérées comme la preuve que l'on avait découvert, sans doute fortuitement, que ce métal est biocompatible.

Au crépuscule de leur civilisation, les Étrusques avaient-ils pressenti que le silence, dans lequel ils allaient plonger, était d'or?

Gaspare BAGGIERI est professeur d'histoire de la médecine dans le Service de recherche anthropologique et paléontologique du Ministère de la Culture, à Rome. Marina di GIACOMO, docteur en lettres et en histoire, travaille avec G. Baggieri.

C. GIARDINO et al., *EDXRF and metallography for in situ simultaneous analysis of archaeological metals artefacts*, in *5th Inter-*

national Conference on non destructive testing, microanalytical methods and environmental evaluation for study and conservation of works of art, Budapest, 1996.

C. GIARDINO, *Archeometallurgia*, éditions Laterza, Bari, 1998.

G. BAGGIERI, *Appointment with an Etruscan Dentist*, in *Journal of the Etruscan Studies Foundation*, vol. 6, pp. 33-42, 1999.

Propulsion sous-marine

STEVEN ASHLEY

Des torpilles se déplacent sous l'eau à plusieurs centaines de kilomètres par heure dans un flot de bulles de gaz qui réduit notablement les frottements du liquide sur le métal.

par supercavitation



Août 2000, mer de Barents, Norvège : le sous-marin russe *Koursk* K-141 sombre après que deux explosions ont éventré la coque du navire, le bruit court que l'accident est dû à des essais menés sur un nouveau type de torpilles ultrarapides. Quelques mois auparavant, un homme d'affaires américain, Edmond Pope, avait été arrêté et accusé d'espionnage ; il aurait tenté d'acquiescer les plans de nouvelles armes sous-marines. On ignore les détails tant de l'accident que de l'affaire d'espionnage, mais l'un et l'autre seraient liés au développement d'une technique d'avant-garde, qui permettrait aux armes et aux sous-marins de se déplacer en immersion à plusieurs centaines de kilomètres par heure, voire d'aller plus vite que le son dans l'eau. Aujourd'hui, la vitesse maximale ne dépasse pas 130 kilomètres par heure.

Les principales puissances navales semblent toutes développer ce type d'armes et de sous-marins ultrarapides, fondés sur le phénomène de la supercavitation, qui se produit lorsqu'on immerge un objet dans un écoulement liquide rapide. Des bulles de gaz se forment tout autour, ce qui diminue les frottements puisque le liquide ne mouille presque plus l'objet. Les systèmes à supercavitation constituent un bond en avant en matière de combat naval, comparable à ce qui s'est passé dans les airs, quand les avions à réaction ont remplacé les avions à hélices.

Bien que les fonds alloués à la recherche sur la supercavitation soient officiellement modestes, la liste des

armes et des vaisseaux de guerre potentiels fondés sur la supercavitation est longue. Elle comprend des balles sous-marines destinées à faire exploser des mines, des bateaux, voire des avions ou des hélicoptères volant à faible altitude ; des torpilles antivaisseau et antitorpille ; des armes de grande taille qui visent à mettre fin à un combat entre deux sous-marins ; des petits vaisseaux de surface ultrarapides et, enfin, des missiles sous-marins nucléaires destinés à neutraliser une flotille aéronavale complète.

L'utilisation de la supercavitation pourrait modifier notablement la stratégie militaire. Certains experts de la marine américaine y voient la fin des combats sous-marins classiques, où deux navires jouaient au chat et à la souris : les futurs affrontements ressembleraient plus aux combats aériens, avec des petites unités rapides et bruyantes, lancées à la manière des avions de chasse sur les porte-avions par des « porteurs sous-marins » géants. De telles armes seraient efficaces contre le système de défense antimissile du programme américain de « guerre des étoiles ». Une torpille ou un missile à supercavitation à plusieurs étages et à longue portée équipé d'ogives nucléaires serait tiré sous l'eau, effectuerait un long parcours sous-marin, puis surgirait des eaux côtières à proximité de leur cible sans que les systèmes de défense aériens ou spatiaux aient le temps de réagir.

Nous savons qu'une arme à supercavitation – au moins – existe depuis de nombreuses années. En 1977, après plus d'une décennie de recherches et

de développements, la marine soviétique a ajouté à son arsenal une torpille propulsée par un moteur de fusée, nommée *Squale*, qui se déplace dans l'eau à plus de 360 kilomètres par heure à l'intérieur d'une cavité de gaz produite par le missile lui-même. Bien que ce missile sous-marin à tête nucléaire soit rudimentaire et d'une efficacité limitée, la découverte de son existence au début des années 1990 a contraint les puissances militaires occidentales à s'intéresser à la supercavitation.

Les instances civiles s'y intéressent aussi et savent que l'on ne mènera à bien les projets d'engins à supercavitation qu'en résolvant toutes les difficultés techniques, écologiques... et financières, sans compter les problèmes que cela poserait à la navigation. Aujourd'hui, la technique n'en est qu'à ses débuts, au stade où en était l'aviation, il y a une centaine d'années, après les premiers vols sur un avion à deux hélices des frères Wright, à ceci près que l'on connaît mieux la physique de la supercavitation que l'on ne connaissait alors l'aérodynamique.

Un voyage dans une bulle

La propulsion d'un objet dans l'eau – comme tout nageur a pu le constater – demande un effort considérable. Le frottement y est 1 000 fois plus important que dans l'air et la force de frottement augmente avec la vitesse. Pour que les bateaux fendent efficacement les lames, architectes et ingénieurs du génie maritime dotent les bâtiments de

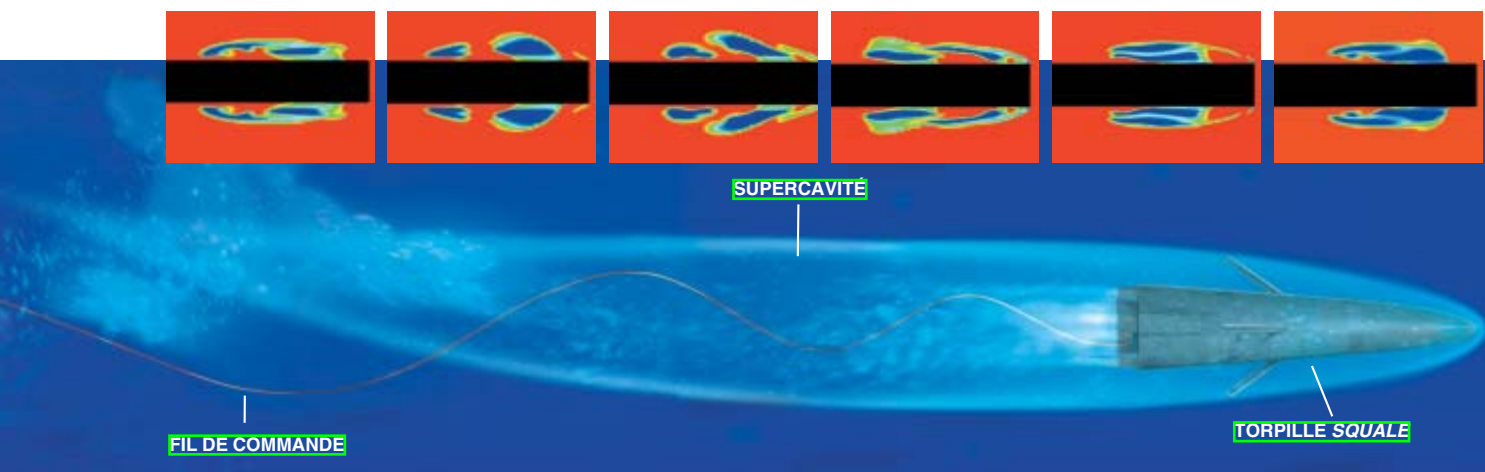


Photo: Hovear/Idem State and National

1. MODELISATION DU FLUX DE L'EAU lors d'un phénomène de supercavitation. Lorsqu'un objet avance très vite dans l'eau, la pression diminue tout autour de lui. À des vitesses de l'ordre de 180 kilomètres par heure, la pression diminue suffisamment pour que l'eau se dissocie en vapeur, formant une bulle géante de gaz derrière l'objet : c'est le phénomène de cavitation. La supercavitation se produit quand l'engin est totalement emprisonné dans

cette bulle de gaz. Certaines torpilles, tel le *Squale*, créent une supercavité ellipsoïdale (*en bas*). Sur la modélisation (*en haut*), l'eau est rouge et la vapeur bleue ; l'écoulement va de la droite vers la gauche. Sur ce modèle, on observe une cavitation partielle et un décollement de la cavité provoqué par la remontée à contre-courant le long de la surface de l'objet d'un film de liquide ; il y a décollement quand ce film atteint l'avant de l'objet.

coques hydrodynamiques et de puissants moteurs. La supercavitation est un moyen de réduire les frottements de l'eau en enveloppant l'objet immergé d'une bulle de gaz de faible densité.

Quand un fluide se déplace rapidement autour d'un objet, sa pression diminue en certains endroits, notamment sur les coins et les arêtes de l'objet. Quand la vitesse augmente, la pression de l'écoulement atteint la pression de vapeur saturante de l'eau et le fluide subit un changement de phase : l'eau se transforme en vapeur d'eau. En d'autres termes, quand la pression est trop faible pour assurer leur cohésion, les molécules d'eau liquide se dispersent pour passer à l'état de gaz. C'est le phénomène de cavitation. Pour les navires, la cavitation est un fléau. Elle crée autour du navire des tourbillons qui perturbent l'écoulement de l'eau et le fonctionnement des pompes, des turbines, des hélices et des hydrofoils (les bateaux à flotteurs immergés qui se soulèvent avec la vitesse). La cavitation engendre également, lorsque les bulles de gaz disparaissent (dans un liquide les bulles de gaz n'éclatent pas comme des bulles de savon dans l'air, mais s'effondrent sur elles-mêmes), de violentes ondes de choc qui déforment et érodent les coques.

La supercavitation est une cavitation extrême, où une seule bulle entoure l'objet en mouvement tout entier. À des vitesses supérieures à 180 kilomètres par heure, les cavitateurs à pointe arrondie et les systèmes d'injection de gaz placés à l'avant de l'objet produisent de telles poches de gaz à basse densité, les supercavités. Quand l'objet est allongé et a un axe de symétrie, la supercavité a une forme d'ellipsoïde à l'avant et est plus effilée vers l'arrière ; sa longueur dépend de la vitesse. La cavité ellipsoïdale se referme sous l'effet de la pression ambiante dans une zone caractérisée par un écoulement complexe et instable. On modélise difficilement le flux dans cette région turbulente et même dans l'ensemble de la cavité, car la pression n'y est pas constante. Quoi qu'il en soit, tant que l'eau ne touche que le cavitateur, les engins à supercavitation filent à l'intérieur d'une bulle de gaz en subissant un frottement minime de la part du liquide.

La marine américaine s'est intéressée à la supercavitation au

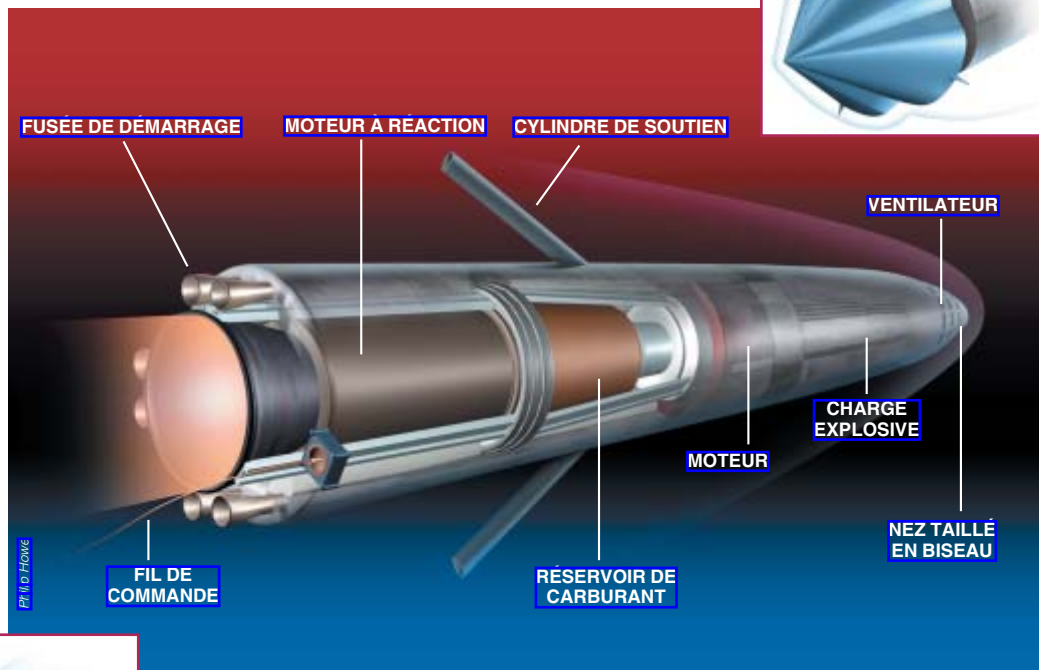
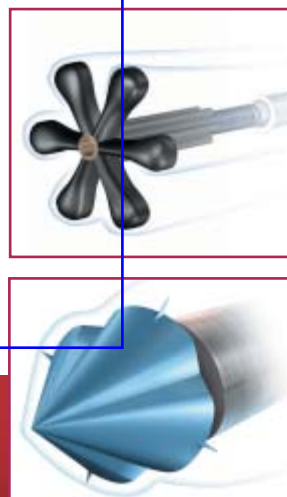
début des années 1950 pour le développement d'hélices à grande vitesse et d'hydrofoils, puis s'est tournée vers d'autres techniques plus silencieuses, préférant les navires furtifs aux navires ultrarapides. Aujourd'hui, elle ne disposerait d'aucune arme à supercavitation, et tente de rattraper l'avance prise par la marine russe en matière de projectiles et de torpilles.

Le système RAMICS, un système de déminage aéroporté, est une arme hélicoptée capable de détruire les mines de surface ou proches de la surface avec des balles à supercavitation. Les projectiles expérimentaux, d'un diamètre de 20 millimètres, sont conçus pour avoir une trajectoire stable à la fois dans l'air et dans l'eau ; ils sont tirés par un canon à tir rapide équipé d'un système de visée perfectionné. La marine américaine envisage de placer sur le pont des navires des armes adaptées de type RAMICS pour détruire les torpilles qui se camouflent dans le sillage des bâtiments.

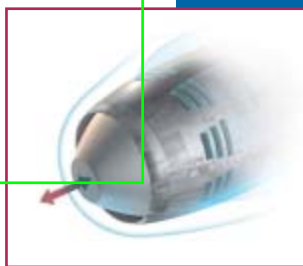
La prochaine arme tirant des projectiles à supercavitation sera un système entièrement sous-marin, l'AHSUM, des munitions sous-marines se propageant à grande vitesse et adaptables. Les balles seront tirées par des tourelles profilées, placées sur la coque

immergée de sous-marins, de navires de surface ou de radeaux antimines remorqués. La version du système AHSUM commandé par sonar devrait être l'équivalent sous-marin du système d'armes *Phalanx*, un canon à tir rapide et à pilotage radar qui assure la protection des vaisseaux de surface contre les missiles de croisière.

Une torpille pouvant atteindre 370 kilomètres par heure est également à l'étude. Ce type de torpille pose des difficultés techniques quant à son lancement, son comportement hydrodynamique et acoustique, son guidage et sa commande, et finalement sa propulsion. Pour simuler les écoulements de l'eau autour d'une torpille, on doit considérer un régime d'écoulement à deux phases, où coexistent l'eau et le gaz. On cherche à comprendre comment l'eau s'écoule, à quoi ressemble la cavité de gaz, et à s'assurer que la torpille reste bien tout le temps à l'intérieur de la cavité. Si jamais la cavité est perturbée, la surface au contact de l'eau augmente et la vitesse diminue d'un seul coup.



2. LA TORPILLE RUSSE *SQUALE* présente, à la proue, un avant taillé en biseau qui crée une cavité partielle de gaz. Des ventilateurs montés à l'avant injectent des gaz dans cette cavité, de sorte qu'elle s'agrandit et finit par envelopper entièrement la torpille. De petites fusées de démarrage accélèrent la torpille jusqu'à la formation de la cavité partielle ; le moteur de fusée central prend ensuite le relais. D'autres formes de cavitateurs (la partie avant) sont à l'étude : des disques plats, des cônes plans ou crénelés (en haut et au milieu). D'autres cavitateurs pourraient ressembler à des cônes qui ressortiraient plus ou moins du fuselage, telle la pointe rétractable d'un stylo à bille (à gauche).

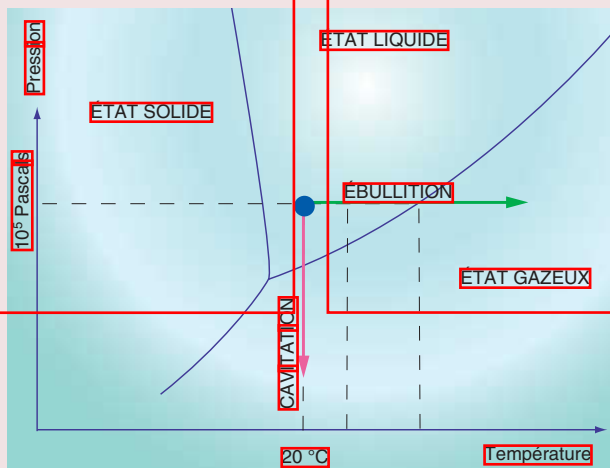


La supercavitation dans les écoulements

Sous la pression atmosphérique, l'eau bout à 100 °C. Les alpinistes savent qu'à une pression inférieure correspond une température d'ébullition plus basse. Ils utilisent ce principe pour déterminer leur altitude : ils mesurent la température d'ébullition de l'eau dans une casserole et en déduisent la pression, puis l'altitude. Sur un diagramme de phases de l'eau, où l'on indique l'état de l'eau en fonction de sa température et de sa pression, les points où a lieu l'ébullition définissent la courbe de vaporisation, frontière entre l'état liquide et l'état vapeur. Lors d'un phénomène d'ébullition, on chauffe l'eau à pression constante : on traverse la courbe de vaporisation suivant un chemin horizontal.

Au contraire, la cavitation représente la traversée de la courbe de vaporisation selon un chemin vertical : on diminue la pression à température constante. Cette «traversée» se traduit par la formation de bulles ou plus généralement de «cavités» dont la forme n'est pas nécessairement sphérique et qui renferment principalement de la vapeur d'eau. À la température ambiante (27 °C), le phénomène se produit à une pression 40 fois inférieure à la pression atmosphérique. Cette pression est parfois atteinte dans des écoulements rapides.

Pourquoi un liquide en écoulement présente-t-il des dépressions ? Prenons l'exemple d'un écoulement dans un tube resserré. Au cours de l'écoulement, la vitesse du liquide (peu compressible) varie pour conserver le débit. Elle augmente dans la partie convergente du tube et diminue dans la partie divergente.



Considérons un volume d'eau (en bleu), dans les conditions normales de température (20 °C) et de pression (1 atmosphère). Quand on augmente sa température à pression constante il se produit une ébullition (en vert) ; quand on diminue sa pression à température constante, il se produit un phénomène de cavitation (en rose).

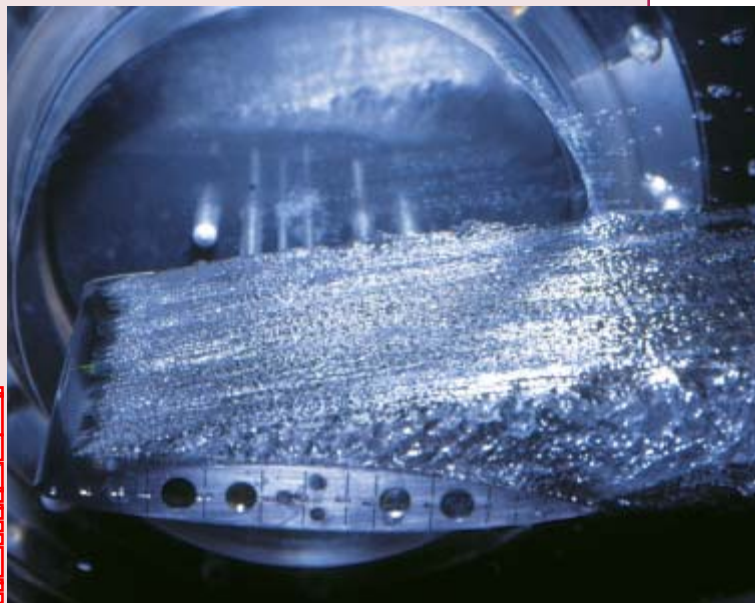
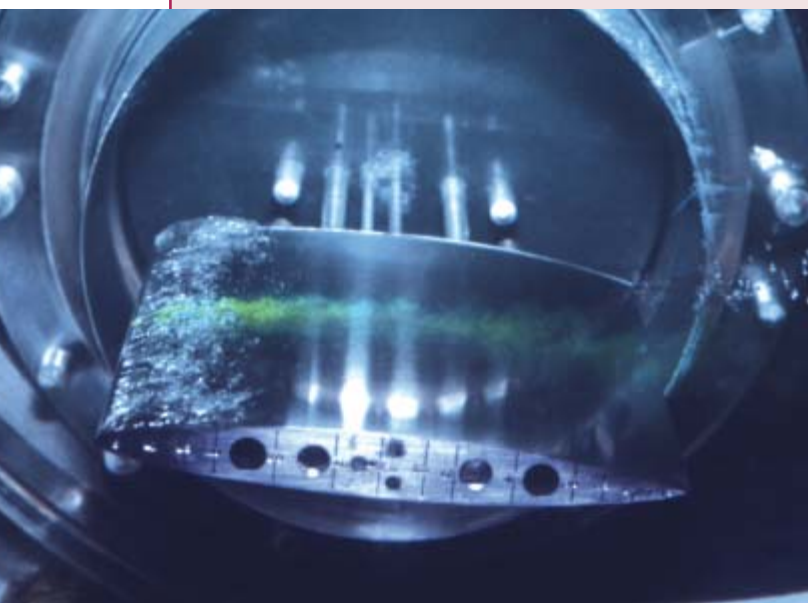
Elle est maximale en amont du col, à l'endroit où la section est minimale.

D'après le théorème de Bernoulli de la mécanique des fluides, l'énergie totale d'une particule de liquide se conserve au cours de l'écoulement. L'énergie totale est la résultante de l'énergie cinétique de l'écoulement, proportionnelle au carré de sa vitesse, et de l'énergie due à l'agitation des molécules laquelle engendre la pression. Toute variation de l'une est compensée par une variation de l'autre. Au col, la vitesse étant maximale, la pression est minimale, car une partie de l'énergie de pression est convertie en énergie cinétique.

Quand la pression au col est égale à la pression de vaporisation qui, nous l'avons vu, définit le seuil de cavitation, des bulles de gaz apparaissent. Le mouvement à grande vitesse d'un objet dans un liquide s'accompagne des mêmes phénomènes physiques. Les molécules d'eau, qui sont contraintes de contourner l'objet, subissent des accélérations notables auxquelles sont associées des dépressions. Celles-ci sont d'autant plus importantes que la vitesse est grande : le mouvement à grande vitesse d'un corps dans un liquide s'accompagne de cavitation.

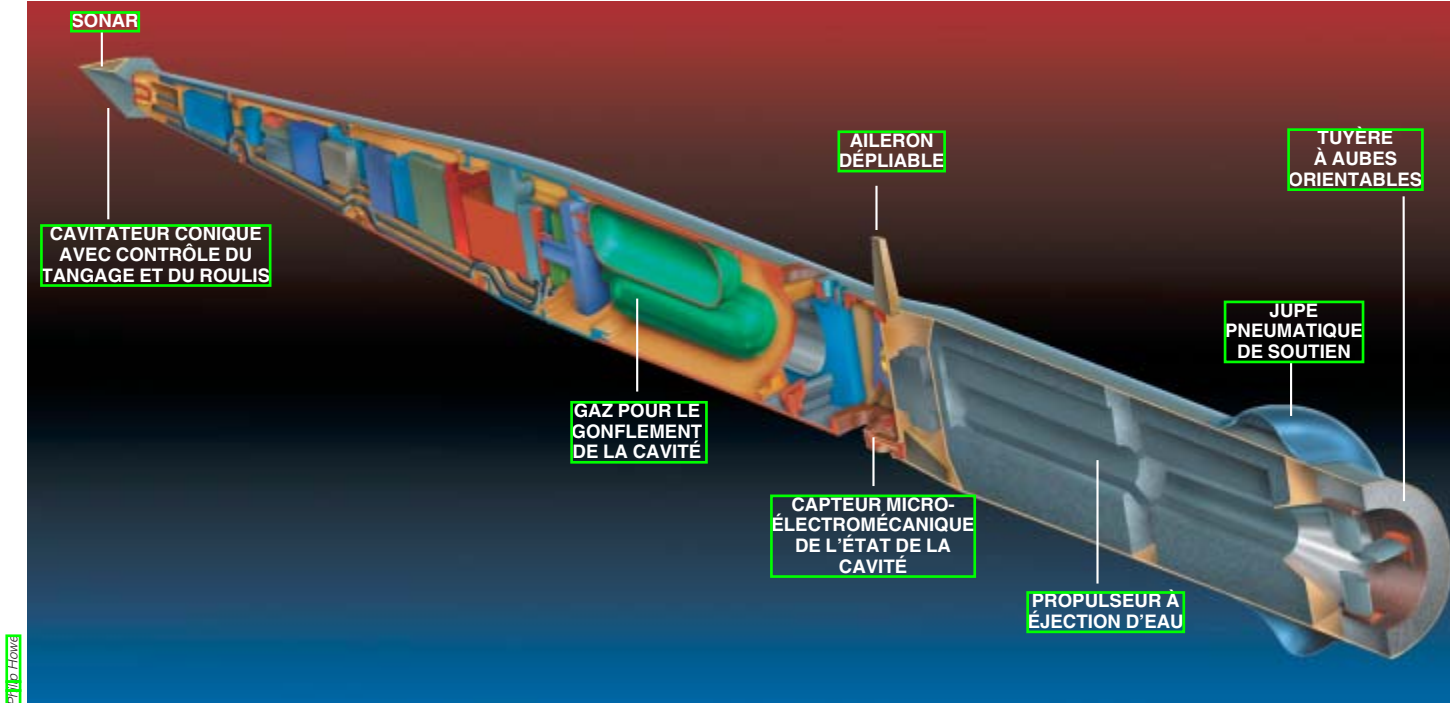
Les bulles de gaz formées par cavitation grossissent avec la vitesse. Pour des vitesses suffisamment élevées, elles ne forment plus qu'une unique cavité qui entoure tout l'objet. C'est la supercavitation.

Jean-Pierre FRANC, Grenoble
Laboratoire des écoulements
géophysiques et industriels



Cavitation naissante sur un profil placé dans un tunnel hydrodynamique. Le profil est fixe et l'écoulement de l'eau se fait de gauche à droite. Aux très grandes vitesses, le phénomène de la cavitation est si important que la cavité peut être bien plus longue que

l'engin qui l'engendre. On parle alors de supercavitation. La photo de gauche montre l'apparition, à faible vitesse, des premières bulles de vapeur. Sur la photo de droite, à plus grande vitesse, les bulles de gaz fusionnent et ne forment plus qu'une unique cavité.



3. UNE TORPILLE A SUPERCAVITATION, fondée sur les études de la marine américaine, comporterait toute une gamme de techniques de pointe : des systèmes de détection, de commande et de propulsion, ainsi qu'un cavitateur conique.

Le missile sous-marin russe *Squale* est le meilleur représentant des dispositifs à supercavitation de première génération. Il mesure huit mètres de longueur, pèse 2 700 kilogrammes environ, et a été conçu à l'Institut ukrainien d'hydromécanique de Kiev, où la plupart des principes des armes à supercavitation ont été élaborés.

L'arme est constituée d'une coque cylindrique effilée à l'avant (voir la figure 2), là même où est située l'ogive ; un moteur de fusée est localisé à l'arrière, d'où dépasse la tuyère. Huit petits cylindres sont disposés autour de la tuyère ; ce sont, apparemment, de petites fusées de démarrage qui accélèrent le *Squale* jusqu'à la vitesse de supercavitation. Niché entre deux de ces cylindres, une bobine de fil de guidage se déroulerait à mesure que la torpille avance dans l'eau. Ce fil permettrait aux opérateurs de contrôler la détonation de l'ogive.

À l'avant du *Squale*, le nez ferait office de cavitateur. On l'imagine plat, de forme circulaire ou elliptique. C'est la partie la plus importante puisqu'elle crée la cavité de gaz où se meut l'engin. Taillé en biseau, le cavitateur engendre également la force de portance qui soutient la partie avant de l'engin. Pour que la frontière entre l'eau et le gaz soit la moins turbulente possible, le bord du cavitateur doit être tranchant. Juste derrière le cavitateur, plusieurs conduits de ventilation de forme circulaire injectent les gaz d'échappement de la fusée et de la vapeur dans la bulle de cavitation, afin de l'agrandir. Aux deux tiers

environ de la longueur, vers l'arrière, quatre cylindres inclinés vers l'arrière sont fixés au fuselage par l'intermédiaire de ressorts. Ces cylindres, qui ressemblent à des ailerons, soutiennent la partie arrière de la torpille en la faisant rebondir sur la surface interne de la cavité. L'avant étant fixe et l'arrière ricochant sur la paroi interne, le *Squale* subirait alors un lent mouvement de précession autour de la circonférence de la cavité, tandis que la torpille se fraie un chemin dans l'eau.

Le *Squale* est un peu rudimentaire, car il ne peut se propager qu'en ligne droite. Les prochains engins à supercavitation seront manœuvrables : ils pourront changer de direction grâce à des dispositifs de commande de mouvement (actionneurs), tels que des jets de gaz ou ailerons qui perceraient la paroi de la cavité. La principale difficulté consiste à maintenir l'engin à l'intérieur de la cavité pendant les virages, pour éviter le choc avec le mur d'eau qui le désintégrerait. Peut-être les véhicules à supercavitation seront-ils manipulables avec des actionneurs correctement coordonnés : en déformant la cavité d'un côté, à l'aide d'un nez cavitateur articulé ou d'actionneurs, on créerait une force latérale qui déplacerait l'engin dans la cavité. On pourrait y parvenir à condition de coordonner les mouvements de l'avant et de l'arrière de la torpille.

On résoudrait une partie de ces problèmes en installant une boucle de contrôle en temps réel qui prendrait en compte les conditions de la cavité à l'ar-

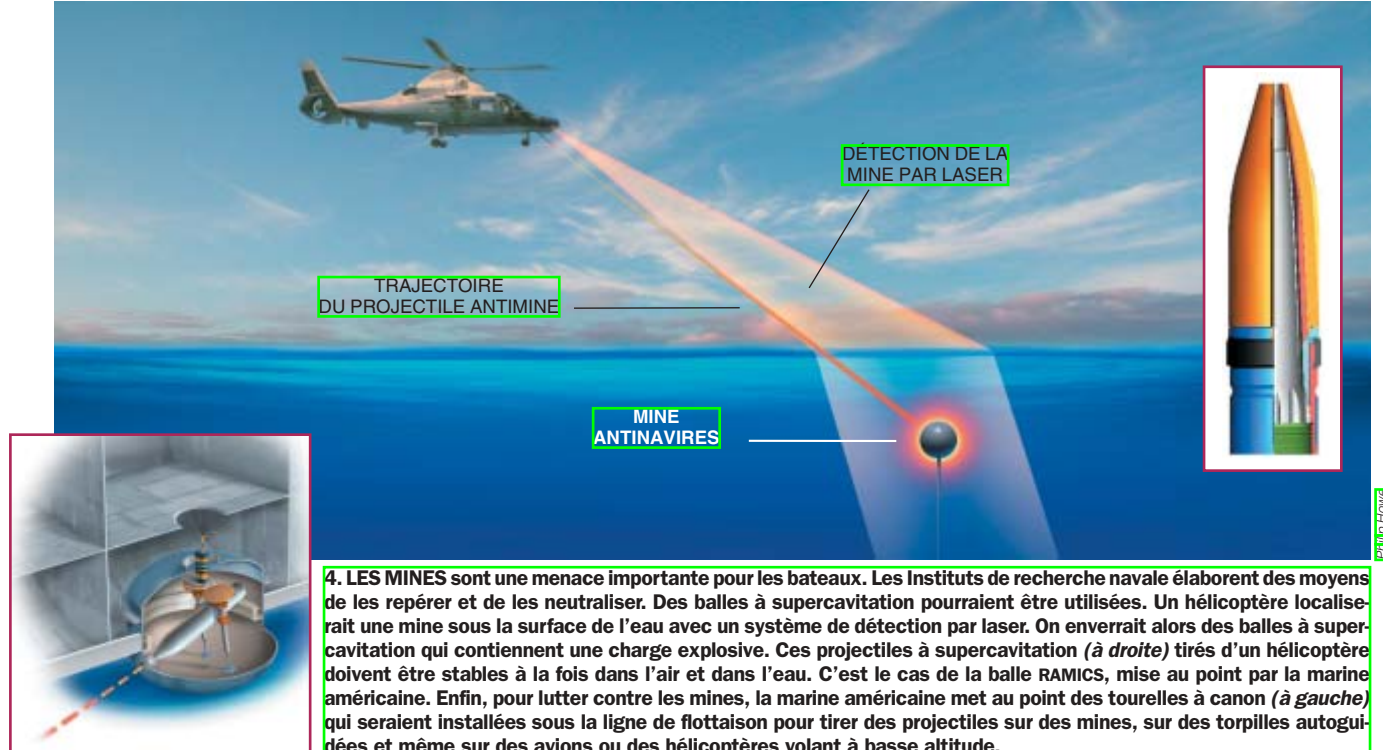
rière de l'engin et imposerait les corrections appropriées. Les engins à supercavitation se déplaçant à l'intérieur de bulles, uniquement soutenus par le gaz à faible densité, leur partie arrière cogne fréquemment contre les parois de la cavité. Ce phénomène de battement de queue est observé sur toutes les photographies prises lors des essais à grande vitesse des dispositifs à supercavitation.

Dans les futurs engins, le passage d'un régime normal avec frottements à un régime de supercavitation sera facilité par une soufflerie qui assurera la présence continue d'une cavité partielle laquelle pourra être agrandie à volonté durant les phases d'accélération. Ainsi, une petite cavité naturelle formée au niveau de l'avant à faible vitesse sera transformée en une cavité enveloppant l'ensemble de l'objet.

Des systèmes de propulsion d'avant-garde

Pour conférer la poussée nécessaire à la propulsion des engins à supercavitation, on a généralement recours à des moteurs de fusée, mais ils ne sont pas parfaits : ils ont une portée limitée et leurs performances diminuent à mesure que la profondeur et, par conséquent, la pression augmentent.

L'autonomie d'une torpille à supercavitation propulsée par un moteur à combustible solide n'est que de quelques dizaines de kilomètres avec une vitesse de pointe de l'ordre de 700 kilomètres par heure. Les essais des systèmes de propulsion fondés sur le principe des



4. LES MINES sont une menace importante pour les bateaux. Les Instituts de recherche navale élaborent des moyens de les repérer et de les neutraliser. Des balles à supercavitation pourraient être utilisées. Un hélicoptère localiserait une mine sous la surface de l'eau avec un système de détection par laser. On enverrait alors des balles à supercavitation qui contiennent une charge explosive. Ces projectiles à supercavitation (à droite) tirés d'un hélicoptère doivent être stables à la fois dans l'air et dans l'eau. C'est le cas de la balle RAMICS, mise au point par la marine américaine. Enfin, pour lutter contre les mines, la marine américaine met au point des tourelles à canon (à gauche) qui seraient installées sous la ligne de flottaison pour tirer des projectiles sur des mines, sur des torpilles autoguidées et même sur des avions ou des hélicoptères volant à basse altitude.

moteurs diesel, des moteurs électriques, des centrales atomiques et des turbines à gaz ont révélé que seules les turbines à gaz à haut rendement et les dispositifs de propulsion par réaction brûlant des combustibles métalliques (aluminium, magnésium ou lithium) et utilisant l'eau environnante à la fois comme oxydant du combustible et comme réfrigérant des produits de combustion ont la puissance suffisante pour propulser des engins à supercavitation à grande vitesse.

L'aluminium, assez bon marché, est le plus efficace de ces combustibles métalliques. La température de réaction atteint 10 600 °C. Dans un des projets de moteur envisagés, on utiliserait la chaleur de la chambre de combustion pour faire fondre des feuilles d'aluminium à 675 °C et pour vaporiser de l'eau de mer. Les produits de combustion feraient tourner les aubes d'une turbine.

Les Russes semblent disposer déjà d'un tel dispositif. Aux États-Unis, les physiciens du Laboratoire de recherches appliquées de Pennsylvanie testent un type de réacteur particulier, un statoréacteur à eau, qui brûle de l'aluminium et est utilisé comme générateur d'appoint sur les navires de surface. On introduit de l'aluminium en poudre dans un tourbillon d'eau de mer engendré dans une «chambre de combustion à tourbillons» ; sous l'effet de ces tourbillons, les particules d'aluminium se frottent les unes sur les autres, broyant le film d'oxyde d'aluminium inerte qui les recouvre ; une réaction exothermique intense se déclenche tandis que l'aluminium s'oxyde ; la vapeur à haute pres-

sion qui résulte de cette combustion propulse le navire soit en se détendant dans une tuyère de fusée, soit en entraînant l'aube d'une turbine.

Les tests montrent que la poussée obtenue par ce type de turbine est 20 pour cent supérieure à celle des moteurs de fusée. Un propulseur pour dispositifs à supercavitation constitué de deux hélices tournant en sens contraire et suffisamment longues pour atteindre la frontière entre le gaz et l'eau est en cours d'évaluation.

Quel que soit l'avenir réservé aux armes à supercavitation, elles ont déjà une influence telle que les militaires réévaluent les stratégies navales.

Nouvelles armes, nouvelles menaces

Après la découverte de l'existence du *Squale*, un débat sur son utilisation possible a rapidement suivi. Selon certaines sources de renseignements occidentales, il aurait été conçu pour permettre aux sous-marins diesel de l'ancienne Union soviétique, vieux et bruyants, de riposter en cas d'attaque par des sous-marins américains silencieux. Si une torpille classique était lancée contre un sous-marin diesel, le *Squale* serait lancé soit pour couper le fil de guidage de la torpille, soit pour détruire l'attaquant lui-même ; le *Squale* serait un «tueur de sous-marins» potentiel, surtout s'il était équipé d'une ogive tactique nucléaire.

Ce missile pourrait aussi être une arme destinée à faire exploser une charge nucléaire de plus forte puis-

sance au milieu d'une flottille aéronavale ennemie. Nul ne dispose de contre-mesure contre une telle arme.

Récemment, pour renflouer les caisses de l'État, la Russie a mis en vente le *Squale* lors de salons internationaux de vente d'armes à Abu Dhabi et à Athènes. Plusieurs *Squale* auraient été vendus à l'Iran.

Un rapport datant de 1998 affirmait que le Kazakhstan aurait vendu une quarantaine de torpilles *Squale* à la Chine, ce qui inquiète les Américains : en cas de conflit dans le détroit de Taïwan, leurs forces navales risqueraient d'être menacées par Beijing. Selon une information d'origine chinoise (qui aurait été confirmée de source américaine), un officier de la marine chinoise se trouvait à bord du *Koursk K-141* lors de son naufrage. Il était venu assister aux essais d'une nouvelle version du *Squale*, de portée supérieure. La fin de la Guerre froide ne semble pas avoir mis fin à la course aux armements. La tempête fait rage autour du *Squale*.

Steven ASHLEY est rédacteur à la revue *Scientific American*.

J.P. FRANC et al., *La cavitation : mécanismes physiques et aspects industriels*, Collection Grenoble Sciences, Presses Universitaires de Grenoble, 81 pages, 1995.

La cavitation : le défi, film coproduit par Électricité de France, la Délégation Générale pour l'Armement, le Service du film de recherche scientifique, distribué par le Service du film de recherche scientifique, 96 boulevard Raspail, 75272 Paris Cedex 06.

Le cervelet

CHRISTIAN DARLOT

Indispensable à la coordination des mouvements et à l'équilibre, le cervelet est aujourd'hui la partie du système nerveux dont on connaît le mieux le fonctionnement, aussi bien à l'échelle de l'organe qu'à l'échelle moléculaire.

Le système nerveux central des vertébrés est formé de plusieurs parties alignées : les hémisphères cérébraux, le bulbe rachidien, le tronc cérébral, la moelle épinière. Le cervelet est placé dorsalement à cet axe. Au cours de l'évolution, cet organe apparaît chez les poissons et se développe chez les vertébrés terrestres, tels les amphibiens, les reptiles, les oiseaux et les mammifères. Pour se déplacer, les animaux qui ne sont pas soutenus par la poussée d'Archimède doivent coordonner les mouvements de leurs membres. Volumineux chez les primates, le cervelet contrôle avec le cortex cérébral les contractions musculaires, et participe peut-être même à la pensée.

Bien qu'il n'occupe que dix pour cent du volume total du cerveau, le cervelet contient environ la moitié du total des neurones, soit une centaine de milliards. Depuis le début du XIX^e siècle, l'observation clinique et l'expérimentation ont montré que le cervelet est indispensable pour effectuer tous les gestes précis et rapides qui mettent en jeu plusieurs muscles et une ou plusieurs articulations. Pour commander un mouvement (voir la figure 3) volontaire, un signal moteur, par exemple émis par une aire motrice du cortex cérébral, excite les neurones moteurs, nommés motoneurones, de la moelle épinière qui innervent un muscle.

En revanche, un mouvement involontaire, ou réflexe, est déclenché par une stimulation, par exemple une piqûre, transmise par un nerf sensoriel à la moelle épinière, qui envoie en retour un signal moteur qui suscite le mouvement adapté. Volontaires ou réflexes, les mouvements coordonnés sont ajustés par le cervelet, qui anticipe le résultat des ordres moteurs. Il participe aussi à la préparation des mouvements complexes en les

simulant avant qu'ils ne soient lancés. On découvre aussi qu'il participe à des fonctions cognitives d'anticipation, voire d'imagination, propres à l'être humain.

Un muscle ne peut que tirer : les mouvements de chaque articulation dépendent donc de la contraction d'au moins deux muscles, dits antagonistes, qui tirent en sens opposés. Par exemple, la contraction du biceps plie le coude, alors que celle du triceps le tend. Pendant que l'un se contracte, l'autre se détend. Ces muscles doivent être coordonnés au cours du mouvement.

Pour saisir un objet, les muscles du bras, de l'avant-bras et de la main doivent être contractés puis décontractés en un temps très court et de façon coordonnée. Or, pendant de tels mouvements brefs, les messages sensoriels n'ont pas le temps d'atteindre le cerveau et d'y être traités avant la fin du mouvement.

Pendant une course, les informations sur les positions angulaires, la

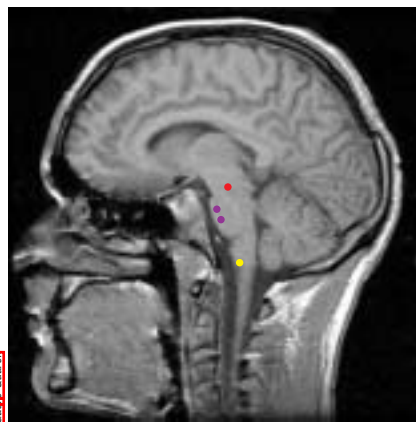
tension, la longueur et la vitesse d'allongement des muscles, notamment, sont envoyées jusqu'au cerveau. Cependant, le pied parcourt jusqu'à 10 centimètres pendant les 20 millisecondes du trajet des signaux. C'est là que le cervelet intervient.

Il ne déclenche pas lui-même de mouvement, mais reçoit à la fois des copies des signaux nerveux moteurs qui codent le mouvement voulu et des signaux sensoriels qui indiquent l'état du corps 20 à 200 millisecondes plus tôt. Le cervelet traite ces informations, déjà périmées, en continu et envoie des signaux qui ajustent les ordres moteurs, volontaires ou réflexes, de façon à les adapter, au cours même du mouvement, à l'état du corps.

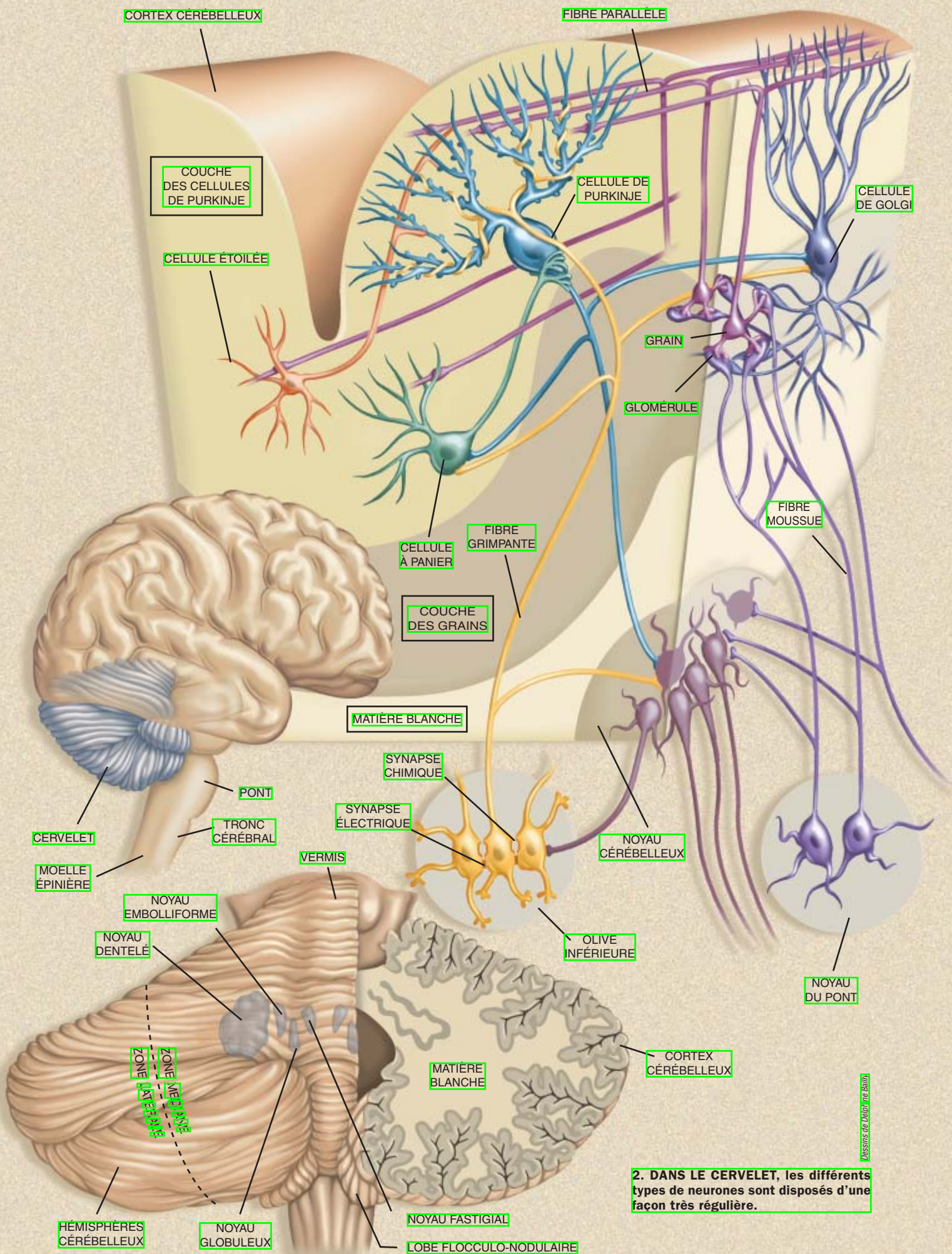
Le cervelet participe aussi au maintien de l'équilibre et à l'ajustement des réflexes qui contrecarrent les perturbations des mouvements dues à une cause extérieure, tel un choc sur le bras.

Le cervelet est sans doute la partie du système nerveux la mieux connue et celle qui montre le mieux comment une organisation assure une fonction. La chaîne d'événements qui lie les réactions biochimiques, la plasticité fonctionnelle et le comportement de l'organisme est de mieux en mieux connue.

Regardons cet organe par grossissements successifs : de son aspect extérieur jusqu'à son fonctionnement moléculaire, nous examinerons son anatomie macroscopique, ses différents types de neurones et leurs connexions, et les propriétés de quelques protéines. À chaque grossissement, nous détaillerons ce que la structure et les propriétés observées révèlent du fonctionnement de l'organe et comment grâce à elles, finalement, le cervelet anticipe l'avenir.



1. CETTE IMAGE obtenue par résonance magnétique montre le système nerveux central : la moelle épinière, le bulbe rachidien, le tronc cérébral, le pont, le thalamus, les hémisphères cérébraux et le cervelet. On a marqué les noyaux du pont (en violet), le noyau rouge (en rouge) et l'olive inférieure dans le tronc cérébral (en jaune).



Une architecture précise

Un neurone (*voir la figure 4*) est une cellule composée d'un corps cellulaire, qui contient le noyau et les organites, et de ramifications de deux types : les dendrites, nombreuses, et un axone unique, parfois ramifié et souvent entouré d'une gaine de myéline. Cette gaine, blanche, autorise une transmission rapide des signaux. Les quantités d'ions chargés électriquement, notamment les ions sodium, potassium et calcium, ne sont pas identiques à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule. Une différence de potentiel (d'environ -70 millivolts) existe entre les deux faces de la membrane du neurone.

Lorsqu'un neurone est actif, des protéines qui forment des canaux laissent

passer, localement, les ions (surtout les ions sodium et les ions potassium) d'un côté à l'autre de la membrane, jusqu'à inverser les charges électriques. Cette dépolarisation transitoire, nommée potentiel d'action simple, se propage le long de l'axone. L'information transmise par le neurone est codée par la fréquence de ces potentiels d'action.

Le plus souvent, les informations parviennent au neurone par les dendrites, puis atteignent le corps cellulaire où les diverses informations reçues sont combinées et traitées pour créer un signal. Ce dernier parcourt ensuite l'axone jusqu'à ses extrémités où il est transmis, via des synapses, aux dendrites d'autres neurones.

En coupe (*voir la figure 2*), le cervelet montre deux régions de matière

grise composées des corps cellulaires et des dendrites de neurones : l'une à la surface, nommée cortex cérébelleux, l'autre profonde, constituée de plusieurs groupes de neurones voisins, nommés noyaux cérébelleux. Le mot «noyau» désigne ici un groupe de neurones voisins, souvent reliés, dont la plupart participent à la même fonction.

Ces deux régions sont séparées par une couche intermédiaire de matière blanche formée par les axones myélinisés de neurones du cortex (les cellules de Purkinje) qui atteignent les noyaux cérébelleux. Chaque région du cortex est connectée à une région précise des noyaux cérébelleux : ces deux régions reçoivent les mêmes signaux et forment une unité fonctionnelle. Outre cette disposition en profondeur,

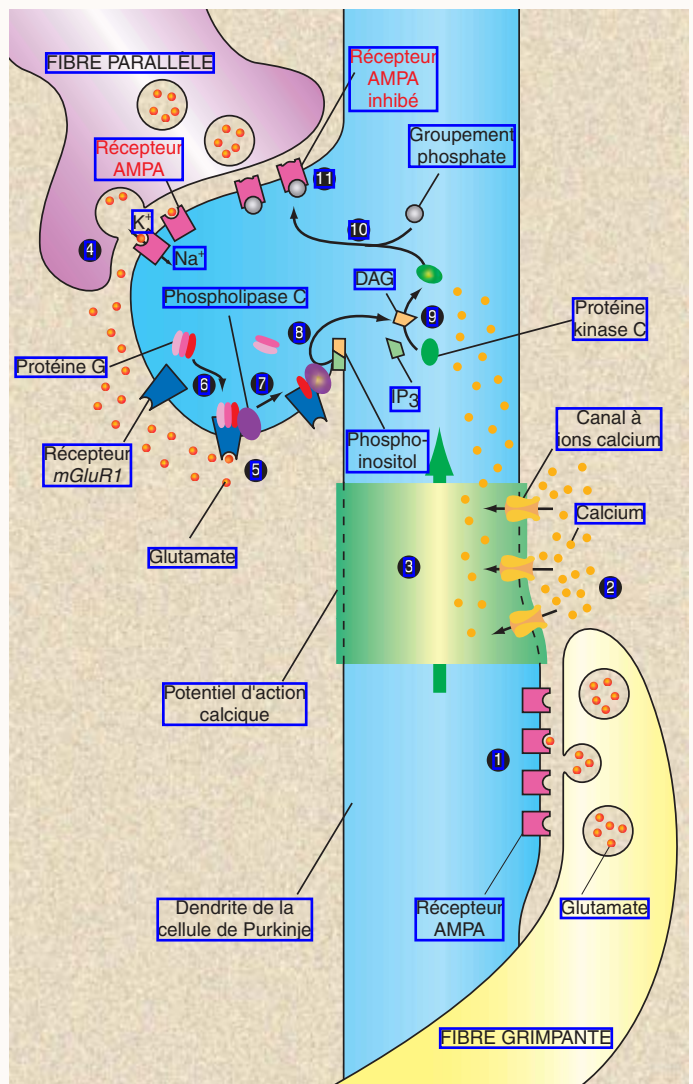
La dépression à long terme

l'apprentissage moteur se traduit dans les cellules de Purkinje par la dépression à long terme. Celle-ci diminue la transmission synaptique entre les fibres parallèles et les cellules de Purkinje : elle résulte de la fixation d'un radical phosphate sur les récepteurs canaux AMPA. Cette phosphorylation réduit l'affinité de ces protéines pour le neurotransmetteur, le glutamate. Elle a lieu quand augmentent simultanément les concentrations cytoplasmiques en diacylglycérol et en ion calcium.

La libération de glutamate (1) par la fibre grimpante ouvre les canaux à calcium de la cellule de Purkinje (2) et déclenche un potentiel d'action à calcium (3). À mesure qu'il se propage, des ions calcium entrent dans la cellule par des canaux.

La concentration en diacylglycérol augmente quand est activé un autre type de récepteur du glutamate, le récepteur *mGluR1*, différent du récepteur AMPA. Cette augmentation résulte de l'activité des fibres parallèles qui libèrent le neurotransmetteur, le glutamate (4). Ces molécules se fixent aux récepteurs *mGluR1*. Ces récepteurs sont des protéines membranaires qui ne sont pas des canaux, mais qui ont une extrémité extracellulaire, du côté synaptique, et une autre intracellulaire, dans le cytoplasme. Quand une molécule de glutamate se lie du côté synaptique (5), le récepteur change de conformation et acquiert, à l'intérieur, une affinité pour une protéine G. Cette protéine se lie alors au récepteur *mGluR1* (6), puis se scinde en deux parties, dont l'une active (7) l'enzyme, nommée phospholipase C, qui hydrolyse (8) une molécule lipidique de la membrane, le phospho-inositol, en une molécule de diacylglycérol et une d'inositol triphosphate.

En présence d'ions calcium, le diacylglycérol active (9) la protéine kinase C, qui fixe (10) un groupement phosphate au récepteur AMPA, dont l'affinité pour le glutamate est ainsi réduite (11). Quant à l'inositol triphosphate, il entraîne une sortie d'ions calcium du réticulum endoplasmique, où ils sont d'ordinaire en réserve. Toutefois, cet effet est faible : la concentration cytoplasmique en ions calcium augmente surtout quand une entrée massive est provoquée par un potentiel d'action à calcium, dû à l'activité des fibres grimpantes.



une organisation à deux dimensions est apparente à la surface du cortex, selon deux directions à angle droit, à la façon d'un tableau à double entrée : des plis transverses très apparents, perpendiculaires à l'axe du corps, et des bandes longitudinales, fonctionnelles, mais non apparentes anatomiquement, parallèles à cet axe (voir la figure 2).

À l'instar du cortex cérébral, les plis de la surface du cervelet augmentent la surface de tissu nerveux pour un petit volume, et donc le nombre de neurones. Chez les mammifères, le cervelet présente de nombreux folioles délimités par des petits plis, réunis en dix lobules délimités par des plis plus marqués qui, eux-mêmes, forment trois lobes séparés par des plis profonds, les scissures. Chaque lobe (les lignes du tableau) est caractérisé par la nature des principales informations sensorielles qui lui parviennent. Le lobe flocculo-nodulaire, le plus postérieur, reçoit surtout des messages issus des organes de l'équilibre, telle l'oreille interne. Le lobe antérieur reçoit surtout des messages proprioceptifs, c'est-à-dire des informations qui renseignent sur la tension et l'allongement des muscles. Entre les deux, le lobe postérieur reçoit de nombreux messages visuels qui informent sur la position et le déplacement des objets et des membres situés dans le champ visuel.

À l'inverse du cortex cérébral, des régions voisines du cervelet peuvent recevoir des informations issues de parties distantes de l'organisme, tandis que des régions distantes du cortex cérébelleux peuvent recevoir des informations de la même partie de l'organisme.

L'organisation en plis est complétée par une disposition en bandes (les colonnes du tableau) orientées parallèlement au plan de symétrie du corps : le vermis, central, et les hémisphères cérébelleux latéraux. Du plan de symétrie vers le côté, les bandes commandent successivement la posture du tronc, les mouvements des membres et de la main et, enfin, la préparation motrice.

De chaque côté du plan de symétrie du corps sont disposés trois noyaux cérébelleux, chacun en dessous d'une des bandes parallèles du cortex cérébelleux, et chaque bande atteint, via des axones, le noyau situé en dessous. On dit que chaque bande se projette sur un noyau.

Les noyaux cérébelleux forment l'étage de sortie du cervelet et envoient des axones, dits descendants, vers les régions motrices du tronc cérébral et de

la moelle épinière, et des axones ascendants vers le thalamus et le cortex cérébral. Les ordres moteurs élaborés par le cervelet sont envoyés vers les motoneurones, tandis qu'une copie en est envoyée vers les aires motrices où les mouvements sont préparés.

La partie centrale du cortex cérébelleux, le vermis, ainsi nommé à cause de son apparence de ver annelé, s'étend sur les trois lobes et se projette sur les deux noyaux les plus proches du plan de symétrie, les noyaux fastigiaux. Ces régions règlent la posture du corps dans le champ de gravité. Le lobe flocculo-nodulaire se projette sur les noyaux vestibulaires du tronc cérébral, qui traitent les informations de l'oreille interne. L'ensemble de ces régions assure l'équilibre du corps.

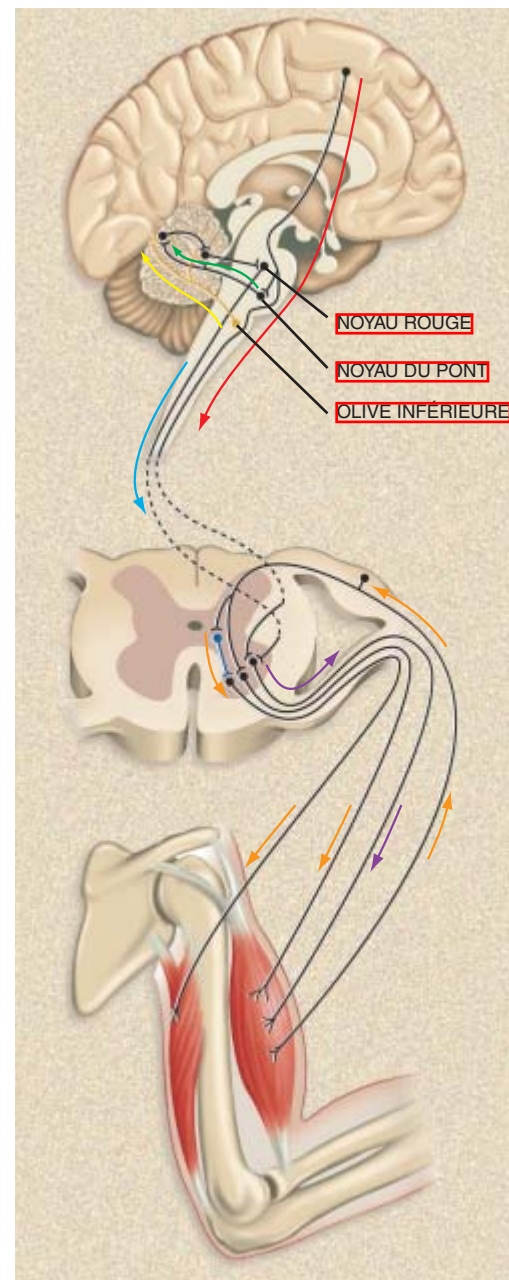
Les hémisphères cérébelleux sont composés de deux parties fonctionnellement distinctes. La partie intermédiaire, la plus médiane, s'étend sur les lobes antérieur et postérieur, et se projette sur les noyaux globuleux et emboliformes. Ceux-ci se projettent sur des régions de commande des muscles des membres, en particulier le noyau rouge, dont les signaux moteurs atteignent les motoneurones. Importante chez les mammifères non primates, cette voie de commande motrice a régressé chez les primates à mesure du développement des fonctions motrices du cortex cérébral.

La partie latérale des hémisphères, une expansion du lobe postérieur, est très développée chez les primates. Elle reçoit surtout des signaux issus du cortex cérébral moteur, et se projette sur le noyau cérébelleux le plus latéral et le plus volumineux, le noyau dentelé, qui n'envoie des messages que vers des aires du cortex cérébral moteur, via plusieurs noyaux du tronc cérébral et du thalamus. Cette boucle, qui part du cortex cérébral et y revient, participe à la préparation des gestes complexes avant de les exécuter.

Un cristal de neurones

Alors que chaque aire du cortex cérébral a une organisation particulière, les neurones du cortex cérébelleux sont tous connectés de la même manière. Cette régularité indique une fonction unique que chaque foliole du cervelet assure pour réguler ou pour préparer les mouvements d'une partie du corps. Cette fonction consiste à combiner les informations sensorielles et motrices, cha-

cune codée par la fréquence des successions, nommées trains, de potentiels d'action, afin d'anticiper les mouvements résultant des ordres moteurs quelques millisecondes avant qu'ils ne s'accomplissent, puis d'émettre un signal correcteur qui se combine au signal moteur du cortex cérébral.



3. PLUSIEURS CIRCUITS NEURONAUX, ici simplifiés, commandent un mouvement. Le cortex cérébral envoie un signal moteur (en rouge) vers la moelle épinière. Une copie (en vert) de cet ordre est transmise au cervelet qui envoie un signal (en bleu) vers la moelle épinière. Les deux signaux s'additionnent dans un motoneurone en un signal (en violet) qui stimule le muscle. Un signal réflexe (en orange) déclenché par une stimulation directe ne passe que par la moelle épinière. Un signal d'erreur (en jaune) peut être envoyé de l'olive inférieure vers le cervelet.

Observons maintenant le cortex du cervelet à un plus fort grossissement. Il est composé de cinq types principaux de neurones : les cellules de Purkinje, les cellules granulaires ou grains, les cellules de Golgi, les cellules étoilées et les cellules à panier (*voir la figure 2*). Ces neurones sont agencés selon une disposition si régulière et répétitive qu'elle a été comparée à la géométrie d'un cristal.

Les signaux qui arrivent à l'entrée du cortex activent les grains, qui sont les cellules les plus petites et les plus nombreuses de tout le système nerveux et sont les seuls neurones excitateurs du cortex. À la sortie, le signal élaboré par le cortex est envoyé aux noyaux cérébelleux par les axones des cellules de Purkinje, qui sont, elles, parmi les plus volumineuses du système nerveux. Tous les autres types de neurones sont des interneurones, c'est-à-dire des neurones qui ne contactent que des neurones proches.

Les voies de sortie sont dites efférentes et les voies d'entrées, afférentes. Deux voies d'entrée apportent des signaux au cervelet : les fibres moussues et les fibres grimpantes. Toutes ces fibres sont excitatrices et ont le glutamate pour neurotransmetteur. Les fibres de chaque type se divisent dans le cervelet et atteignent un noyau cérébelleux et la région correspondante du cortex. Cependant, malgré ces similitudes, leurs origines et les informations qu'elles apportent sont très différentes.

Les fibres moussues, ainsi nommées d'après leur aspect en microscopie électronique, sont les axones de neurones dont les corps cellulaires sont situés dans des régions très diverses du système nerveux. Elles transmettent des informations sensorielles et des copies des ordres moteurs. Les premières proviennent des organes de l'équilibre, du système visuel et, via la moelle épinière, des organes qui mesurent l'allongement et la tension des muscles. Les secondes sont issues du cortex moteur cérébral et des régions de la motricité automatique, notamment les volumineux noyaux du pont.

Les fibres grimpantes sont ainsi nommées parce qu'elles s'enroulent autour des dendrites des cellules de Purkinje à la façon de plantes grimpantes autour de branches d'arbres. À l'inverse des fibres moussues, toutes les fibres grimpantes sont les axones de neurones d'un seul noyau du tronc

cérébral, l'olive inférieure, qui reçoit à la fois des signaux sensoriels et des copies d'ordres moteurs issues de la moelle, du tronc cérébral, du cortex cérébral et des noyaux cérébelleux. Grâce à ces signaux, codés par les fréquences de potentiels d'action, l'olive inférieure détecte les erreurs de mouvements et envoie par les fibres grimpantes un signal au cervelet qui estime l'écart entre les mouvements effectués et les mouvements voulus. Le signal, transmis par les fibres grimpantes au cervelet, agit comme un professeur : à court terme, il corrige le mouvement en cours, et à long terme, il guide un apprentissage moteur.

L'organisation synaptique du cortex cérébelleux

Les signaux des fibres moussues parviennent au cortex cérébelleux par les synapses de ces fibres avec les courtes dendrites des grains, qu'atteignent aussi des axones des cellules de Golgi : l'ensemble forme un glomérule qui traite les informations afférentes. Les axones des grains, très fins et sans gaine de myéline, se divisent, à la surface du cervelet, en deux branches opposées qui forment des fibres parallèles, orientées perpendiculairement au plan de symétrie du corps, et longues de plusieurs millimètres. Ces fibres, très nombreuses, contactent par des synapses les dendrites des cellules de Golgi (qui reçoivent aussi des signaux, via d'autres synapses, directement des fibres moussues). En retour, les cellules de Golgi inhibent les dendrites des grains au niveau des glomérules et ferment une boucle de rétroaction.

Les fibres moussues, les grains et les cellules de Golgi constituent le circuit d'entrée du cortex cérébelleux (*voir la figure 5*). Ce circuit de tri et de traitement sélectionne, parmi les signaux afférents, ceux pertinents pour contrôler un mouvement, et en forme des combinaisons variées.

Les messages traités dans le circuit d'entrée sont transmis, via les fibres parallèles, au circuit de sortie formé par les cellules de Purkinje et par deux types d'interneurones inhibiteurs, les cellules étoilées et les cellules à panier. Chaque fibre parallèle contacte une centaine de cellules de Purkinje, dont les nombreuses dendrites, disposées comme les branches d'un espalier, sont toutes contenues dans des plans perpendiculaires à la direction des fibres

parallèles. Environ 400 000 fibres parallèles traversent l'arborisation dendritique de chaque cellule de Purkinje, et environ 80 000 la contactent, par des synapses au niveau d'épines dendritiques, des petites saillies des dendrites. Ces synapses, nous le verrons, sont le site d'apprentissage le mieux connu du cervelet.

Chaque cellule de Purkinje combine les messages qui lui parviennent par les fibres parallèles et forme un message efférent, une série de potentiels d'action simples, dits sodiques-potassiques (*voir la figure 4*), semblables à ceux émis par la plupart des neurones. La fréquence de ces potentiels d'action, qui atteint parfois 1 000 par seconde, mais reste le plus souvent comprise entre 10 et 100 par seconde, code le signal élaboré par la cellule et est transmis à des neurones des noyaux cérébelleux dont il diminue l'activité.

Des synapses existent aussi entre les fibres parallèles et les deux types d'interneurones qui inhibent les cellules de Purkinje voisines. Les cellules étoilées, à la surface du cortex cérébelleux, inhibent les dendrites des cellules de Purkinje et en commandent donc les entrées, tandis que les cellules à panier, en profondeur du cortex, inhibent le cône axonique, la jointure du corps cellulaire et de l'axone où naissent les potentiels d'action. Ces inhibitions exercées à l'entrée et à la sortie des cellules de Purkinje affinent le contrôle moteur.

Ainsi, les informations sont choisies et combinées dans chacun des deux circuits. Elles divergent dans le circuit d'entrée, où le message de chaque fibre moussue est transmis indirectement à des milliers de cellules de Purkinje. À l'inverse, elles convergent dans le circuit de sortie, où chaque cellule de Purkinje combine une centaine de milliers de signaux pour en élaborer un seul, qui dépend d'une seule fibre grimpante.

Puisque chaque cellule de Purkinje est contactée par maintes fibres parallèles, le signal de chacune contribue peu au message que cette cellule élabore. Néanmoins, toute modification des synapses entre les fibres parallèles et les épines dendritiques de la cellule de Purkinje retentit sur la combinaison des signaux et, ainsi, sur le message envoyé aux noyaux cérébelleux. La combinaison des signaux est réglée à long terme par les fibres grimpantes, qui, à court terme, suscitent aussi des signaux correcteurs envoyés vers les centres moteurs.

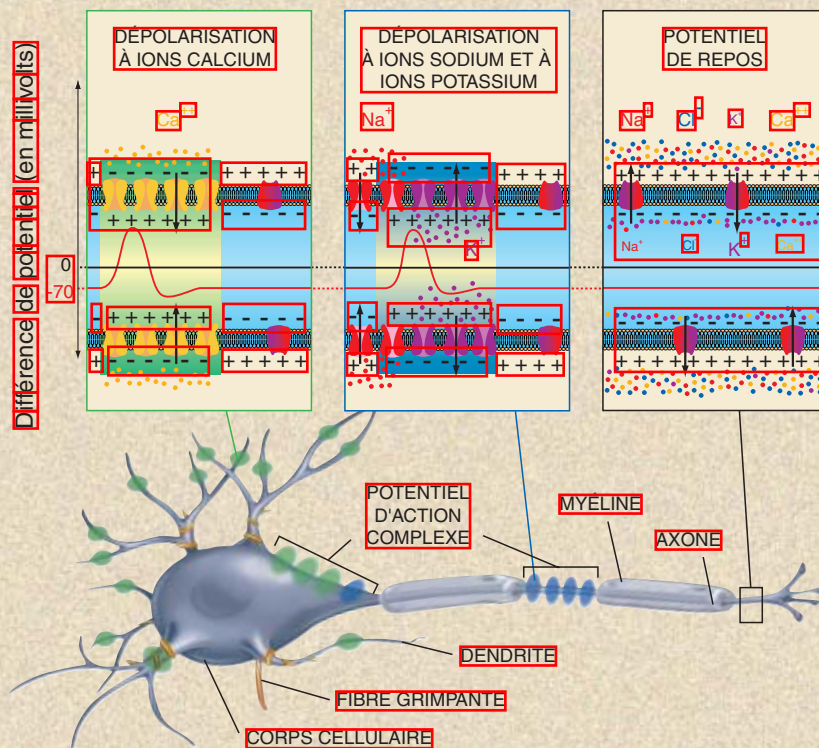
L'action des fibres grimpantes

Chaque fibre grimpante ne contacte pas plus d'une dizaine de cellules de Purkinje, dont chacune n'est contactée que par une seule fibre grimpante. Cette voie est très directe et précise, contrairement à la voie d'entrée par les fibres moussues, qui est indirecte et diffuse.

L'enroulement d'une fibre grimpante autour des dendrites d'une cellule de Purkinje assure environ 300 contacts synaptiques excitateurs qui entraînent l'ouverture simultanée de nombreux canaux à ions sodium et à ions potassium. L'intense dépolarisation qui en résulte est suivie de l'ouverture de canaux à ions calcium répartis sur la membrane des dendrites : des potentiels d'action à calcium se propagent dans les dendrites, à partir des branches maîtresses vers les ramifications. Cette propagation, dite rétrograde parce qu'en sens opposé à celui de la propagation des signaux d'entrée dans les dendrites, est rare dans le système nerveux. Elle relaie et distribue le signal de l'olive inférieure jusqu'aux extrémités des dendrites, où elle déclenche l'apprentissage moteur en diminuant l'affinité des récepteurs des cellules de Purkinje au glutamate émis par les fibres parallèles.

Les potentiels d'action à calcium des dendrites se propagent aussi jusqu'au corps cellulaire, et y entraînent une dépolarisation, formée d'un potentiel d'action à sodium et à potassium, suivi de potentiels d'action à calcium. Dans le cône axonique, une série de potentiels à sodium et à potassium naît alors. Ce potentiel d'action, dit complexe, est envoyé, via l'axone de la cellule de Purkinje, aux neurones des noyaux cérébelleux qu'il inhibe.

Paradoxalement en apparence, cette inhibition, complète, mais transitoire, facilite la réexcitation de ces neurones quelques millisecondes plus tard : tous ceux qui ont été simultanément inhibés par la même cellule de Purkinje (ou par des cellules de Purkinje actives simultanément) redeviennent actifs au même instant. Ils émettent tous en même temps des bouffées de potentiels d'action, qui forment ensemble une impulsion envoyée vers le système moteur, où elle augmente l'ampleur d'un mouvement trop court ou accroît la force exercée par un muscle. Cette impulsion corrige un mouvement erroné.



4. L'ACTIVITÉ D'UN NEURONE, ici une cellule de Purkinje, est due aux échanges d'ions à travers sa membrane. Au repos (à droite), les concentrations en ions (représentés par des points : le sodium, en rouge ; le potassium, en violet ; le chlore, en bleu ; le calcium, en orange) sont inégales de part et d'autre de la membrane : il en résulte une différence de potentiel d'environ -70 millivolts. Cette différence est entretenue par des protéines, nommées pompes à sodium et à potassium (en rouge et en violet). Le signal transmis par un neurone est une dépolarisation locale (représentée par le trait rouge) due le plus souvent à des mouvements d'ions sodium (en rouge) et potassium (en violet) à travers des protéines qui forment des canaux (au centre). Les pompes à sodium et à potassium rétablissent ensuite le potentiel de repos. Les fibres grimpantes actives (en jaune sur le neurone) déclenchent un autre type de potentiel d'action, le potentiel d'action à calcium (à gauche) qui se propage vers l'extrémité des dendrites et atteint aussi le corps cellulaire. Un potentiel d'action complexe est une suite de dépolarisations.

Le fonctionnement des cellules de Purkinje

Ainsi, selon l'activité de la fibre grimpante, une cellule de Purkinje fonctionne en deux modes alternatifs, de calcul ou de régulation, et émet deux types de potentiels d'action. Quand le mouvement se déroule régulièrement, la fibre grimpante est inactive et la cellule de Purkinje combine les nombreux signaux qu'elle reçoit des fibres parallèles en un seul signal éfférent. Celui-ci, codé dans la fréquence des potentiels d'action simples, anticipe les conséquences des signaux moteurs. C'est le mode de calcul. Par exemple, pendant la course, ce signal peut être la vitesse escomptée du pied 40 millisecondes plus tard.

Cependant, quand le mouvement change soudainement, par exemple au cours d'un enchaînement de gestes, ou bien quand quelque chose d'anormal se passe, telle la rencontre d'un obstacle,

le mouvement effectué n'est plus le mouvement attendu. L'olive inférieure détecte cet écart et la fibre grimpante devient active. Elle exerce une puissante stimulation qui interrompt temporairement l'émission de potentiels d'action simples et déclenche un potentiel d'action complexe. Ce potentiel a deux effets, l'un en aval sur les neurones des noyaux cérébelleux, où il déclenche une impulsion envoyée vers les voies motrices, afin de rattraper le mouvement, l'autre en amont sur les dendrites des cellules de Purkinje, où il détermine, à long terme, l'apprentissage moteur en modifiant l'efficacité des synapses entre les fibres parallèles et les cellules de Purkinje. C'est le mode de régulation.

Le contraste est très marqué entre les fibres moussues et les fibres grimpantes : les messages des fibres moussues atteignent, via les fibres parallèles, de nombreuses cellules de Purkinje, mais influent peu sur chacune d'elles, tandis

Calcul d'une fonction inverse approchée.

La fonction inverse autorise des mouvements conformes aux mouvements voulus et la perception précise des mouvements effectués. La nécessité d'une telle fonction résulte de ce que tout organe sensoriel déforme la grandeur qu'il mesure, et que tout membre a une inertie, un poids et une viscosité, qui tendent à déformer le mouvement programmé.

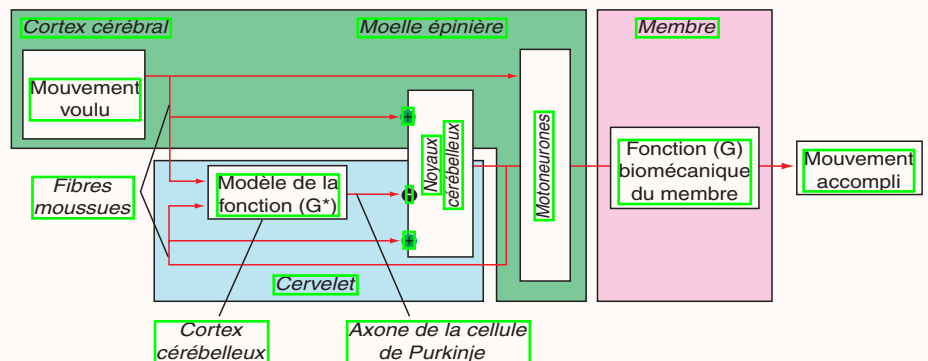
Par définition, lorsqu'on applique successivement la fonction, notée G , et sa fonction inverse à une variable, cette variable reste inchangée. Pour déplacer la main selon une trajectoire précise, on prépare l'ordre moteur en tenant compte de la mécanique du bras. La fonction inverse est alors appliquée avant la fonction directe.

Cependant, le calcul d'une fonction inverse est souvent impossible. Il faut alors calculer une fonction inverse approchée, grâce à une boucle de rétroaction. Pour simplifier le calcul, les fonctions sont supposées linéaires, mais le principe utilisé est encore valable quand elles ne sont pas linéaires.

En réalité, les fonctions biomécaniques ne sont pas du tout linéaires notamment à cause des délais de transmission importants dans les voies motrices. En outre, le circuit illustré ici, qui représente de façon schématisée le fonctionnement du cervelet, est instable quand les fonctions sont linéaires. Toutefois, ce défaut peut se contourner et le circuit permet alors de piloter des actionneurs réels quand la fonction inverse approchée est estimée par un réseau de neurones qui anti-

cipe le mouvement résultant de l'ordre moteur après le délai de transmission dans les voies motrices. Ce circuit contient une voie directe qui transmet aux motoneurones le signal codant la trajectoire voulue et une voie indirecte correctrice laquelle leur apporte un signal correcteur via les cellules de Purkinje. Ce signal tient compte des propriétés du membre et de l'accélération. Cette voie indirecte modélise l'ensemble des voies cérébelleuses (le modèle est noté G^*).

Ce circuit a servi de modèle à l'élaboration d'un système de commande d'un bras articulé mû par des muscles artificiels pneumatiques. Un circuit qui schématise l'olive inférieure détectait les erreurs de pointage et guidait l'apprentissage d'un réseau ayant l'architecture du cervelet, qui apprend la fonction mécanique des muscles et du bras. Après chaque essai de pointage vers diverses positions, l'erreur était mesurée et utilisée pour modifier les connexions dans le réseau. Le système de commande a ainsi appris à pointer à la position et à la vitesse fixées par l'expérimentateur.



que ceux des fibres grimpantes atteignent peu de cellules de Purkinje, mais commutent momentanément leur mode de fonctionnement. Les fibres moussues apportent les informations que le cervelet combine pour coordonner les mouvements, tandis que les fibres grimpantes apportent les signaux qui indiquent comment les combiner.

La commande du mouvement

Pour que les mouvements réussissent, les ordres moteurs doivent tenir compte des caractéristiques physiques des membres, telles l'inertie et l'orientation par rapport au champ de gravité, la raideur et la viscoélasticité des muscles, qui varient d'un mouvement à un autre et au cours de chaque mouvement. Par ailleurs, les contractions des muscles antagonistes doivent être coordonnées : quand un muscle se contracte, les muscles antagonistes se relâchent, mais restent un peu tendus. Quand un mouvement est décidé par le cortex cérébral, le cervelet ajuste les contractions musculaires pour que le

membre suive la trajectoire voulue. Pour préparer les ordres moteurs, le problème est alors de remonter de l'effet à la cause, de la trajectoire voulue à la séquence des contractions musculaires nécessaires. Le système nerveux central doit élaborer une fonction inverse de la fonction mécanique des membres, afin de calculer des ordres moteurs permettant de suivre la trajectoire décidée.

Cependant, il est impossible de calculer une fonction inverse exacte, sauf pour des mouvements très simples, car la solution n'est pas unique dans la plupart des cas, et nulle méthode générale de calcul n'existe. C'est un des grands problèmes de la robotique. Toutefois, il est possible de calculer une fonction approchée grâce à une boucle de rétroaction interne au système nerveux, donc courte et, par conséquent, rapide. Cette boucle doit contenir un modèle de la mécanique du membre à déplacer (voir l'encadré de la page 80). Un tel modèle consiste en un réseau de neurones, qui réside vraisemblablement dans le cortex du cervelet, et dont le signal de sor-

tie est codé par la fréquence des potentiels d'action simple dans les axones des cellules de Purkinje, et anticipe le mouvement qui résultera des ordres moteurs après leur transmission dans les voies motrices.

Ainsi, en utilisant des informations sur la trajectoire voulue, les ordres moteurs en cours et l'état du corps connu grâce aux informations sensorielles, le cortex du cervelet anticipe les conséquences des ordres moteurs quelques dizaines de millisecondes à l'avance. Les noyaux cérébelleux reçoivent ces signaux anticipateurs et des copies des ordres moteurs, puis élaborent des signaux qui ajustent les contractions musculaires au mouvement voulu.

Ces signaux sont envoyés aux motoneurones, via des noyaux du tronc cérébral, et une copie est envoyée au cortex cérébral, via le thalamus. L'ensemble des voies cérébelleuses calcule ainsi une fonction inverse approchée, au moyen d'un modèle de la fonction mécanique dans une boucle de rétroaction.

Au cours d'un mouvement complexe d'un membre, sa géométrie change et le mouvement de chaque segment de membre (par exemple, l'avant-bras) retentit sur celui des segments voisins (le bras) à l'instar d'une perturbation. Le signal envoyé par l'olive inférieure ajuste alors la fonction prédictive du cortex cérébelleux au cours du geste à mesure de son accomplissement. Comment le cervelet apprend-il à commander les mouvements?

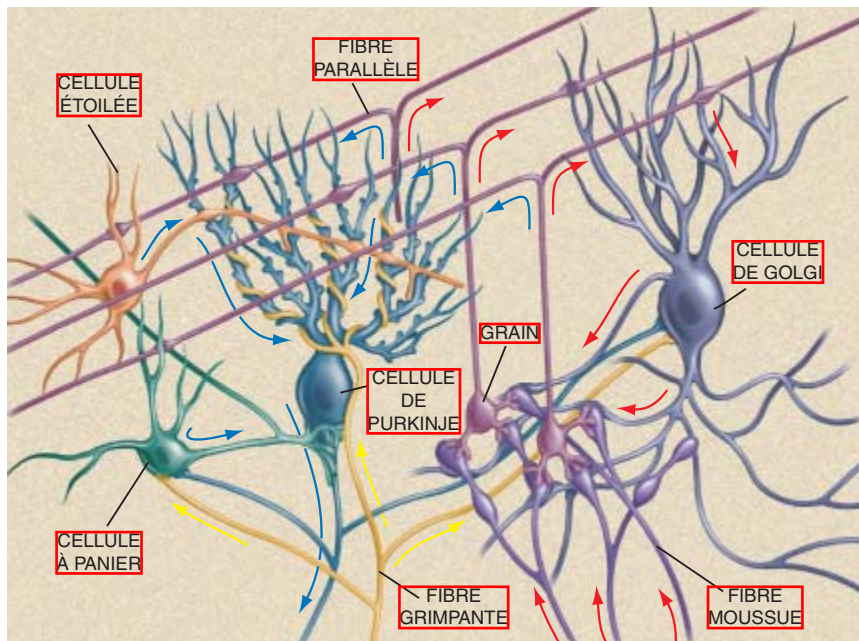
L'apprentissage moteur

L'expérimentation montre comment le cervelet participe à l'apprentissage des mouvements (voir la figure 6) : des singes sont entraînés à pousser une manette et à la maintenir dans une position pendant que l'activité des cellules de Purkinje est enregistrée dans la région de commande du bras, située dans la partie médiane d'un hémisphère. La fréquence des potentiels d'action simples change au cours des mouvements du bras, et à chaque position correspond une fréquence précise.

Après que l'animal a été bien entraîné, les expérimentateurs modifient la résistance de la manette. D'abord déconcerté, le singe réapprend ensuite à placer correctement la manette, en modifiant la force qu'il exerce. L'activité des cellules de Purkinje change pendant ce nouvel apprentissage : la fréquence des potentiels d'action complexes augmente dès que la résistance de la manette est changée, puis reste à un niveau élevé tant que dure l'apprentissage, puis revient à sa valeur d'origine quand les performances redeviennent normales.

Parallèlement, la fréquence des potentiels d'action simples change graduellement, puis, quand la maîtrise du mouvement de la manette est à nouveau acquise, elle se stabilise à une valeur caractéristique de la résistance de la manette. Cet apprentissage moteur ne se produit pas quand l'olive inférieure est endommagée, ce qui montre que les changements de la fréquence des potentiels d'action simple dépendent de l'activation des fibres grimpantes, donc de la détection par les neurones de l'olive inférieure des écarts entre les mouvements commandés et ceux accomplis.

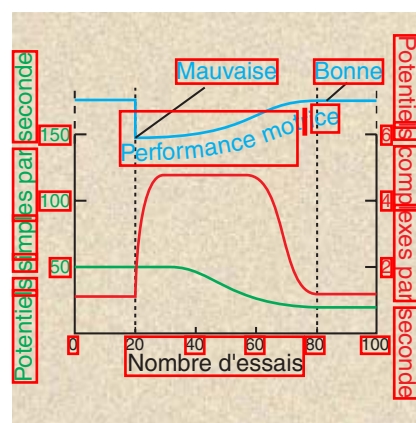
Le cervelet est le siège d'un type particulier de mémoire, la mémoire



5. LES NEURONES DU CORTÈX DU CERVELET. Le circuit d'entrée (flèches rouges) est composé, dans l'ordre, des fibres moussues (en mauve), des grains (en rose) et des cellules de Golgi (en violet). Le circuit de sortie (flèches bleues) est constitué des grains, des cellules étoilées (en orange), des cellules à panier (en vert) et des cellules de Purkinje (en bleu). Enfin, les fibres grimpantes (en jaune) transmettent des signaux de régulation (flèches jaunes).

procédurale des gestes complexes. Le mécanisme cellulaire qui sous-tend l'apprentissage moteur dans le cervelet est connu en détail (voir l'encadré de la page 76). Lorsqu'une erreur de mouvement est détectée dans l'olive inférieure et qu'un signal est envoyé dans les fibres grimpantes, le potentiel d'action complexe déclenché dans la cellule de Purkinje entraîne une chaîne de réactions biochimiques qui diminuent la transmission synaptique des fibres parallèles actives juste auparavant, c'est-à-dire pendant le mouvement. Ainsi, les signaux de toutes les fibres parallèles qui ont été actives pendant un mouvement erroné peuvent avoir contribué à l'erreur : la diminution de leur participation au signal des cellules de Purkinje réduit cette erreur.

La diminution de la transmission synaptique, nommée dépression à long terme, résulte de la fixation d'un groupe phosphate sur une proportion importante des récepteurs du glutamate situés dans la membrane de la cellule de Purkinje, au niveau de synapses. Ces synapses sont situées dans les épines dendritiques en contact avec les fibres parallèles qui ont été actives juste avant que la fibre grimpante ne crée le potentiel d'action complexe. Ces récepteurs, nommés AMPA, car ils fixent l'acide aminé hydroxy-méthyl-isoxalopropionate, sont des protéines qui for-



6. LA FRÉQUENCE DES POTENTIELS D'ACTION COMPLEXES (en rouge) augmente dès que, par exemple, la résistance d'une manette manipulée par un singe est modifiée : la performance motrice (en bleu) est alors mauvaise. Pendant l'apprentissage, la fréquence des potentiels d'actions simples (en vert) se modifie progressivement jusqu'à une nouvelle valeur. La fréquence des potentiels d'action complexes retrouve sa valeur initiale quand l'apprentissage est accompli.

ment des canaux par où passent les ions. Ils s'ouvrent lorsque la concentration en glutamate augmente dans la fente synaptique : l'échange d'ions sodium et d'ions potassium qui s'ensuit dépolarise la membrane.

La fixation du groupe phosphate sur les récepteurs AMPA diminue l'affinité de ces protéines pour le glutamate : celui-ci se fixe moins, le canal s'ouvre moins souvent et la dépolarisation du

neurone est réduite. Les signaux des fibres parallèles participent moins au signal de la cellule de Purkinje, ce qui se traduit comme un apprentissage moteur. La dépression à long terme n'a lieu que lorsque les concentrations en deux «seconds messagers» (le calcium et le diacylglycérol) augmentent simultanément dans la cellule de Purkinje. Ainsi, une chaîne de traitement de l'information dans des circuits neuronaux déclenche une réaction biochimique qui détermine un changement comportemental!

Des réseaux d'oscillateurs

D'autres traits originaux des voies cérébelleuses autorisent des réactions de rattrapage très rapides. Ainsi, les neurones de l'olive inférieure ont des propriétés électriques particulières : leur potentiel de membrane oscille spontanément, au rythme de une à dix fois par seconde. Des potentiels d'action sont émis dans la fibre grimpante quand une des oscillations dépasse un seuil. Or, ces oscillations sont influencées par celles des neurones voisins, car en plus des synapses classiques, les membranes des neurones contigus s'accrochent en des synapses électriques qui transmettent instantanément les potentiels membranaires d'un neurone à l'autre. Ainsi, les variations des potentiels se synchronisent parfois, et s'annulent ou s'amplifient.

Les neurones de l'olive inférieure forment un réseau d'oscillateurs couplés sensible aux coïncidences d'événements. Lorsqu'un mouvement dévie de sa trajectoire, les signaux sensoriels qui mesurent le mouvement en cours et les copies d'ordres moteurs qui codent le mouvement programmé diffèrent. Ces écarts sont détectés par le réseau d'oscillateurs, et les oscillations des potentiels membranaires s'amplifient très vite, jusqu'à dépasser le seuil de déclenchement d'un potentiel d'action. Les neurones de l'olive inférieure envoient alors, via les fibres grimpantes, le signal qui modifie le fonctionnement du cervelet. L'activation du cervelet déclenche une

rétroaction : des neurones des noyaux cérébelleux envoient à l'olive inférieure des signaux inhibiteurs qui bloquent les jonctions électriques, ce qui diminue le nombre de neurones couplés, réduit les oscillations des potentiels membranaires et interrompt l'émission de potentiels d'action dans les fibres grimpantes.

Le fonctionnement alterné du cervelet selon deux modes résulte à la fois de la structure du circuit et des caractéristiques dynamiques des neurones. Cette alternance détermine le rythme des mouvements, tel un métronome, afin d'enchaîner des gestes complexes. Ce rythme permet aussi de percevoir les intervalles de temps entre deux événements proches : ainsi, des malades atteints d'une lésion au cervelet ne réussissent pas à estimer la durée qui s'écoulent entre deux sons.

En assurant la combinaison des signaux sensoriels entre eux et avec les signaux moteurs, le cervelet perçoit précisément les mouvements du corps dans le monde dont il construit une image interne cohérente.

Le fonctionnement du cervelet est une source d'inspiration pour les roboticiens. Il pourrait aussi être utile pour guider l'étude des mécanismes de la pensée. En effet, le cervelet aide peut-être le cerveau à effectuer des calculs. Par ailleurs, des réseaux de neurones semblables à ceux de l'olive inférieure, qui détectent les signaux corrélés entre eux grâce aux oscillations de leurs potentiels de membrane, existent aussi dans le thalamus. Cette région reçoit des signaux de toutes les régions du cerveau et se projette sur le cortex cérébral. Le thalamus coordonnerait le fonctionnement des diverses régions du cortex cérébral de la même façon que l'olive inférieure le fait pour le cervelet. Les concepts abstraits sont peut-être construits comme les représentations internes des mouvements du corps : au cours de l'évolution, les règles de combinaison de signaux qui servent à contrôler les mouvements ont peut-être été transposées pour que l'on perçoivent quels faits sont corrélés et que la cohérence des pensées soit assurée.

Christian DARLOT est neurophysiologiste au CNRS et travaille à l'École nationale supérieure des télécommunications.

J. C. ECCLES, M. ITO et J. SZENTAGOTHAÏ, *The cerebellum as a neuronal machine*, Springer, Berlin, 1967.

M. ITO, *The cerebellum and the neural control*, Raven, New York, 1984.

Larry SQUIRE et Éric KANDEL, *La mémoire des habiletés*, dans *La mémoire, le jardin des pensées*, Dossier Pour la Science, avril 2001.

L'étrange comportement de l'eau ultra-froide

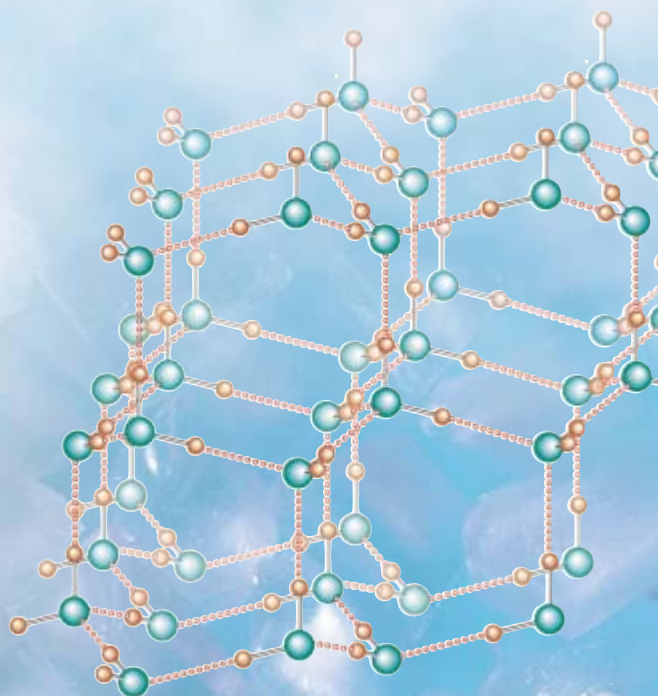
JOSE TEIXEIRA

En apparence, l'eau est un corps simple. En fait, elle a des propriétés étonnantes, tout particulièrement à basse température. Ses changements d'état entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-135\text{ }^{\circ}\text{C}$ restent énigmatiques, mais le scénario commence à se préciser.

«**Q**u'est-ce que l'eau? Est-elle fluide ou solide de sa nature? Ne faut-il pas, pour qu'elle coule, qu'un feu secret en désunisse les parties? Ôtez une grande quantité de ce feu, elle devient glace. Or, qu'est-ce qu'un élément qui a besoin d'un autre élément pour exister?» Tirées de son essai *Des singularités de la Nature*, ces réflexions de Voltaire montrent qu'il y a 250 ans déjà, les changements d'état de l'eau intriguaient les «sages». Voltaire avait raison : l'eau est l'une des singularités de la nature. Quelle que soit la température, elle se distingue. L'eau est pratiquement le seul corps plus dense dans sa phase liquide que dans sa phase solide. L'énergie nécessaire pour porter à ébullition un litre d'eau ferait fondre la casserole qui le contient si cette dernière était vide. Plus étonnantes encore sont les transitions de phase de l'eau, c'est-à-dire ses changements d'état. Certes, l'eau se transforme en glace à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et en vapeur à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais, dans certaines conditions, elle peut rester à l'état liquide au-delà de ces températures limites. Ainsi, de l'eau «ultra-propre» peut être portée à $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ sans bouillir. En revanche, cet état est très instable, et la moindre perturbation déclenche une ébullition explosive. Inversement, elle peut rester liquide au-dessous de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; on dit alors qu'elle est surfondue.

Aujourd'hui, les physiciens connaissent la cause de ces remarquables propriétés : la liaison hydrogène. Cette «pseudo-liaison» est différente des «vraies» liaisons covalentes qui lient, dans chaque molécule d'eau, l'atome d'oxygène à ses deux atomes d'hydrogène ; elle ne lie pas entre eux les atomes d'une même molécule, mais les atomes d'oxygène et d'hydrogène de molécules différentes. Nous expliciterons ses propriétés. Depuis 30 ans, on étudie cette liaison entre molécules d'eau ; on l'a décrite, modélisée et l'on en a mesuré la durée de vie à l'aide de lasers ultra-rapides. Les propriétés de la liaison hydro-

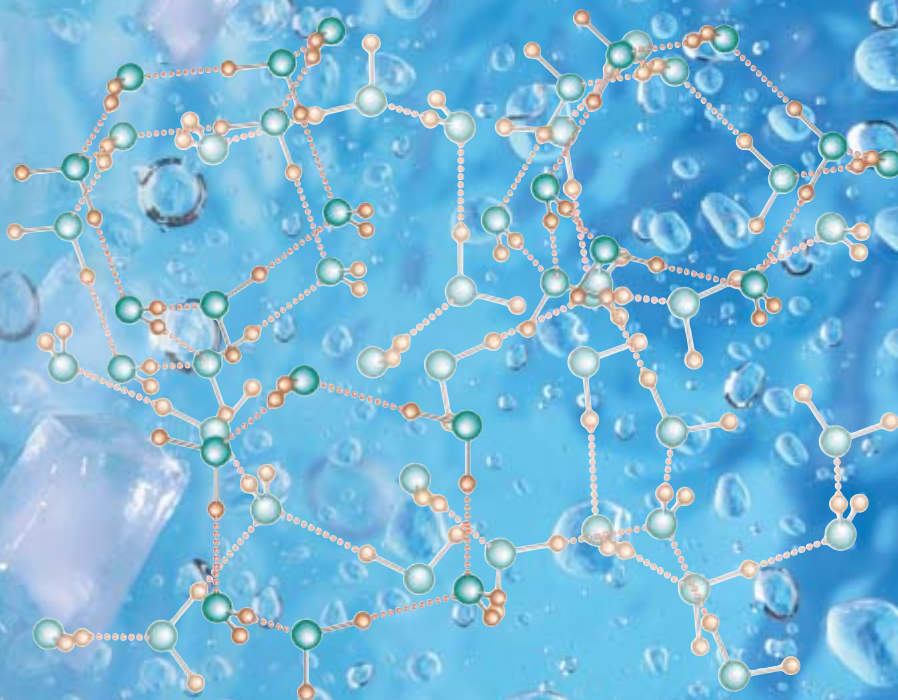
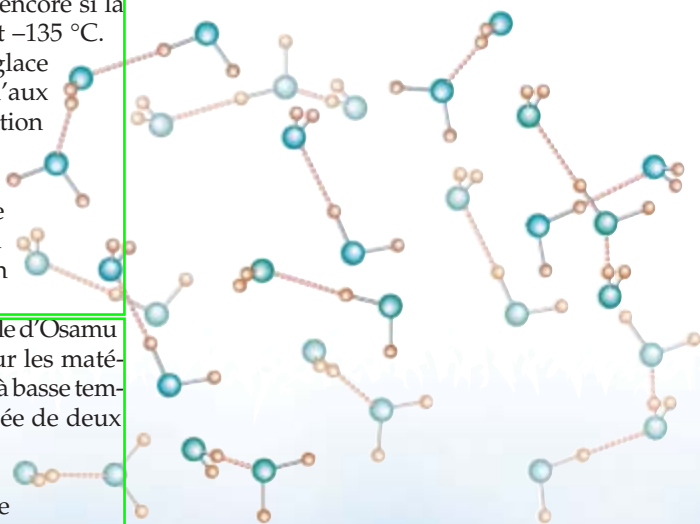
1. LES TROIS FORMES COMMUNES DE L'EAU sont la glace cristalline, l'eau liquide et la vapeur. Dans la glace cristalline, les molécules H_2O sont régulièrement disposées au sein d'un vaste réseau hexagonal, où les molécules sont reliées entre elles par de nombreuses liaisons hydrogène. Dans l'eau liquide, de nombreuses liaisons hydrogène sont rompues, de sorte que l'ordre à grande distance qui caractérise la glace cristalline disparaît. Toutefois, quelques figures hexagonales subsistent et des zones de faible densité coexistent avec des zones de densité plus forte. Dans la vapeur, les liaisons hydrogène entre molécules sont rares et la densité est très faible.



gène expliquent bien le comportement de l'eau, de la vapeur d'eau et de la glace. Toutefois, il est un domaine de températures où l'on ignore encore si la liaison hydrogène explique les propriétés de l'eau : entre -40°C et -135°C . Au-dessus de -40°C , l'eau est soit surfondue, soit sous forme de glace cristalline. Même quand on parvient à la maintenir en surfusion jusqu'aux environs de -40°C , à cette température, la «température de nucléation homogène», elle finit toujours par se transformer spontanément en glace cristalline. Au-dessous de -135°C , la «température de transition vitreuse», l'eau se transforme en une glace vitreuse. Dans ce type de glace, les molécules d'eau ne s'arrangent pas selon un réseau cristallin régulier, mais comme dans un liquide que l'on aurait brusquement figé. Que se passe-t-il entre -40°C et -135°C ?

Aujourd'hui, deux explications sont proposées. Selon la première, celle d'Osamu Mishima et d'Eugene Stanley, de l'Institut japonais de recherche sur les matériaux inorganiques, formulée en 1994, les transitions de phase de l'eau à basse température traduisent la présence d'un mélange : l'eau serait composée de deux formes de glace vitreuse de densités différentes. La seconde théorie s'appuie sur la dynamique des molécules d'eau. Ces petites molécules formées d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène participent à de grands mouvements d'ensemble, relativement lents, mais subissent aussi des mouvements individuels rapides, parce que les liaisons hydrogène entre molécules se font et se défont sans cesse. La façon dont ces deux types de mouvements se combinent, explique le comportement de l'eau aux alentours de -40°C , et peut-être au-delà...

Avant de décrire le comportement étrange de l'eau dans les contrées difficiles à explorer des basses températures, commençons par rappeler le rôle que joue la liaison hydrogène dans l'eau à toutes les températures.



L'eau surfondue

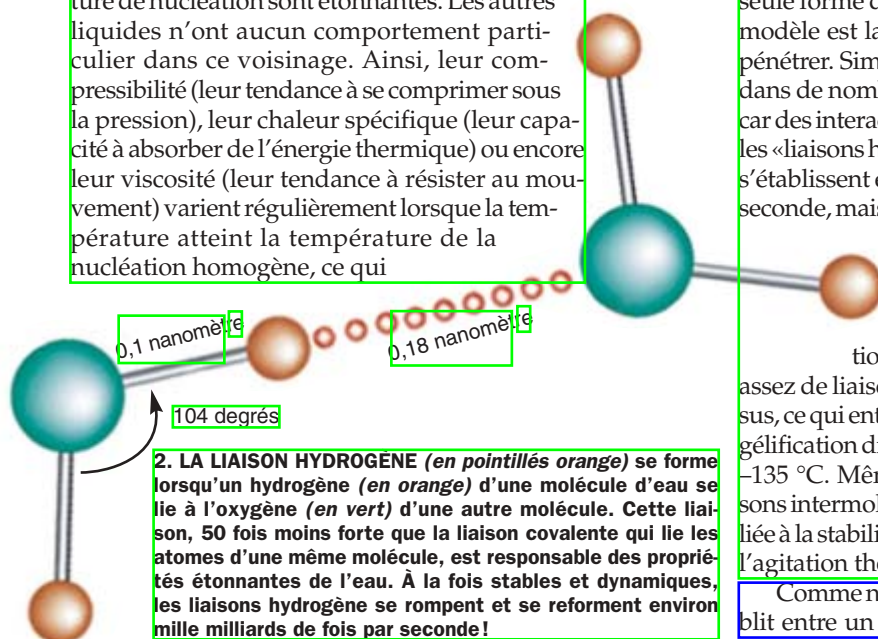
Cette liaison joue un rôle important, notamment dans le cas de l'eau surfondue, entre 0 et -40°C . On s'intéresse à cet état instable, car l'eau surfondue est fréquente dans la nature et souvent utilisée dans l'industrie. Ainsi, certains nuages sont formés de gouttelettes d'eau surfondue. Quand un avion traverse un tel nuage, il perturbe ces gouttelettes qui sont dans un état métastable ; elles cristallisent alors en masse sur les ailes et alourdissent l'engin. Le phénomène a déjà provoqué le crash de plusieurs avions de ligne (pour éviter ce genre d'accident, on fait passer les appareils sous une douche d'antigel). Les microcavités des roches contiennent aussi de l'eau surfondue qui reste liquide même quand la température atteint -20 , voire -30°C .

L'eau surfondue se transforme en un cristal de glace, dès qu'une amorce solide (une micropoussière) y est introduite : c'est le phénomène de «nucléation» (du latin *nucleus* qui signifie noyau). Une fois l'amorce présente, toute la masse d'eau prend en une fraction de seconde, car l'ordre cristallin se propage, telle une onde. Dans les conditions normales, la nucléation se produit à 0°C . Toute aspérité à la surface du récipient qui contient l'eau ou toute impureté est un germe de cristallisation. Ce corps étranger présent au milieu des molécules d'eau sert d'ancrage aux premières molécules ordonnées du cristal, qui constituent l'amorce. En revanche, avec de l'eau pure placée dans un récipient parfaitement lisse et propre, la nucléation n'est spontanée qu'à la température de nucléation homogène, située vers -40°C . En pratique, la probabilité de formation d'un noyau de congélation augmente avec le volume : on atteint une température de nucléation d'autant plus basse que le volume d'eau refroidi est petit, car on a plus de chances d'éliminer tout germe de nucléation.

Pourquoi, cette limite de -40°C n'est-elle jamais dépassée ? Une explication qualitative existe : une fois la température assez basse, de petites variations locales de l'agitation thermique seraient suffisantes pour amorcer la nucléation. En d'autres termes, de petites zones de densité égale à celle de la glace cristalline apparaîtraient vers -40°C et pourraient se maintenir assez longtemps pour amorcer la cristallisation.

Les propriétés de l'eau autour de la température de nucléation sont étonnantes. Les autres

liquides n'ont aucun comportement particulier dans ce voisinage. Ainsi, leur compressibilité (leur tendance à se comprimer sous la pression), leur chaleur spécifique (leur capacité à absorber de l'énergie thermique) ou encore leur viscosité (leur tendance à résister au mouvement) varient régulièrement lorsque la température atteint la température de la nucléation homogène, ce qui



semble normal puisque la solidification n'est liée qu'à la présence aléatoire d'un germe de nucléation. Ce n'est que vers la température de transition vitreuse, bien inférieure, que leur viscosité augmente brusquement : on dit qu'elle «diverge». Un verre n'étant qu'un liquide qui ne coule pas, parce que sa viscosité est infinie, on conçoit que cette dernière diverge à la température de transition vitreuse. De plus, au passage de la température de transition vitreuse, leur chaleur spécifique diminue. À l'état vitreux, les molécules se figent et perdent certains de leurs degrés de liberté, donc une partie de leur capacité à absorber de l'énergie.

Dans le cas de l'eau, tout est différent : la viscosité de l'eau surfondue ne diverge pas à la température de transition vitreuse, mais à la température de nucléation homogène ! La compressibilité et la chaleur spécifique de l'eau adoptent, elles aussi, des évolutions différentes de celles que l'on attendrait, par comparaison avec les autres corps.

Ainsi, l'étude de l'eau surfondue au seuil de la nucléation homogène est un enjeu majeur, mais qui, en pratique, est malheureusement hors d'atteinte, car la durée de vie de l'eau liquide devient très inférieure à la seconde vers -40°C . Aujourd'hui, on ne dispose pas de procédure expérimentale qui permettrait l'observation directe des phénomènes à cette température.

Le rôle de la liaison hydrogène

La liaison hydrogène serait-elle la clé des bizarreries de l'eau à basse température ? Sans doute, du moins le nombre et la nature des liaisons entre les molécules d'eau expliquent-ils les caractéristiques de l'eau à température ambiante, qui, elles aussi, sont inhabituelles. L'eau est un «liquide associé», c'est-à-dire que les liaisons intermoléculaires y jouent un rôle dominant. Afin de souligner les particularités moléculaires de l'eau, rappelons brièvement la vision «classique» que les physiciens ont des liquides. Ils les assimilent à des sacs de billes, où les molécules sont représentées par des sphères supposées sans interactions. Une telle conception ressemble à celle que Maxwell établit pour les gaz à la fin du XIX^e siècle, mais, dans le cas d'un liquide, la distance moyenne entre les molécules est, comme dans un solide, de l'ordre de leur diamètre. La seule forme d'interaction prise en compte dans le cadre de ce modèle est la répulsion qui empêche les sphères de s'interpénétrer. Simpliste, le modèle du sac de billes est insuffisant dans de nombreux cas. Dans celui de l'eau, il est même faux, car des interactions attractives règnent dans ce liquide : ce sont les «liaisons hydrogène» entre molécules. Ces liaisons fugaces s'établissent et se rompent environ mille milliards de fois par seconde, mais elles imposent pourtant un certain ordre. Ainsi,

la multiplication des liaisons hydrogène entraîne la gélification. Ce changement d'état s'observe facilement dans une solution de collagène (gélatine) que l'on refroidit. L'agitation thermique n'y est plus assez forte pour rompre assez de liaisons hydrogène, et un certain ordre prend le dessus, ce qui entraîne la formation d'un gel. Soulignons que cette gélification diffère de la transition vitreuse que subit l'eau vers -135°C . Même des corps non associés (dépourvus de liaisons intermoléculaires) subissent cette transition, qui n'est pas liée à la stabilisation progressive des liaisons hydrogène quand l'agitation thermique diminue (la température baisse).

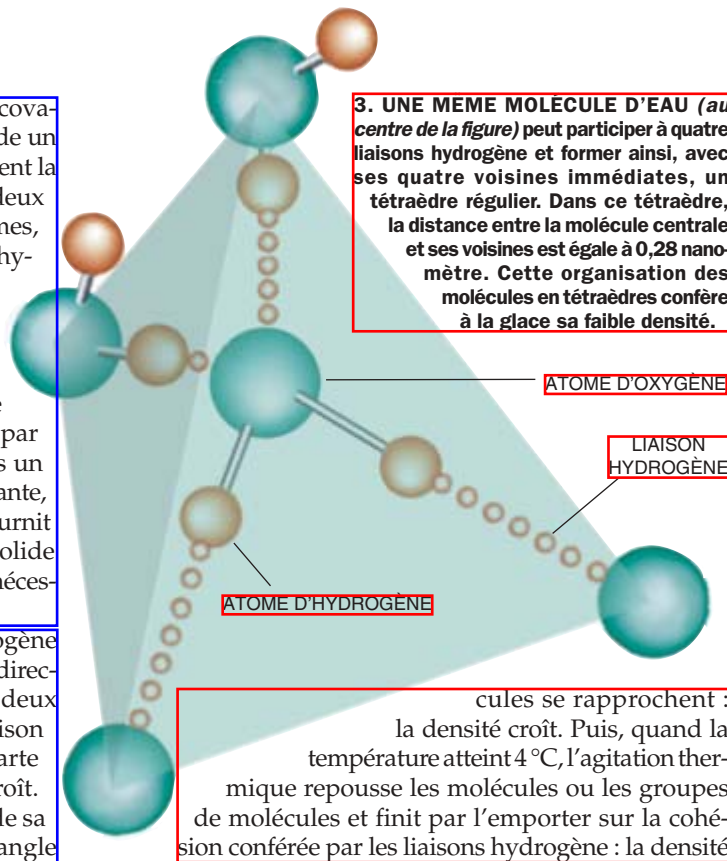
Comme nous l'avons indiqué, une liaison hydrogène s'établit entre un atome d'oxygène d'une molécule et un atome

d'hydrogène d'une autre molécule. Dans une liaison covalente, au sein d'une même molécule, chaque atome cède un électron, et les deux électrons mis en commun constituent la liaison. En revanche, dans une liaison hydrogène, les deux électrons de la liaison sont fournis par un seul des atomes, ici l'oxygène, qui porte deux doublets électroniques. L'hydrogène se contente d'«accepter» la liaison assurée par l'oxygène seul. Comme ce dernier porte deux doublets, il peut s'engager dans deux liaisons hydrogène, en plus des deux liaisons covalentes. L'énergie de la liaison hydrogène – 10 kilojoules par mole – est très inférieure à celle de la liaison covalente qui vaut 492 kilojoules par mole (une mole est le nombre d'atomes présents dans un gramme d'hydrogène soit 6×10^{23}). À température ambiante, elle est ainsi quatre à cinq fois supérieure à celle que fournit l'agitation thermique. L'eau devrait donc être un... solide puisque l'agitation thermique ne fournit pas l'énergie nécessaire à la destruction des liaisons hydrogène!

Une propriété supplémentaire de la liaison hydrogène efface cependant ce paradoxe apparent : son caractère «directionnel». Dès que l'atome d'hydrogène présent entre deux atomes d'oxygène (il est relié à l'un d'eux par une liaison covalente et à l'autre par une liaison hydrogène) s'écarte un peu de l'axe O–H–...O, l'énergie attractive décroît. Or, cet atome d'hydrogène étant très mobile à cause de sa petite masse, il s'écarte souvent de l'axe. Lorsque l'angle O–H–...O atteint environ 30 degrés, l'agitation thermique l'emporte, et la liaison hydrogène se rompt. Or cette dernière «attache» les molécules, mais elle tend aussi à les éloigner les unes des autres, car sa longueur est fixe (0,18 nanomètre), soit pratiquement le double de la distance de la liaison covalente. Quand une liaison hydrogène se rompt, les deux molécules initialement maintenues à distance peuvent se rapprocher.

C'est précisément pourquoi la glace est moins dense que l'eau et la raison pour laquelle la densité de l'eau passe par un maximum à 4 °C : plus les liaisons hydrogène sont nombreuses, moins l'eau est dense. Quand l'organisation est quasi parfaite, comme dans le cas de la glace cristalline, la densité est inférieure de 10 pour cent à celle de l'eau liquide à 0 °C. En revanche, pour que de la glace cristalline fonde et devienne de l'eau liquide, il faut qu'environ 30 pour cent des liaisons hydrogène soient rompues. La figure de base du réseau de la glace cristalline est un tétraèdre. Si, au-dessous de 0 °C, ce motif se répète à l'infini, quand la glace fond, des mailles tétraédriques, voire des groupes de mailles, sont conservées au sein de l'eau liquide et coexistent avec des molécules isolées. On peut établir que le nombre de liaisons hydrogène décroît linéairement avec la température. D'environ 1,26 par molécule à température ambiante, ce nombre est encore de 0,6 à 100 °C, ce qui correspond respectivement à 63 pour cent et à 30 pour cent du nombre total des liaisons possibles.

Lorsque l'on augmente progressivement la température de l'eau, sa densité passe par un maximum à 4 °C, puis le nombre de liaisons diminue progressivement. Cela tient à l'équilibre qui s'établit au sein du liquide entre les liaisons hydrogène et l'agitation thermique qui les détruit : quand on passe de la glace à l'eau liquide, on rompt une proportion de liaisons hydrogène suffisante pour que le réseau cristallin s'effondre. Toutefois, toutes les liaisons hydrogène ne sont pas détruites, comme nous l'avons souligné. À mesure que la température augmente, des liaisons se rompent, et les molé-



passse par un maximum, puis diminue progressivement.

Ce comportement explique aussi pourquoi la capacité calorifique de l'eau est si élevée. Comme l'indiquent les nombres de liaisons par molécules cités plus haut, pour faire passer une masse d'eau de 0 °C à 100 °C, il faut lui fournir assez d'énergie thermique pour briser une liaison par molécule au moins. Chaque molécule d'eau est entourée de quatre voisines. Dans les autres liquides, le nombre de voisins est, en général, plus grand ; il atteint même dix dans les liquides atomiques (l'argon liquide par exemple). Ainsi, au sein de l'eau un grand «volume libre» est disponible, où prennent place les vibrations internes à chaque molécule d'eau.

Des liaisons de courte durée

Plusieurs mécanismes peuvent rompre les liaisons hydrogène : les mouvements d'élongation de la liaison par éloignement des molécules, la rotation des molécules les unes par rapport aux autres ou encore les modifications des angles des liaisons interatomiques. Les physiciens ont déterminé la durée de vie de ces liaisons à l'aide de lasers à impulsions ultra-brèves. Cette durée de vie n'excède pas une picoseconde, c'est-à-dire un millionième de millionième de seconde.

La liaison hydrogène est responsable d'autres propriétés de l'eau. Ce liquide est un réseau très étendu de telles liaisons, qui se forment et se rompent continûment. Une picoseconde suffit pour que ce réseau évolue. L'eau semble donc solide quand on la considère à une échelle de temps de l'ordre de la picoseconde. Plusieurs expériences ont mis en évidence l'existence de ce «gel instantané». Ainsi, Francesco Sette a utilisé le rayonnement du synchrotron de Grenoble pour étudier la propagation du son dans l'eau. Il a prouvé que, si la fréquence de l'onde sonore est suffisamment élevée pour que la structure du réseau des liaisons hydrogène ne change pas pendant une ou plusieurs périodes, l'onde sonore se propage comme dans un solide, qu'elle perturbe localement, de proche en proche.

Si la liaison hydrogène explique si bien les propriétés de l'eau à température ambiante, est-ce le cas aussi à basse température ? Ses propriétés livrent effectivement une explication qualitative du comportement de l'eau surfondue au voisinage de la température de la nucléation homogène. Le nombre de liaisons hydrogène augmente quand la température baisse. La tendance à la gélification de l'eau surfondue aussi. Piégées par leurs voisines auxquelles les lient de plus en plus de liaisons hydrogène, les molécules d'eau se déplacent de moins en moins. Le liquide se gélifie, et sa viscosité augmente. En outre, les liaisons hydrogène imposent naturellement une géométrie cristalline à mailles tétraédriques au réseau de molécules. Ainsi, au moment même où l'eau liquide tend à cristalliser, sa viscosité augmente : le passage par la température de nucléation homogène correspond à une forte augmentation de la viscosité. Toutefois, pour tous les autres corps, nous l'avons rappelé, la viscosité augmente à la transition vitreuse. Pourquoi en est-on si loin à -40°C ? Pour l'eau, entre la température de nucléation homogène (-40°C) et celle de transition vitreuse (-135°C) s'étend un vaste «no man's land», une zone inexplorée, où l'on s'aventure difficilement.

Une glace compacte

Plusieurs théories sur le comportement de l'eau dans cette zone se sont succédé depuis 30 ans. La plus connue fut celle que Robin Speedy et Austen Angell émirent lorsqu'ils étaient à l'Université de Purdue dans l'Illinois. En 1976, ces physiciens ont proposé l'existence

d'une limite au-delà de laquelle l'eau surfondue cesse d'exister ; ils ont ajouté une «ligne spinodale» sur le diagramme de phase de l'eau. Sur un tel diagramme, les états stables d'un corps sont indiqués en fonction de la température et de la pression ; des frontières, les «lignes de coexistence» (ou lignes d'équilibre) séparent les domaines d'existence des différents états (ou phases) possibles. De telles lignes de coexistence marquent, par exemple, la séparation de l'état liquide et de l'état solide, ou encore celle de l'état liquide et de l'état gazeux.

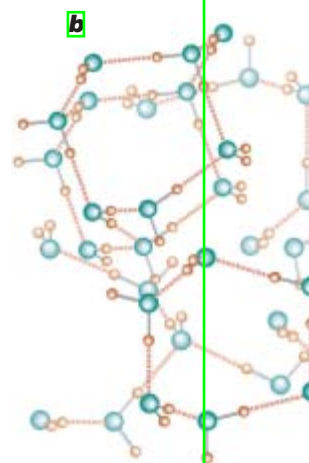
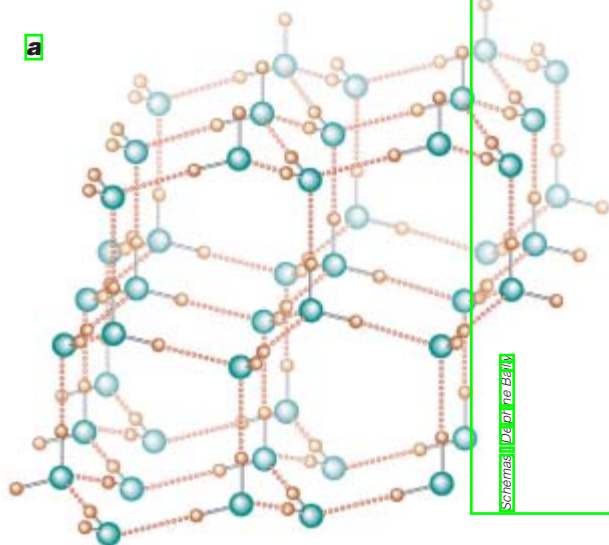
Les diagrammes de phase portent aussi des lignes spinodales qui marquent la limite au-delà de laquelle une phase métastable ne peut plus exister ; de telles lignes se trouvent toujours en retrait d'une ligne de coexistence, telle celle qui se trouve au-dessous de la ligne de coexistence des phases liquide et gazeuse, par exemple (voir la figure 5). R. Speedy et A. Angell ont traduit ce que l'on observe sur le diagramme pression-température : l'eau surfondue finit toujours par disparaître à une certaine température (du moins disparaît-elle toujours vers -40°C , sous une pression de une atmosphère). R. Speedy et A. Angell l'ont connectée à la ligne spinodale qui sépare le liquide surchauffé et la vapeur d'eau par une courbe située dans la région des pressions négatives. Rappelons que certains liquides peuvent être surchauffés et persister au-delà de la ligne de coexistence liquide-gaz ; la ligne spinodale liquide-gaz délimite le seuil au-delà duquel, quelles que soient les précautions prises, un liquide surchauffé se transforme inmanquablement en vapeur.

Quelque peu «théorique», cette explication du comportement étrange de l'eau à basse température ne faisait pas appel à la physique moléculaire. À la fin des années 1970, elle ne contredisait pas encore les modèles thermodynamiques. Si la glace vitreuse était déjà connue à l'époque, on ne savait la préparer que par condensation de vapeur sur un substrat à très basse température. Aucun moyen n'était encore connu pour passer directement de l'état liquide (eau surfondue) à celui de glace vitreuse (un liquide figé). C'en est

qu'en 1980, que P. Brüggeller et Erwin Meyer, à Vienne, puis Jacques Dubochet, à Lausanne, réalisèrent les premières expériences de trempe rapide et produisirent ainsi de la glace vitreuse à l'issue d'un processus d'évolution continu à partir de la phase liquide de l'eau. Cette découverte contredisait le modèle de R. Speedy et A. Angell, car les thermodynamiciens savent bien qu'une ligne spinodale ne peut être franchie. Or de la glace vitreuse avait été produite à partir de l'eau liquide, donc la ligne spinodale de R. Speedy et A. Angell n'existait pas !

À la pression atmosphérique normale, la ligne spinodale dont R. Speedy et A. Angell postulaient l'existence passe par un point dont la température est égale à -45°C , c'est-à-dire dix degrés en dessous des dernières températures accessibles à l'expérience. Les mesures réalisées aux plus basses températures accessibles montrèrent que la viscosité est multipliée par un facteur 10 entre 20°C et -20°C , alors que, pour les autres corps, elle est normalement multipliée par un facteur 10^{15} à la transition vitreuse ! Force était de conclure qu'à -20°C , on est loin de cette transition.

En 1984, une découverte allait orienter les physiciens vers une nouvelle hypothèse, celle d'un mélange de deux liquides dans le domaine compris entre -40°C et -135°C . O. Mishima, L. Calvert et E. Whalley ont comprimé de la glace cristalline usuelle (à maille hexagonale) sous 12 000 fois la pression atmosphérique normale à la température de l'azote liquide (-196°C). Ils ont constaté une spectaculaire réduction du volume de la glace, qui persiste quand on revient à la pression atmosphérique normale (en maintenant la température à -196°C). Des mesures aux rayons X ont révélé que cette glace a une structure vitreuse. On avait ainsi obtenu une nouvelle forme de glace, vitreuse et de densité très élevée. Les mesures effectuées ultérieurement montrèrent que, malgré sa grande densité, chaque molécule de cette glace vitreuse n'a que quatre voisines en moyenne,



comme dans les états plus «classiques» de l'eau. La densification du réseau moléculaire tient plus à des modifications structurales : les angles sont modifiés, de sorte que l'ordre tétraédrique s'arrête dès les premières molécules voisines d'une molécule d'eau. Notons que, même si les liaisons hydrogène y sont très déformées, elles persistent toutes dans cette glace vitreuse à haute densité étant donné la basse température.

De quelles modifications structurales s'agit-il ? Pour que la densité augmente, il faut que de nombreuses liaisons hydrogène s'effondrent ; le réseau moléculaire se fige alors dans un état métastable. La densité de cette nouvelle forme de glace atteint 1,25 gramme par centimètre cube, soit 30 pour cent de plus que la glace ordinaire ! Quand on réchauffe cette

glace vitreuse de haute densité à la pression atmosphérique, jusqu'à -148°C , elle se transforme en glace vitreuse de basse densité, puis en glace cristalline à réseau cubique et enfin en glace cristalline à réseau hexagonal. On a proposé l'existence de relations entre la glace vitreuse à haute densité et les différentes

formes de glace cristalline (plus de dix sont connues !), mais la question reste ouverte. De plus, on s'interroge sur les relations entre les glaces vitreuses de basse densité obtenues par trempe rapide ou par dépôt de vapeur. On pense même que la glace vitreuse de basse densité obtenue par réchauffement de la glace vitreuse de haute densité aurait une structure particulière. Combien de formes de glaces vitreuses existe-t-il ?

L'existence de cette glace de haute densité à la pression atmosphérique a fait renaître l'idée que l'eau serait le mélange de deux phases. Dès 1892, Röntgen proposait que l'eau serait le mélange d'un liquide idéal aux propriétés normales et de petits amas de glace de densité inférieure. Selon ce premier modèle de mélange, la concentration de ces amas augmenterait quand la température décroît ce qui explique bien, par exemple, que la densité de l'eau passe par un maximum à

4°C . Malgré son intérêt, le modèle de Röntgen a été abandonné, parce qu'il fut contredit par l'expérience.

Le modèle de mélange

Abandonné lui aussi, le modèle de R. Speedy et A. Angell a surtout été contredit par l'expérience de diffusion des rayons X aux petits angles par l'eau. On démontre que seules les fluctuations de la densité d'un liquide homogène contribuent à la diffusion des rayons X aux petits angles ; l'intensité diffusée est proportionnelle à la compressibilité. Dans l'hypothèse où deux phases de densités différentes coexistent, chacune d'elles contribue à la diffusion de rayons X aux petits angles. Malgré la multiplication des expériences, les résultats des mesures n'ont jamais mis en évidence la présence d'une seconde phase.

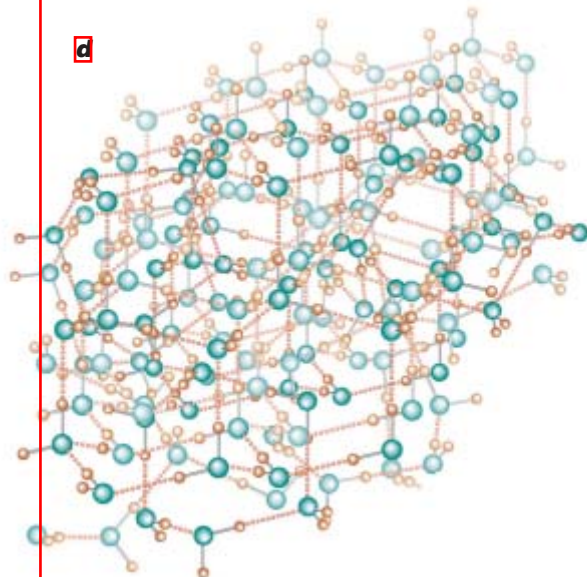
Pourtant O. Mishima et E. Stanley ont relancé le modèle du mélange, en se limitant entre -40°C et -135°C . Selon eux, le modèle n'est pas valable à température ambiante, mais il pourrait s'appliquer aux états liquides métastables de l'eau au-dessous de -40°C . Les deux formes de glace vitreuse (à haute et à basse densité) existeraient «potentiellement» au-dessus de -135°C . En d'autres termes, puisque deux formes de glace vitreuse existent au-dessous de la température de transition vitreuse, elles existent sans doute à l'état métastable au-dessus de cette température, exactement comme l'eau liquide surfondue existe au-dessous de 0°C . Dans le diagramme de phase, une ligne séparerait ces deux états et s'achèverait par un point dit «critique», comparable à celui qui termine la ligne de séparation de la phase liquide et de la phase gazeuse. On estime que ce point critique se situerait à une température égale à -50°C et à une pression égale à 1 000 fois la pression atmosphérique normale.

Une telle température expliquerait bien la divergence de la viscosité de l'eau vers -40°C . En effet, les grandeurs thermodynamiques qui caractérisent un corps divergent toujours au voisinage d'un point critique. Selon O. Mishima et E. Stanley, le comportement de l'eau surfondue ne ferait que



manifestar la présence de ce point critique, par ailleurs inaccessible aux expériences. Pour le moment, seules des simulations de la dynamique moléculaire de l'eau dans la région critique et quelques expériences sur la glace à haute densité sont en faveur du point de vue de O. Mishima et E. Stanley.

Les théories émises depuis 30 ans pour expliquer les étranges transitions de phase de l'eau ont un point faible : elles sont trop spéculatives. Ces théories sont fondées sur des hypothèses



4. LA COHESION du réseau des molécules d'eau change selon l'état. Dans l'état solide (a), l'arrangement est très régulier selon un réseau hexagonal. Les liaisons hydrogène imposent une telle distance entre les molécules que le réseau est lacunaire. La densité de la glace est inférieure à celle de l'eau. Lorsque l'agitation thermique rompt une partie de ces liaisons, le réseau se désagrége et la glace devient de l'eau liquide (b). À mesure que l'on continue à augmenter la température, de plus en plus de liaisons hydrogène sont rompues et l'eau se transforme en vapeur (c). Au contraire, aux très basses températures, une glace de très haute densité existe : les tétraèdres, qui caractérisent la glace cristalline, sont déformés et comprimés (d).

purement thermodynamiques, que les expériences n'ont pas confirmées. Or, les expérimentateurs étudient depuis longtemps les propriétés de la molécule d'eau. Ils ont, notamment, mesuré au mieux la durée de vie de la liaison hydrogène et étudié la façon dont elle dépend de la température. Ils espéraient ainsi mettre en évidence un comportement particulier de cette liaison, susceptible d'expliquer la divergence de la viscosité de l'eau aux alentours de la température de nucléation homogène.

L'explication moléculaire

Ainsi, récemment, Geoffrey Gale, Savo Bratos et leurs collaborateurs de l'École polytechnique ont utilisé des lasers à impulsions ultra-brèves (dix milliardièmes de milliardième de seconde) pour «filmer» le retour à la position d'équilibre d'un atome d'hydrogène engagé dans une liaison. Leur expérience montre de quelle façon l'atome d'hydrogène revient à sa distance d'équilibre de 0,18 nanomètre après qu'il en a été écarté. G. Gale et S. Bratos ont trouvé que ce retour se fait en 0,7 picoseconde environ. De manière plus indirecte, des expériences de diffusion quasi élastique de neutrons avaient permis, dès 1982, d'évaluer la durée de vie d'une liaison (une picoseconde) et, surtout, d'établir de quelle façon, elle dépend de la température (jusqu'à -20°C). Tous ces résultats montrent que la durée de vie de la liaison ne présente aucune anomalie susceptible d'expliquer la divergence de la viscosité à la température de nucléation. Il s'agit là de la seule propriété de l'eau qui ne soit pas une anomalie à basse température!

Depuis ces expériences, de nombreuses simulations des mouvements moléculaires ont été mises au point pour reproduire les résultats des mesures de la durée de vie de la liaison hydrogène et les extrapoler à des températures inférieures. Toutefois, les définitions de la durée de vie de la liaison hydrogène et des forces qu'elle représente varient d'un modèle à l'autre. Notons, en outre, que les résultats expérimentaux obtenus grâce aux expériences de diffusion de neutrons sont difficiles à interpréter, car deux phénomènes contribuent simultanément à la diffusion des neutrons : d'une part, les mouvements engendrés par la formation et la disparition constantes de liaisons hydrogène et, d'autre part,

les mouvements moléculaires d'ensemble dus à la diffusion des molécules.

C'est pourquoi, nous avons proposé puis utilisé une nouvelle méthode pour évaluer la durée de vie et la dynamique de la liaison hydrogène. Nous avons répété l'expérience de diffusion de neutrons par l'eau aux petits angles en utilisant de l'eau lourde, c'est-à-dire de l'eau où les atomes d'hydrogène ont été remplacés par des atomes de deutérium (un atome d'hydrogène dont le noyau comporte un neutron). Les neutrons sont alors surtout diffusés par les paires d'atomes qui se trouvent dans le liquide, c'est-à-dire les paires oxygène-oxygène, oxygène-deutérium et deutérium-deutérium. La contribution de chacune des paires possibles varie avec l'angle auquel on mesure l'intensité diffusée. Ainsi, quand on mesure sous un angle qui livre la contribution de la paire oxygène-oxygène, c'est essentiellement la contribution de la diffusion moléculaire que l'on perçoit. En revanche, l'intensité mesurée à un angle où ce sont les paires deutérium-deutérium qui dominent, livre les effets des mouvements des atomes de deutérium, donc les effets de la liaison hydrogène. Cette méthode a l'avantage de mettre en évidence les mouvements dus à la formation et à la disparition de nombreuses liaisons hydrogène dans le liquide.

On déduit de ces mesures que la diffusion moléculaire, donc la viscosité, changent rapidement avec la température. Ce résultat n'a rien d'étonnant, dans la mesure où l'agitation thermique modifie le nombre de liaisons entre molécules. En revanche, les mesures se rapportant à la liaison hydrogène montrent que sa durée de vie dépend très peu de la température. Même à -40°C , cette durée est toujours très courte. Elle ne suit donc pas la divergence de la viscosité et ne saurait être évoquée pour l'expliquer.

Les résultats obtenus révèlent qu'une analogie existe entre le comportement moléculaire de l'eau et celui des polymères. Comme l'eau, les polymères sont des corps caractérisés par de nombreuses liaisons. Un polymère est un enchaînement de monomères, c'est-à-dire de molécules identiques reliées les unes aux autres. Ainsi, le polybutadiène est formé par l'enchaînement de nombreux monomères ayant tous la même composition ($-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-$). Les mouvements de cette longue chaîne sont caractérisés par deux «temps de relaxa-

tion» (la durée du retour à l'équilibre). Le premier temps de relaxation, dit temps de relaxation alpha, correspond aux mouvements du squelette de la chaîne polymérique ; le second, dit temps de relaxation bêta, correspond à ceux des ramifications greffées sur le squelette. Les mouvements du squelette sont relativement lents et dépendent beaucoup de la température. Or, les polymères passent aussi par une transition vitreuse lorsqu'on abaisse la température (-95°C pour le polybutadiène) ; quand la température tend vers celle de la transition vitreuse, le temps de relaxation alpha diverge, c'est-à-dire que les mouvements du squelette deviennent infiniment lents.

Le modèle des polymères

Quant aux mouvements rapides autour des liaisons simples, ils se déroulent sur des durées caractéristiques bien plus courtes et dépendent peu de la température : en 1998, Dieter Richter, du Centre de recherche de Jülich, en Allemagne, a séparé les contributions des deux types de mouvements au cours d'expériences de diffusion de neutrons au sein de polymères. Il a mis en évidence qu'à ces deux types de «dynamiques» correspondent des temps de relaxation différents. Dans les applications industrielles, le comportement du polymère est commandé par les mouvements de la chaîne, c'est-à-dire par le temps de relaxation alpha et par la température de transition vitreuse. Au-dessous de cette température, le polymère a l'aspect et les propriétés d'un solide, même si, au niveau moléculaire, la dynamique liée aux mouvements de type bêta est toujours présente. Les propriétés ne sont pas modifiées lors du passage par la température de transition vitreuse.

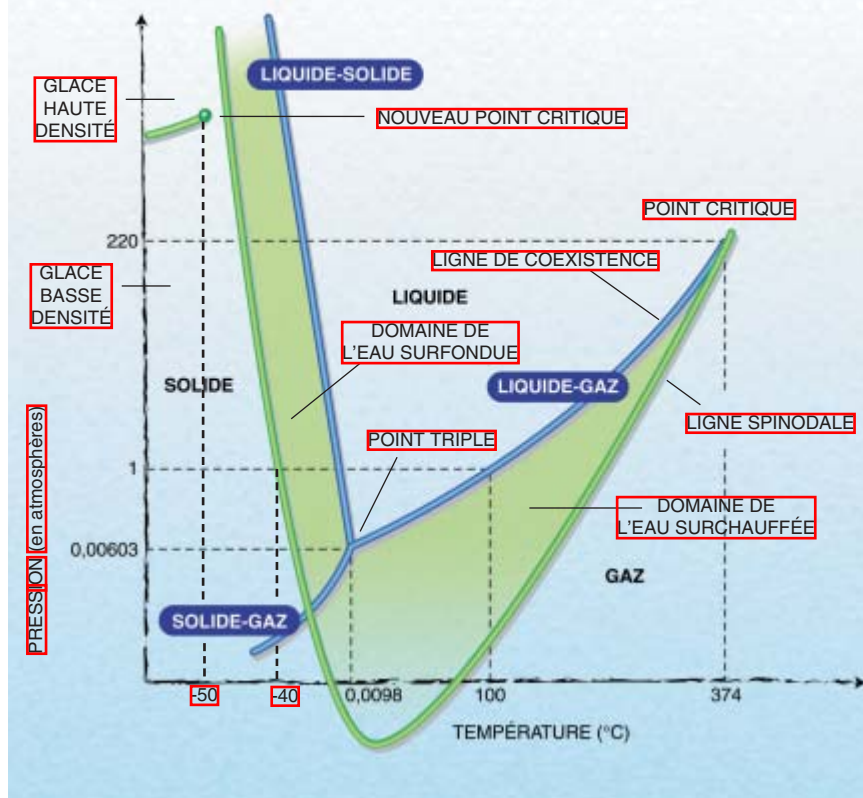
Peut-on tenter une analogie entre le comportement moléculaire des polymères et celui de l'eau ? Comme un polymère, l'eau est un réseau étendu, quasi infini, de liaisons hydrogène. Diverses mesures montrent que deux durées caractérisent les mouvements des molécules d'eau et qu'un scénario analogue à celui de la relaxation des polymères s'applique à l'eau. La durée la plus longue dépend de la température et passe de 1 à 20 picosecondes entre 20°C et -20°C . Elle représente la durée moyenne pendant laquelle une molécule reste piégée par ses proches voisines. Cette durée augmente à mesure que l'agitation thermique faiblit et que

la température baisse. En outre, elle est proportionnelle à la viscosité, puisque plus la viscosité augmente, plus les mouvements ralentissent. La durée la plus courte est d'environ une picoseconde, quelle que soit la température. Elle est du même ordre de grandeur que la durée de vie de la liaison hydrogène et correspond au phénomène de rupture et de formation incessantes de ces liaisons.

Les mouvements d'ensemble des molécules d'eau, c'est-à-dire les chocs entre molécules, la diffusion des molécules ou encore les déformations des mailles qu'elles forment, correspondent à la relaxation alpha des polymères. Pour sa part, l'arrêt de la formation et de la destruction incessantes des liaisons hydrogène correspond à la relaxation bêta des polymères. Les physiciens n'ont pu poursuivre jusqu'à la température de nucléation homogène l'étude de l'évolution du temps caractéristique des mouvements moléculaires d'ensemble. Toutefois, ils extrapolent les mesures faites jusqu'à -20°C , notamment celles de la viscosité. Ce travail indique une divergence de la viscosité (et donc du temps caractéristique) vers la température de nucléation homogène, c'est-à-dire vers -45°C .

On comprend alors que, si les mouvements d'ensemble des molécules d'eau étaient les seuls mis en jeu, cette température serait effectivement la température de transition vitreuse : celle à laquelle l'eau se fige ! Il n'en est rien, car les molécules d'eau peuvent aussi subir d'autres mouvements beaucoup plus rapides : ceux qu'occasionnent la formation et la destruction incessantes de liaisons hydrogène. Ce sont bien ces mouvements qui déterminent le comportement de l'eau entre -40°C et -135°C . Dans la partie supérieure de cette plage, vers -35°C , le comportement de la viscosité de l'eau est encore dominé par le mode alpha, mais, très rapidement, le mode bêta impose des mouvements (une dynamique) qui dépendent plus faiblement de la température.

Cette explication du comportement de l'eau est tout aussi spéculative que celle de O. Mishima et E. Stanley en ce qui concerne le «no man's land», la région où les résultats expérimentaux sont inexistantes. Elle a toutefois trois avantages : d'une part, elle donne une explication plausible du fait que la température de divergence de la viscosité coïncide avec la température de nucléation ; ensuite, elle s'appuie sur des observations microscopiques



5. CE DIAGRAMME DE PHASE indique les zones d'existence de la glace, de l'eau liquide ou de la vapeur d'eau en fonction de la température et de la pression. Ces zones d'existence sont séparées par des lignes de coexistence (en bleu). La ligne de coexistence liquide-gaz se termine sur le point critique. Au-delà de ce point, l'eau est supercritique, dans un état qui n'est ni un gaz ni un liquide. Les trois lignes de coexistence se croisent au point triple. L'eau est parfois dans un état métastable (dans la région verte) : elle reste liquide au-dessous de la ligne de coexistence liquide-solide et gazeuse au-delà de la ligne de coexistence liquide-gaz. La ligne spinodale (en vert) indique la limite des états métastables : quelles que soient les précautions prises, au-delà de cette ligne, le liquide se transforme inmanquablement en glace (à gauche) ou en vapeur (à gauche). Aux très basses températures deux états de glace amorphe semblent coexister : un état à basse densité et un état à haute densité. Ils seraient séparés par une courte ligne spinodale (en haut à gauche).

faites par les physiciens ; enfin, elle procède par analogie avec les polymères au lieu d'invoquer des notions abstraites, telle une ligne spinodale ou un nouveau point critique.

De nouvelles expériences diront si les deux théories évoquées sont incompatibles ou, au contraire, si elles sont les deux facettes d'une même médaille. Apparue au cours de la dernière décennie du XX^e siècle, les lasers femtoseconde rendent possible la mesure de phénomènes ultra-brefs ; ils sont l'instrument idéal pour étudier plus avant la liaison hydrogène, qui, nous l'avons vu, joue toujours un rôle

dans le comportement de l'eau. Grâce à ces études, les théoriciens pourront mettre au point des potentiels plus réalistes pour décrire la liaison hydrogène. Ces potentiels sont indispensables pour simuler correctement les comportements thermodynamiques de l'eau à toutes les températures accessibles à l'expérience, vers -40°C notamment. Vers -135°C , le flux très intense du rayonnement synchrotron constitue un bon instrument pour suivre en direct la structure de l'eau pendant la transition vitreuse. Saurons-nous bientôt à quoi ressemble vraiment l'eau entre -40°C et -135°C ?

José TEIXEIRA est directeur de recherche au CNRS et directeur adjoint du Laboratoire mixte CNRS/CEA Léon Brillouin, à Saclay, où il mène ses recherches.

J. Teixeira et Alenka Luzar, *Physics of liquid Water. Structure and dynamics*, in *Hydration Process in Biology : Theoretical and Experimental Approaches*, NATO ASI

Series, sous la direction de M.-C. Bellissent-Funel, pp. 35-65, IOS Press, Amsterdam, 1999.

O. MISHIMA et E. STANLEY, *The relationships between liquid, supercooled and glass water*, in *Nature*, vol. 396, pp. 329-335, 1998.

P. RICHET, *Les bases physiques de la thermodynamique*, éditions Belin, 2000.

La jaune et la rouge

DENNIS SHASHA

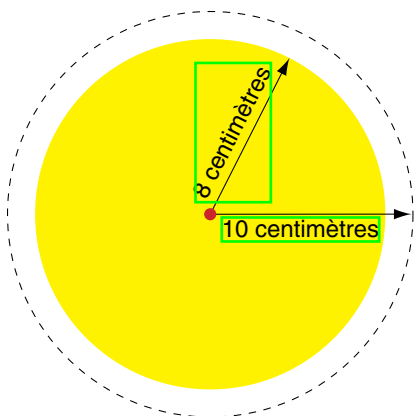
Où l'imagination du lecteur sera mise à l'épreuve pour trouver une configuration géométrique adéquate.

Prenez une figure géométrique dont une partie est colorée en jaune et l'autre en rouge. Lorsque cette figure contient au moins un point rouge et un point jaune distants d'exactly 10 centimètres, les mathématiciens disent, dans leur jargon abstrait, qu'elle satisfait la condition des 10 centimètres. Le choix de ces deux couleurs est évidemment arbitraire, mais les polytechniciens, friands de jeux mathématiques, y retrouveront la dénomination de leurs promotions successives. Petite question annexe : quelle était la couleur de la promotion du plus célèbre polytechnicien, Henri Poincaré ?

L'idée du jeu d'aujourd'hui consiste à prendre une figure simple, tels une ligne ou un disque, et de déterminer une coloration en rouge et en jaune pour laquelle la condition des 10 centimètres n'est pas satisfaite, c'est-à-dire qu'aucun point rouge n'est distant de 10 centimètres d'un point jaune. Ce n'est pas aussi facile qu'il paraît.

Pour nous entraîner, prenons un segment. Pouvez-vous le colorier en rouge et en jaune de façon à ce qu'il ne satisfasse pas la «condition des 10 centimètres»? Supposons que le segment fasse un mètre de longueur : 0 marque l'extrémité gauche et 100, celle de droite (voir la figure 1). Coloriez les intervalles suivants en rouge : 0-1, 9-11, 19-21, 29-31, 39-41, 49-51, 59-61, 69-71, 79-81, 89-91 et 99-100. Puis coloriez les intervalles restants en jaune. Chaque point de ce segment a la même couleur que celui placé à 10 centimètres à sa gauche ou à sa droite. Ainsi colorié, le segment ne satisfait pas la condition des 10 centimètres !

Essayons maintenant avec un disque. Pouvez-vous colorier en rouge et en

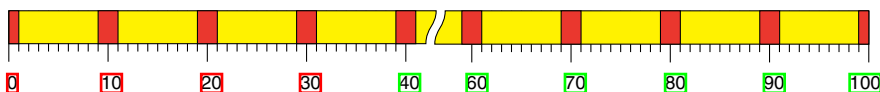


2. Un disque d'un rayon inférieur à 10 centimètres peut être colorié en rouge et en jaune de façon à ce qu'aucun couple de points de couleurs différentes ne soient distant d'exactly 10 centimètres : il suffit de colorier le centre en rouge et le reste du disque en jaune.

jaune un disque d'un rayon inférieur à 10 centimètres, afin qu'il ne satisfasse pas la condition des 10 centimètres? La réponse est également oui. Coloriez simplement le centre du disque en rouge et le reste en jaune. Tout point éloigné de 10 centimètres du centre rouge du disque est à l'extérieur de ce disque.

Qu'en est-il des disques plus grands? C'est l'objet de la question. Pour un disque d'un rayon égal ou supérieur à 10 centimètres, trouvez une coloration en rouge et en jaune qui ne satisfait pas la condition des 10 centimètres. Si elle n'existe pas, prouvez-le. Pour vous aider, souvenez-vous que selon la règle du jeu, au moins un point du disque doit être rouge et, au moins un autre, jaune.

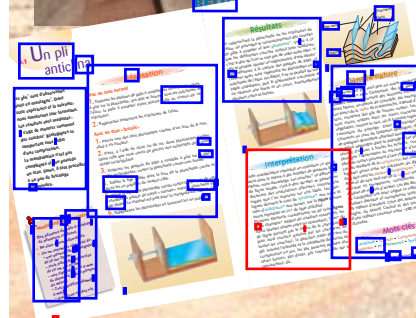
La solution de cette énigme sera donnée le mois prochain, et sera bientôt disponible sur notre site internet : www.pourlascience.com.



1. La coloration en rouge et jaune de ce segment de un mètre de longueur ne satisfait pas la «condition des 10 centimètres» : aucun point d'une couleur n'est distant d'exactly 10 centimètres d'un point de l'autre couleur.

LA TERRE

50 expériences pour découvrir notre planète



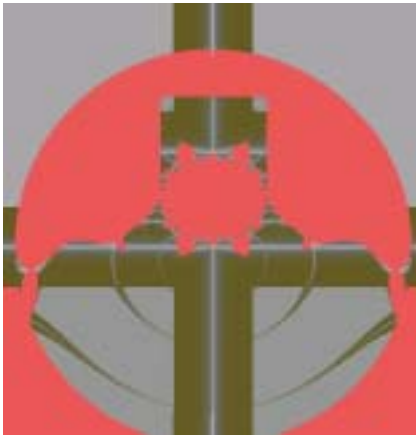
Comment naissent les dunes ?
Comment une rivière creuse-t-elle une vallée ?
Comment se forment les grottes ?
Pourquoi les pierres éclatent-elles sous le froid ?
Ce livre propose une série d'expériences pour comprendre comment le vent, la pluie, la glace, les cours d'eau modèlent le visage de la Terre.

ANDRÉ PROST est géologue, ancien enseignant à l'université d'Orléans et à Paris VI, et ingénieur au Bureau des Recherches Géologiques et Minières à Orléans.

Code 002401-100 F-128 pages

Voir bon de commande page 96

BELIN • POUR LA SCIENCE



Le beau doit-il être complexe?

JEAN-PAUL DELAHAYE

Le plus ou moins grand dépouillement de l'art peut être chiffré. La théorie mathématique de la complexité peut-elle nous aider à comprendre l'art ?

Affirmer qu'art et science sont deux domaines étrangers est un lieu commun. Il n'est pas besoin de connaître les mathématiques pour créer un objet d'art et nul sens artistique n'est nécessaire pour mener une recherche scientifique ou démontrer un théorème. On sait, bien sûr, qu'il est vain de rechercher «une équation du beau» ou même seulement des critères mathématiques de la beauté.

Pourtant, les études sur $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ ou le nombre d'or $\Phi = (1 + \sqrt{5})/2$, les merveilles des arts géométriques et décoratifs, la subtilité des tracés préalables des peintres, et plus récemment l'éblouissante beauté des objets fractals tout droit sortis de l'étude des systèmes dynamiques, suggèrent que quelques ponts existent entre artistes et scientifiques. Des théoriciens téméraires vont plus loin et proposent (dans le domaine de la musique en particulier) des méthodes algorithmiques pour produire des œuvres d'art, et conçoivent des formules mathématiques pour mesurer la beauté de certains objets.

Nous ne reviendrons pas sur les considérations souvent excessives et peu convaincantes que de nombreux ouvrages – que l'on trouve au rayon ésotérisme des librairies – consacrent au nombre d'or (voir l'article de cette rubrique en août 1999).

ou sur l'usage des constructions géométriques utilisées en peinture et en architecture ; nous nous concentrerons sur la question plus contemporaine des rapports entre la complexité et l'art. Cette question grâce aux développements récents de la théorie du calcul a pris une tournure nouvelle intéressante.

CE QUI EST TRÈS SIMPLE PEUT-IL ÊTRE BEAU?

À l'opposé du complexe se trouve le simple et le siècle qui vient de se terminer – si prompt dans le domaine de l'art à prendre toute idée minuscule pour une marque de génie – y a bien sûr été de sa provocation sur le thème de la simplicité.

Le mouvement de l'art minimal ou minimalisme (apparenté à l'art conceptuel) a connu une certaine vogue dans les années 1960. Il propose comme œuvres d'art des objets d'une banalité totale. Non pas en exhibant des objets du monde quotidien, comme le fit Marcel Duchamp avec un urinoir ou un porte-bouteilles de récupération qu'il exposa comme œuvres originales (on peut trouver intéressantes les formes complexes de ces objets), mais en proposant des objets si simples que quelques mots suffisent à les décrire totalement. Parmi les œuvres que produisirent les

artistes géniaux du mouvement minimaliste, certaines, par leur perfection absolue, doivent être connues d'un large public.

En peinture, le précurseur du mouvement minimalisme fut le peintre russe Kasimir Malevitch auteur du manifeste suprématisme. En 1913, il peint un *Carré noir sur fond blanc* exposé aujourd'hui au Musée de Saint-Petersbourg (le carré blanc du cadre et le carré noir ont le même centre et la même orientation, le côté du carré noir valant 0,8 fois celui du cadre). Dans l'ouvrage encyclopédique Hachette *L'aventure de l'Art au XX^e siècle* l'auteur de l'article sur le suprématisme de Malevitch écrit : «Il aura fallu au fougueux colosse du courage pour repousser aussi loin – et dans une solitude presque totale – les frontières de la création.» Pourtant Malevitch fit un pas supplémentaire : en 1918, il propose au public une toile dénommée *Carré blanc sur un fond blanc*. Aussi radicale que paraisse cette avancée esthétique du révolutionnaire russe, elle laisse un goût d'inachevé car le carré blanc (penché de 15 degrés et coincé dans un angle) se détache trop clairement sur le fond blanc (en réalité légèrement gris) de sa toile.

Trente années s'écoulèrent avant que l'étape suivante ne soit franchie par le peintre italien Lucio Fontana qui, en 1946,

Extrait de la pièce de Yasmina Reza. Art.

Devant le tableau blanc acheté par Serge, ses deux amis, Marc et Yvan, échangent leurs impressions :

Yvan. Tu vas être étonné...
Marc. Oui...
Yvan. Je n'ai pas aimé... mais je n'ai pas détesté ce tableau.
Marc. Bien sûr. On ne peut pas détester l'invisible, on ne déteste pas le rien.
Yvan. Non, non, il y a quelque chose...
Marc. Qu'est-ce qu'il y a ?
Yvan. Il y a quelque chose. Ce n'est pas rien.
Marc. Tu plaisantes ?
Yvan. Je ne suis pas aussi sévère que toi. C'est une œuvre, il y a une pensée derrière ça.
Marc. Une pensée !

Yvan. Une pensée.
Marc. Et quelle pensée ?
Yvan. De l'accomplissement d'un cheminement...
Marc. Ah ! ah ! ah !
Yvan. Ce n'est pas un tableau fait par hasard, c'est une œuvre qui s'inscrit à l'intérieur d'un parcours....
Marc. Ah ! ah ! ah !
Yvan. Ris, Ris
Marc. Tu répètes toutes les conneries de Serge! Chez lui, c'est navrant mais chez toi, c'est d'un comique !
Yvan. Tu sais Marc, tu devrais te méfier de ta suffisance. Tu deviens aigri et antipathique...

COMPLEXITÉ DE KOLMOGOROV ET VALEUR ESTHÉTIQUE

La complexité de Kolmogorov d'une oeuvre d'art est la taille du plus petit programme d'ordinateur qui permet de spécifier complètement cette oeuvre d'art.

La complexité de Kolmogorov peut servir à exprimer notre désir qu'une oeuvre ne soit pas trop simple : pour pouvoir prétendre être une oeuvre d'art un objet doit dépasser un seuil de complexité de Kolmogorov. Ce seuil est sans doute autour de 100 bits. Il ne faut cependant pas déduire de l'existence de ce seuil que plus la complexité de Kolmogorov est grande, plus un objet a des chances de paraître beau.



Les images 1 et 2 ont une complexité de Kolmogorov à peu de chose près égale. Pourtant, tout le monde s'accordera à trouver que l'image 1 est plus belle que l'image 2. La beauté n'est pas liée seulement à la complexité de Kolmogorov.

prix entre 1500 et 12000 dollars pour les monochromes de Reinhardt). Le mouvement minimaliste nous intéresse car il nous conduit à la question : un objet très simple, complètement décrit par quelques mots peut-il être considéré comme beau ? Là encore, la quasi totalité de l'humanité répond sans hésitation : non. Si la définition d'un objet se réduit à trois fois rien, si n'importe qui peut s'en faire facilement une copie, cet objet n'est ni beau ni laid. L'objet esthétique doit comporter un minimum de contenu informationnel : le vide, le rien, le néant n'ont pas de valeur artistique sauf chez les snobs, les escrocs et les fous.

LA COMPLEXITÉ DE KOLMOGOROV

Puisqu'un accord, à peu près unanime, concernant la simplicité des oeuvres d'art semble exister, la complexité de Kolmogorov qui donne un sens rigoureux au concept de simplicité pourrait être le premier élément mathématique pertinent pour la formulation de critères formels généraux concernant l'esthétique.

La complexité de Kolmogorov d'un objet est la taille du plus petit programme d'ordinateur qui spécifie complètement cet objet. Pour un dessin ou une peinture, c'est la taille du plus petit programme qui permet de reproduire l'image de l'oeuvre sans rien perdre de ce que nous en percevons. L'idée de Kolmogorov est simplement de rendre formelle l'intuition commune que «le simple est ce qui se dit en peu de mots» et «le complexe est ce qu'on ne réussit pas à comprimer quoi qu'on fasse».

Pourvu qu'on utilise un langage informatique assez puissant (un langage «universel»), la complexité de Kolmogorov ne dépend que très peu du langage choisi pour mesurer la taille des programmes. C'est d'ailleurs cette invariance qui rend la notion intéressante. La notion de langage universel va être importante pour la suite et mérite quelques précisions. À la suite de l'article fondateur de la théorie de la calculabilité publié en 1936 par le mathématicien britannique Alan Turing on a découvert que dès qu'un langage de programmation comporte un minimum d'opérations (boucle «pour», opérateur

«si... alors... sinon...», «go to», opérations arithmétiques +, -, ×, etc.) alors toute fonction programmable dans un langage informatique quel qu'il soit est programmable dans ce langage. Autrement dit, dès qu'une certaine puissance de programmation est atteinte, un langage informatique peut servir à programmer toute fonction qui peut l'être (les vitesses de calcul ne sont pas prises en considération, seuls les résultats comptent).

Les langages qui possèdent ce minimum de puissance sont dit universels et la grande majorité des langages utilisés en informatique aujourd'hui le sont. La taille du programme minimum permettant par exemple de décrire *La Joconde* différerait peu d'un langage de programmation universel à un autre et c'est cette taille, notée $K(\text{Joconde})$, qui constitue la complexité de Kolmogorov de la Joconde. En revanche, si un langage L n'est pas universel la taille du programme minimum qui dans ce langage décrit *La Joconde* sera bien plus grande que $K(\text{Joconde})$. Si L par exemple ne permet que de décrire une image qu'en la codant par un programme du type :

«image de taille 1000 x 1000 ; pixel 1 : couleur 216 ; pixel 2 : couleur 2111 ; ... ; pixel 100000 : couleur : 521», alors il est clair qu'aucune description courte de la Joconde ne sera possible. Un langage un peu plus riche qui permettrait de représenter une image par un codage du type : «image de taille 1000 x 1000 ; pixel de 1 à 23 : couleur 212 ; pixel de 24 à 32 : couleur 332, etc.» autoriserait une représentation plus courte des images, et surtout de celles qui comportent de grandes plages de couleur uniforme.

À côté de la complexité de Kolmogorov $K(ob)$ d'un objet ob , définie en faisant référence à la taille du plus petit programme décrivant ob (avec un langage universel), il est utile d'envisager la complexité de ob relativement à L , L étant un langage non universel, définie comme la taille du plus petit programme qui définit l'objet ob dans le langage L , et que nous noterons $Comp_L(ob)$.

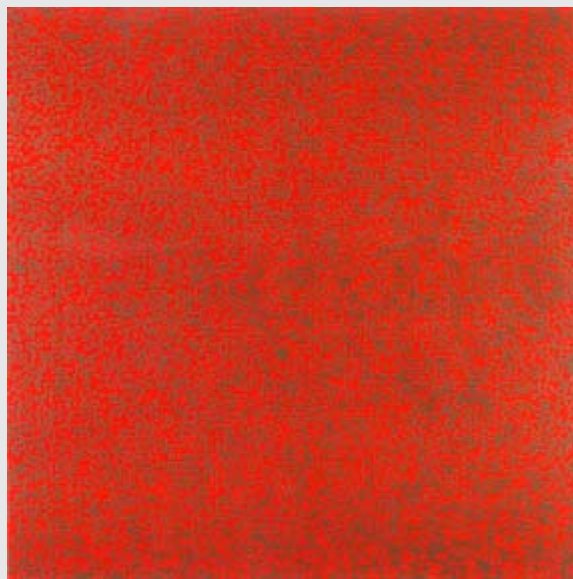
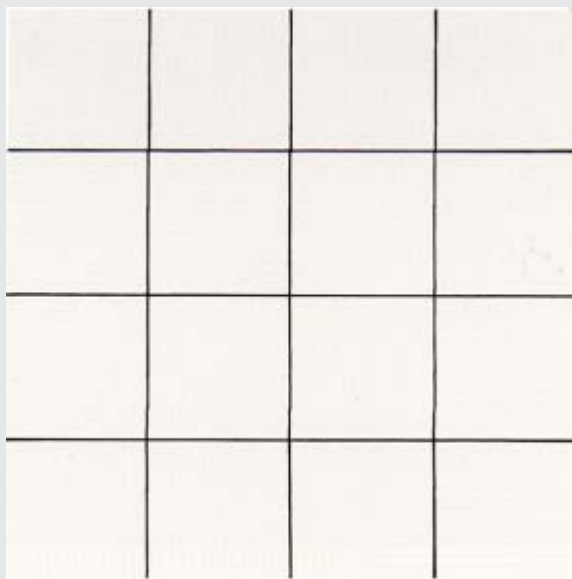
On ne peut calculer la complexité de Kolmogorov $K(ob)$ avec exactitude que dans des cas très rares. Lorsque L est un langage simple, $Comp_L(ob)$ est plus facilement calculable.

Les algorithmes de compression de données, très utilisés en informatique aujourd'hui, sont souvent fondés sur des langages non universels : l'algorithme de compression recherche un codage de l'objet que l'on veut comprimer. Ce codage est une sorte de programme utilisé par l'algorithme de décompression. La taille de la version comprimée de l'objet ob est donc une mesure de

MORELLET, ARTISTE PROVOCATEUR ET STIMULANT

Les œuvres de l'artiste François Morellet, à qui la Galerie Nationale du Jeu de Paume a rendu un hommage en janvier 2001, sont une exploration parfois provoquante du problème de la complexité et de l'art. La plupart de ses œuvres sont proches du seuil de complexité en dessous

duquel il est impossible de qualifier un objet de beau ou de laid. Certaines n'atteignent pas ce seuil, et on reste étonné, comme pour les peintures monochromes de Reinhardt, qu'elles puissent avoir une valeur marchande (tant mieux pour lui).



ADAGP

À droite, *16 carrés* 1953 L'artiste «a cherché à minimiser le nombre de décisions prises pour terminer son travail et, sans oser un tableau tout blanc, s'en est approché». La complexité de cette peinture n'atteint pas le seuil minimum que la majorité d'entre nous exigeons pour qualifier un objet d'œuvre artistique.

À gauche, *Répartition aléatoire de 40 000 carrés 50% rouge, 50% marron* 1961. On admire la patience qu'il faut pour réaliser de telles peintures. Ce travail pose un problème. Il ne satisfera guère la majorité des amateurs qui ne lui attribueront pas le statut d'œuvre d'art : d'une certaine façon ce tableau est aussi vide qu'un tableau monochrome. Pourtant sa complexité de Kolmogorov est

assez importante car 40 000 choix aléatoires correspondent à une complexité de Kolmogorov de 40000 bits. La solution à cet apparent paradoxe est que cette œuvre ne satisfait pas le critère de Yéléhada : toute la complexité étant concentrée sur le seul choix de la couleur des carrés, un langage de description élémentaire L réussit très bien à compresser ce tableau, conduisant à une valeur presque égale de $ComplL(ob)$ et $K(ob)$. Ce tableau illustre donc parfaitement qu'une complexité de Kolmogorov importante ne suffit pas toujours à produire une œuvre, et que le critère de Yéléhada pourrait bien être une condition nécessaire pour qu'un objet possède une valeur artistique.

π ironicon. *Métal à partir des décimales de π* . Cette série de travaux, que, là encore, il est difficile de considérer comme beaux ou laids est construite à partir des décimales du nombre π qui sont utilisées par F. Morellet non pas parce que ce sont les décimales de π , mais parce que cela lui assure de ne pas faire les choix (des angles entre les segments) lui-même. Celui qui le souhaite peut vérifier que l'œuvre n'est pas truquée : les angles n'ont pas été choisis par l'artiste «pour faire beau», mais sont imposés par une règle contrôlable.

Un tel objet possède une faible complexité de Kolmogorov (car les décimales de π ont une faible complexité de Kolmogorov), mais ne diffère pas sur le plan esthétique d'un objet équi-



valent où les angles auraient été choisis avec un dé et qui lui aurait une complexité de Kolmogorov élevée (mais ne satisferait pas le critère de Yéléhada). Ces objets montrent donc que notre jugement esthétique ne peut pas prendre en compte certaines régularités algorithmiques

que l'esprit ne perçoit pas : utiliser les décimales de π ou une suite aléatoire ne change pas la valeur esthétique, mais peut changer profondément la complexité de Kolmogorov et la nature mathématique des objets. Le concept de profondeur de Bennett qui, dans les deux cas, serait ici faible, permettra peut-être de

traiter de telles situations délicates.

$Comp_L(ob)$ pour un certain langage L non universel, et c'est donc aussi une approximation par excès de $K(ob)$. Sans le savoir, à chaque fois que nous comprimons des données, nous évaluons $Comp_L(ob)$ et majorons $K(ob)$.

KOLMOGOROV ET LA BEAUTÉ

Munis de ces concepts nous revenons à notre problème des rapports entre beauté et complexité.

Nous avons admis avec le sens commun qu'une condition nécessaire pour qu'un objet ait une valeur esthétique est qu'il possède un contenu informationnel minimum. En termes mathématiques, un objet ob ne peut prétendre être une œuvre d'art que si $K(ob)$ est supérieur à un certain seuil. Ce seuil peut être situé autour de 100 bits (après une transcription en langage binaire, la taille des programmes est mesurée par le nombre de chiffres binaires ou bits, pour *binary digit*). Certains amateurs seront enclins à plus de tolérance et accepteront peut-être que des objets de 50 bits puissent être considérés comme œuvres artistiques, d'autres plus intransigeants fixeront peut-être le seuil à 200 bits, voire à 1000 bits, mais il ne fait aucun doute qu'une toile monochrome (de l'ordre de 20 bits), une sculpture réduite à un parallélépipède (de 20 à 30 bits environ) ne passeront pas ce seuil en dessous duquel parler d'œuvre ou de beauté n'a pas de sens.

Trois remarques que nous allons détailler limitent l'intérêt de la complexité de Kolmogorov considérée seule pour produire des jugements esthétiques :

A) Un fort contenu en information (mesuré par $K(ob)$) n'est pas suffisant pour qu'un objet soit beau.

B) Un fort contenu en information n'est pas nécessaire (seul un contenu minimum l'est).

C) Deux objets ayant le même contenu en information peuvent avoir des valeurs esthétiques très différentes.

Avant de détailler les justifications des affirmations A et B et C, tirons-en les conséquences : la complexité de Kolmogorov, même si elle doit intervenir dans l'élaboration de critères esthétiques formels, ne sera jamais une « mesure de beauté » à elle seule. D'autres idées (mathématisables ou non), doivent être prises en compte.

Une image aléatoire (par exemple des points noirs ou blancs tirés au hasard avec une pièce de monnaie et composant une image 1000×1000) aura une grande complexité de Kolmogorov (environ 1 000 000 bits car les objets aléatoires sont ceux qui ont la plus grande complexité de Kolmogorov possible) alors que pour-

tant sa valeur esthétique ne dépasse pas celle d'une toile toute blanche ou toute noire qui n'a pas de beauté. Cette remarque justifie l'affirmation A.

Certaines formes très pures et donc assez simples (celles par exemple utilisées par le mouvement *Art Nouveau*, dans les dessins géométriques des motifs décoratifs de l'art islamique, etc.) sont très belles. La beauté ne nécessite donc pas toujours une très grande complexité. C'est le point B.

Deux photographies l'une correctement cadrée l'autre non, ou deux dessins l'un très beau, l'autre obtenu en découpant le premier en cent morceaux carrés et en inversant l'ordre, ou deux images l'une représentant un beau visage souriant, l'autre un visage disproportionné et grimaçant auront dans chaque cas une complexité de Kolmogorov proche alors que leurs valeurs esthétiques seront nettement différentes. Ces exemples montrent sans équivoque le point C : la complexité de Kolmogorov n'est pas, à elle seule, une mesure de beauté.

LE SECRET DES FRACTALS

Pour le point B, nous aurions pu prendre en considération les images fractales, lesquelles méritent une analyse plus fine. Les images fractales sont le plus souvent considérées comme belles et complexes. Or leur complexité est une illusion car les images fractales sont le résultat de formules courtes et peuvent être définies en utilisant des programmes simples tenant en quelques lignes : leur complexité de Kolmogorov est souvent largement inférieure à 1 000 bits. Leur apparente complexité provient des calculs, longs si nous devons les mener à la main, qui transforment les définitions mathématiques courtes en images. Avec un langage ayant peu d'instructions (un langage non universel L), un objet fractal ne peut pas être défini brièvement, alors qu'avec un langage universel, il peut se définir brièvement : $Comp_L(ob)$ est bien plus grand que $K(ob)$.

La même remarque peut être faite pour nombre d'objets géométriques à l'apparence complexe, mais qui, au sens de la complexité de Kolmogorov, ne le sont pas : c'est le cas des motifs de l'art géométrique islamique, c'est le cas des peintures de Victor Vasarely et d'une manière générale de tous les objets bi ou tridimensionnel qui comportent beaucoup de symétries, de motifs répétés, des variations à partir d'une même forme, de régularités nombreuses dans les dessins ou les couleurs, toutes choses qui diminuent la complexité de Kolmogorov sans faire baisser $Comp_L(ob)$ lorsque L est un langage non universel trop simple.

$Comp_L(ob)$ mesure la complexité apparente, celle que ressent un spectateur qui ne comprend les choses que superficiellement (selon ce que L permet d'exprimer), alors que $K(ob)$ mesure la vraie complexité, faible pour les objets fortement structurés, très organisés ou soigneusement agencés ou régis par des lois de compositions cachées qu'un regard immédiat ne réussit pas à démêler.

De cela nous tirons une recette pour produire des objets procurant un plaisir esthétique important : il faut s'arranger pour que $K(ob)$ soit bien inférieur à $Comp_L(ob)$ mesurée avec un langage L non universel. Le langage L qu'il faut choisir pour une bonne efficacité de ce procédé doit être lié à notre système de perception ; c'est un langage simple comme ceux évoqués plus haut, ou un de ceux utilisés par les algorithmes de compression.

Le critère énoncé par Roland Yéléhada en 1995 est ainsi : plus l'écart entre $K(ob)$ et $Comp_L(ob)$ est grand, pourvu que $K(ob)$ ne soit pas trop petit, plus l'objet ob a des chances d'apparaître beau.

Il ne faut pas croire que tout est réglé par cette proposition, car, là encore, il est facile de trouver des exemples prouvant que ce critère n'est pas la clef ultime du beau : un tableau composé à partir d'un million de chiffres binaires de π , chacun donnant un point blanc ou noir présente un aspect gris uniforme et satisfait le critère de Yéléhada (le programme de calcul de π est simple). Pourtant un tel tableau a la même valeur esthétique nulle qu'un tableau obtenu à partir d'un million de points aléatoirement pris blancs ou noirs, tableau qui ne satisfait pas le critère de Yéléhada. Ce critère énonce une condition nécessaire, mais non suffisante.

BEAUTÉS DE BIRKHOFF ET DE BENNETT

Rapprochons ces considérations fondées sur la complexité de Kolmogorov de celles du physicien George Birkhoff qui, en 1933, sans se référer à la théorie du calcul (laquelle naissait tout juste à l'époque), mentionne l'idée de complexité pour formuler des critères formels de beauté. Birkhoff soutenait en effet qu'une mesure de la beauté d'un objet est donnée par le rapport : O/C où O désigne la quantité d'ordre et C la complexité. Les quantités C et O devant, pour chaque catégorie d'objets, être précisées de manière adéquate.

Cette théorie a été appliquée avec quelques succès dans certains cas particuliers (vases, ponts, musique, etc.), mais possède le défaut de devoir être adaptée à chaque fois en choisissant de manière assez artificielle les définitions de O et C . Les propositions tirées de la



Muse endormie de Brancusi (à gauche) : la complexité de l'œuvre n'est pas grande, mais la stylisation, qui fait ressortir la pureté du visage, en fait une œuvre d'art. La sculpture «monumentale» inspi-



rée de l'artiste suisse Max Bill (à droite) est d'une simplicité géométrique minimale, un tore coupé en deux. Max Bill a toujours été inspiré par la topologie des formes géométriques simplissimes.

théorie du calcul possèdent une portée plus générale et c'est pourquoi Misha Koshelev a proposé en 1999 de reprendre les idées de Birkhoff avec les outils d'aujourd'hui : c'est-à-dire une variante de la théorie de la complexité de Kolmogorov où le temps de calcul des programmes est pris en compte. Cette idée est en cours d'expérimentation et pourrait automatiser, dans certains cas, les choix à faire lors de la mise au point de formes pour des objets industriels.

Deux idées proposées par Charles Bennett en 1988, à l'occasion d'une recherche de définition formelle du concept d'organisation à partir de la théorie du calcul, semblent aussi pertinentes.

La notion de profondeur logique de Bennett est définie comme le temps de calcul du programme le plus court qui produit un objet *ob*. Cette mesure de la quantité d'organisation contient un objet semble aussi mesurer la longueur du processus d'élaboration qui a conduit à l'objet *ob*. Bien souvent, les objets ayant un intérêt esthétique sont le résultat de longues maturations et de soigneuses élaborations (l'art au XX^e siècle s'est laissé aller à de nombreuses provocations sur ce thème). Des rapports intéressants sont sans doute à découvrir entre profondeur logique et valeur esthétique, l'une et l'autre variant souvent en parallèle.

La notion d'objet cryptique proposée par Bennett concerne aussi la théorie esthétique formelle : un objet cryptique est, par définition, un objet dont le calcul

à partir de la définition n'est pas très long, alors qu'il est très difficile d'en retrouver la définition à la vue de l'objet : le secret de fabrication d'un objet cryptique est difficile à découvrir. Les objets fractals sont de cette catégorie car, mises à part les fractales classiques représentées en totalité, il est impossible en pratique de retrouver à partir d'un dessin fractal ou d'une de ses parties (résultant d'un zoom), la formule qui a produit le dessin. Les idées tirées de la théorie du calcul ne manquent pas pour aller plus loin que ce qu'indique déjà la complexité de Kolmogorov.

Ces approches, que les esprits chagrins qualifieront naturellement de réductionnistes, n'en restent pas moins intéressantes sur un plan philosophique, et montrent que la théorie du calcul porte des fruits bien au-delà des domaines technologiques. De plus ces définitions introduisent dans les réflexions sur l'art des idées qu'on peut envisager de tester expérimentalement, ce que certains chercheurs ont commencé à faire.

Restons cependant lucide sur ce qu'on peut espérer capter de la nature du beau, car il semble exclu par avance qu'une théorie fondée uniquement sur des considérations mathématiques puisse couvrir tous les aspects de l'expérience esthétique humaine. En effet, les critères qui font qu'un visage, une allure, un personnage, un bâtiment, un paysage, etc. sont jugés beaux sont certainement liés à des données propres à notre espèce (le beau pour le crapaud,

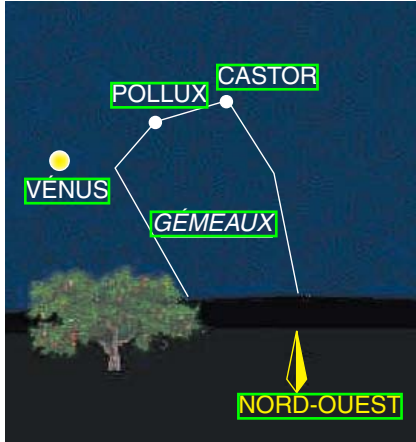
c'est la crapaude). Comme ces critères varient aussi d'une époque à l'autre et d'une société à l'autre, il est clair qu'aucune formule mathématique ne les captera en totalité. L'approche mathématique ne peut réussir qu'à cerner le noyau mathématique de l'esthétique : ce noyau fait que certains dessins, certaines musiques, certains monuments sont universellement reconnus beaux indépendamment des époques et des lieux. La complexité de Kolmogorov, le critère de Yéléhada, la notions d'objet cryptique, les versions modernes du rapport de Birkhoff sont des pistes qu'il faut explorer plus avant en restant modeste dans les objectifs qui ne concernent que le noyau abstrait de l'esthétique.

Misha KOSHELEV, *Towards The Use of Aesthetics in Decision Making : Kolmogorov Complexity Formalizes Birkhoff's Idea.*, in Bulletin EATCS (European Association for Theoretical Computer Science), pp. 166-170, octobre 1998.

M. LI, P. M. B. VITANYI, *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications*, Springer-Verlag, 1993.

Edward LUCIE-SMITH, *Les mouvements artistiques depuis 1945*, Éditions Thames & Hudson, Londres, Paris 1999.

Roland YÉLÉHADA, *Critères esthétiques et complexité mesurée par des langages non universels*, in Papanhoelle Journal, vol. 15, n° 9, pp. 15-30, juin 1995.



Dis-moi Vénus

DONALD OLSON • RUSSELL DOESCHER

En reconstituant la carte du ciel de la mi-juin 1890, on a identifié l'objet céleste qu'a peint van Gogh dans son tableau, *La maison blanche, la nuit*.

La peinture postimpressionniste s'est longtemps enorgueilli de quatre ciels étoilés peints par Vincent van Gogh (1853-1890) : *Le café, le soir* et *La nuit étoilée (au-dessus du Rhône)*, peints à Arles, *La nuit étoilée* et *Cyprès dans la nuit étoilée*, peints à Saint-Rémy-de-Provence.

Toutefois, en 1995, un cinquième ciel nocturne, *La maison blanche, la nuit*, a été découvert et exposé au musée de l'Ermitage, à Saint-Petersbourg, où il est conservé aujourd'hui. Cette œuvre, dont on a longtemps pensé qu'elle avait été détruite pendant la Seconde Guerre mondiale, a passé le dernier demi-siècle enfouie dans les réserves du musée.

Dans les années 1930, *La maison blanche, la nuit* a été cachée par Otto Krebs, un industriel allemand qui craignait les représailles des nazis contre les collectionneurs d'un art, dit dégénéré. Elle a ensuite été récupérée par les Soviétiques et envoyée dans les caves du musée de l'Ermitage.

Peut-on identifier l'objet céleste brillant qui apparaît à droite dans le ciel, au-dessus de la maison ? Oui, si cette œuvre n'est pas totalement issue de l'imagination de l'artiste.

Bien qu'une partie de l'histoire de *La maison blanche, la nuit* reste entourée de mystère, on suppose qu'il s'agit d'un tableau authentique de van Gogh. Plusieurs indices confirment cette hypothèse. La toile apparaît dans plusieurs expositions en Suisse dans les années 1920, et surtout, elle est décrite dans une lettre que van Gogh adresse à son frère Théo, le 17 juin 1890 : « Une maison blanche dans de la verdure avec une étoile dans le ciel de nuit et une lumière orangée à la fenêtre et de la verdure noire et une note rose sombre. »

Van Gogh a envoyé cette lettre d'Auvers-sur-Oise, où il a passé les derniers 70 jours de sa vie et où il a peint plus de 70 toiles avant sa mort, le 29 juillet 1890. Ce rythme soutenu indique qu'il a peint *La maison blanche, la nuit* peu avant le 17 juin, date de la lettre. Pour identifier

à coup sûr l'étoile de van Gogh, il restait à espérer que cette toile représente une maison encore existante, puis à la retrouver, à en déterminer l'orientation, et enfin, à dresser la carte du ciel, tel qu'il se présentait au Nord de la France, à la mi-juin 1890 (si la position des étoiles varie peu d'une année à l'autre, il en va autrement des planètes).

Un planétarium informatique a dressé une telle carte du ciel et a ainsi identifié les candidats célestes. Les étoiles les plus brillantes à cette époque de l'année sont Arcturus et Véga, hautes dans le ciel au crépuscule, et Capella, bas dans le ciel, au Nord-Est, avant le lever du Soleil.

Par ailleurs, trois planètes étaient particulièrement visibles : Vénus brillait comme une étoile à l'Ouest, deux heures après le coucher du Soleil. Sa magnitude atteignait $-3,9$. Cette valeur indique l'éclat lumineux d'un objet. Plus elle est faible, plus l'objet est brillant. Ainsi, le Soleil a une magnitude de -27 , la pleine Lune de -13 , et l'œil nu distingue un objet de magnitude 6.

La deuxième, Mars, qui avait une magnitude de $-1,9$, était, à la mi-juin 1890, bas dans le ciel au Sud-Est au moment du coucher du Soleil. La troisième planète suffisamment brillante, Jupiter, s'élevait pendant une heure avant minuit et, de magnitude $-2,6$, dominait le ciel au Sud-Sud-Est jusqu'au lever du Soleil.

Aucun bombardement n'ayant détruit Auvers-sur-Oise pendant les deux guerres mondiales, la maison blanche avait toutes les chances d'y être encore. Nous avons arpenté les rues de la bourgade pendant quatre jours et nous avons retrouvé la maison.

Une seule maison correspond à celle peinte par van Gogh, une villa sur le côté Sud de la route principale. L'adresse actuelle est 25-27, rue du Général de Gaulle. Elle est installée à seulement deux pâtés de maison de l'Auberge Ravoux, où van Gogh résidait en juin 1890.

La maison a été modifiée depuis 1890 : des lucarnes et une tour qui apparaît à l'arrière ont été ajoutées et une des sept fenêtres du premier étage, celle du centre, a été murée. Les trois fenêtres de gauche ne sont pas régulièrement espacées, et



La maison représentée sur *La maison blanche, la nuit* est à Auvers-sur-Oise, au 25-27, rue du Général de Gaulle. Depuis 1890, les lucarnes et la tour que l'on aperçoit à l'arrière ont été ajoutées et la fenêtre centrale du premier étage, murée.

ne sont pas à l'aplomb de celles du rez-de-chaussée. Ces écartements irréguliers sont identiques à ceux qui apparaissent sur la toile de van Gogh.

Selon Paul Gachet, qui avait 16 ans en 1890 quand il a rencontré van Gogh, la maison blanche était connue sous le nom de Villa des Ponceaux et était la maison d'une femme nommée Victorine, une commerçante qui vendait du beurre, des œufs et du fromage.

L'avant de la maison est face au Nord. Du point de vue de van Gogh, de l'autre côté de la rue, la façade est éclairée obliquement par les derniers rayons du Soleil couchant, au Nord-Ouest. Les calculs informatiques placent Vénus environ 15 degrés au Nord-Ouest. Après avoir éliminé les autres candidats, nous avons conclu que l'objet lumineux est nécessairement la planète Vénus, à la tombée de la nuit. Vénus apparaît peu après le coucher du Soleil et reste visible pendant deux heures avant de disparaître sous l'horizon. De l'endroit même où van Gogh avait posé son chevalet, lorsque la nuit est plus noire, on voit Castor et Pollux, les mêmes étoiles

qui étaient à proximité de Vénus, à la mi-juin 1890 (voir la figure à côté du titre).

La maison identifiée diffère de celle localisée par la plupart des guides touristiques et des cartes souvenirs : selon ceux-ci, la maison sise au 44, rue du Général de Gaulle est celle peinte. Toutefois, cette maison est au Nord de la rue : à l'approche du solstice d'été, la façade n'est éclairée ni par le Soleil couchant, ni par le Soleil levant. Une autre incohérence réside dans la présence de seulement cinq fenêtres au premier étage. Des photographies montrent qu'à la fin du XIX^e siècle la maison du 44, rue du Général de Gaulle avait les mêmes cinq fenêtres.

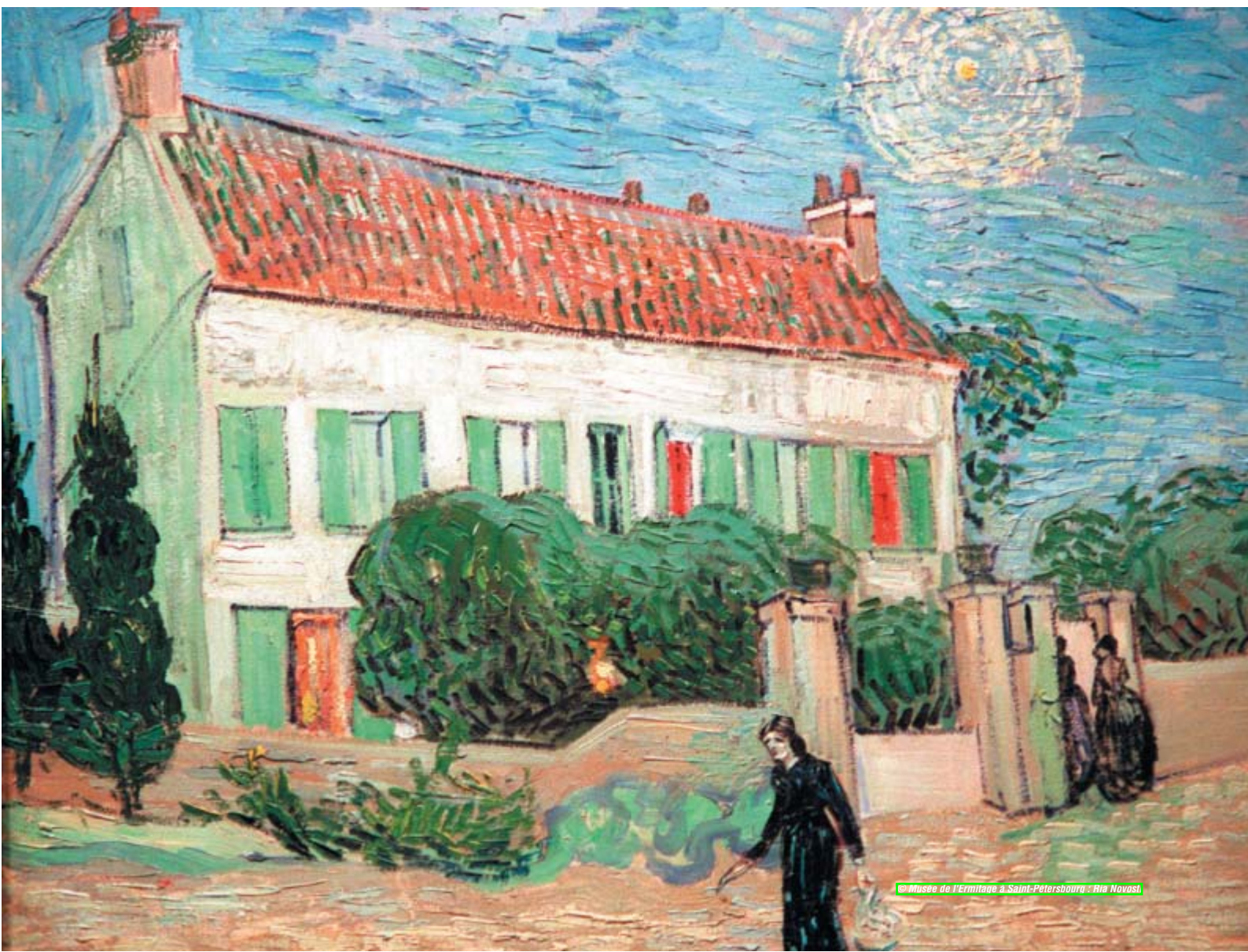
Comment dater plus précisément *La maison blanche, la nuit*? Grâce aux relevés météorologiques de juin 1890 conservés à l'Observatoire du Parc Montsouris. Ils révèlent une période de mauvais temps qui a duré du 7 au 14 juin, avec de la pluie chaque jour. Le ciel s'est éclairci à partir du 15. Van Gogh a sans doute peint *La maison blanche, la nuit* le 16 juin, un jour où le ciel était bleu. Le 17 juin, date à laquelle van Gogh

mentionne la toile dans sa lettre, le ciel était à nouveau couvert.

Ainsi, *La maison blanche, la nuit* représente la face Nord de la Villa des Ponceaux, à Auvers-sur-Oise, au moment du coucher du Soleil, le 16 juin 1890, avec une Vénus brillante dans le ciel, à l'Ouest. Cependant, cette toile n'est pas la première œuvre du peintre où figure la planète. La première n'est autre que la fameuse *Nuit étoilée*, peinte à la mi-juin 1889. Vénus était à son maximum de brillance durant la première semaine de juin 1889.

En outre, alors qu'il était encore à Saint-Rémy-de-Provence, van Gogh a été le témoin, au crépuscule, de l'union de Vénus et de Mercure près d'un fin croissant de Lune croissante, le 20 avril 1890. L'artiste s'est inspiré de cette scène pour le ciel de *Cyprès dans la nuit étoilée*, peinte à la fin du mois d'avril ou au début mai 1890.

Donald OLSON et Russell DOESCHER sont astronomes à l'Université d'État du Sud-Ouest du Texas.





Le claquement du fouet

R. LEHOUCQ • J.-M. COURTY • E. KIERLIK

Le fouet claque parce que son extrémité dépasse... la vitesse du son! Les physiciens ont mesuré la vitesse de l'extrémité de la lanière du fouet et visualisé l'onde de choc créée par le bang supersonique.

En 1887, les Autrichiens Ernst Mach et Peter Salcher montrent qu'un projectile animé d'une vitesse supérieure à celle du son engendre une onde de choc qui se manifeste par un claquement. Peu après, en 1899, Mach compare ce claquement au bruit d'explosion que produit une météorite quand celle-ci traverse l'atmosphère. Ils en déduisent que la vitesse d'entrée des météorites dans l'air terrestre est supersonique. Inspiré par ces travaux, l'Allemand Otto Lummer suggère, en 1905, que le claquement du fouet soit aussi dû à l'émission d'une onde de choc. Nombre de ses collègues sont incrédules, mais l'explication a droit de cité : les physiciens allemands Winkelmann et Prandtl n'hésitent pas à l'exposer dans des articles qu'ils écrivent vers 1910 dans des encyclopédies. Dès lors, l'idée que l'extrémité du fouet se déplace plus vite que le son se retrouve dans de nombreux ouvrages qui traitent d'acoustique ou d'aérodynamique. Toutefois, elle reste au stade d'hypothèse plus ou moins bien acceptée pendant encore une vingtaine d'années avant de faire des études plus précises (les physiciens ont souvent d'autres chats à fouetter). Aussi, tout au long du siècle, la physique du fouet ne progressera-t-elle que par épisodes.

Pour vérifier l'intuition de Lummer, le professeur Carrière de Toulouse réalise, en 1927, une ingénieuse expérience. Pour photographier le phénomène, reproduire un claquement identique lors de chaque essai, Carrière construit un fouet méca-

nique qui ressemble peu à celui du cocher : le manche du fouet est remplacé par un élastique sous tension qui tire sur une cordelette passant autour d'une poulie.

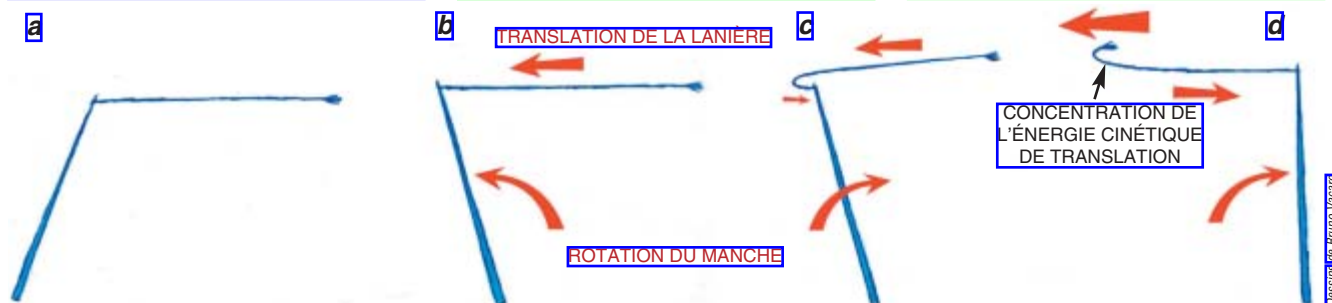
LA VITESSE DU FOUET

Dans les années 1930, ni les caméras rapides ni les flashes n'existent. Aussi, Carrière photographie le fouet en l'éclairant un bref instant avec la lumière produite par l'étincelle d'une lampe à arc (le flash n'existe pas!). L'étincelle doit être allumée au moment adéquat, peu après le déclenchement du coup de fouet. Le mécanisme actionnant le fouet libère simultanément une planche qui dans sa chute actionne l'interrupteur qui produit l'étincelle. Carrière ajuste le délai qui sépare le déclenchement du coup de fouet de l'étincelle en modifiant la hauteur d'où la planche chute. En plaçant un second interrupteur juste en dessous du premier, il trouve même le moyen de réaliser une seconde étincelle immédiatement après la première. Il obtient ainsi, sur la même plaque photographique, deux images successives de l'extrémité de la corde. Carrière calcule ainsi la vitesse de l'extrémité du fouet en divisant la distance qu'a parcourue l'extrémité entre les deux prises de vue, par la durée qui sépare les deux étincelles (un millième de seconde environ). Il confirme sa mesure en enregistrant la vitesse angulaire atteinte par la poulie. Carrière mesure une vitesse de 350 mètres par seconde, légèrement supérieure à la vitesse du son

dans l'air (330 mètres par seconde). Ce résultat corrobore l'hypothèse d'une pointe de fouet supersonique, toutefois, les imprécisions de la mesure ainsi que le caractère peu naturel du dispositif mimant le fouet empêchent de conclure avec une certitude absolue.

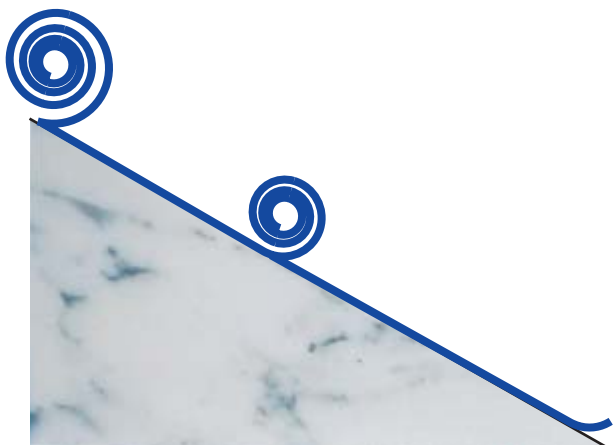
Le fouet de laboratoire du professeur Carrière laisse un problème en suspens : est-il vraiment possible d'amener l'extrémité du fouet à une vitesse supersonique par un simple mouvement du bras? Cette question est abordée par hasard dans les années 1950 : de nombreux cochers allemands sont affligés d'un étrange mal : des particules de cuivre sont retrouvées au fond de leurs yeux, par ailleurs apparemment indemnes de toute lésion. Or, à la même époque, les extrémités des fouets sont faites de fils de cuivre. Des physiciens de Stuttgart font le rapprochement et avancent que de fines particules de cuivre se détachent à grande vitesse de l'extrémité du fouet lors du claquement, traversent la cornée sans l'endommager, pour s'arrêter au fond de l'œil. Les physiciens élaborent alors un modèle de la propagation d'une déformation le long de la lanière et concluent qu'il est possible de conférer une vitesse aussi grande que l'on veut à l'extrémité du fouet. Pour cela, un mouvement sec crée un coude qui se propage et qui isole une partie mobile de la lanière dont la vitesse augmenterait indéfiniment.

Le mécanisme d'accélération de l'extrémité du fouet à une vitesse superso-

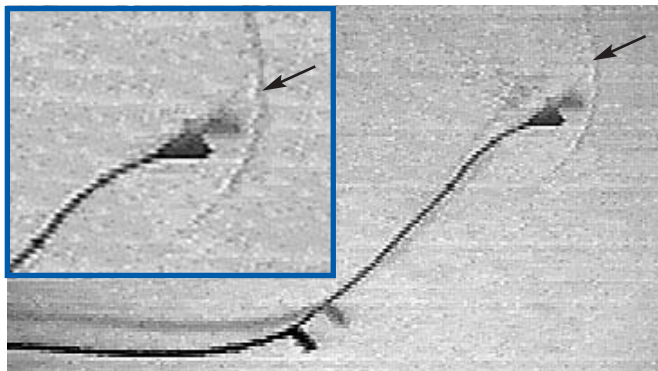


Mouvement du fouet de charretier : en (a), la lanière est lancée vers l'arrière ; en (b), la rotation du manche lui confère une énergie cinétique de translation ; en (c), un brusque rappel du manche crée

un coude. En (d), la propagation de ce coude concentre l'énergie cinétique dans la partie mobile au bout de la lanière, laquelle atteint une vitesse supersonique.



Un mécanisme analogue à celui du fouet permet de comprendre l'accélération importante subie par un tapis qui se déroule et dont la masse en mouvement diminue au cours du temps. Les vitesses obtenues sont toutefois loin d'être supersoniques et le claquement entendu est produit par le choc de l'extrémité du tapis sur le sol.



Visualisation de l'onde de choc (flèches) à l'extrémité du fouet. Cette photographie a été prise par une caméra ultra-rapide (9 000 images par seconde) à l'Institut Ernst Mach de la Société Fraunhofer de Fribourg par l'équipe dirigée par Peter Krehl. La houppe à l'extrémité du fouet augmente l'intensité de l'onde de choc.

nique ainsi établi, le mouvement de la lanière suffit-il pour créer une onde de choc? En 1958, trois chercheurs américains du laboratoire de recherche navale de la marine américaine s'interrogent : le claquement du fouet ne résulte-t-il pas plutôt d'un choc mécanique entre deux parties de la lanière? Pour lever cette ambiguïté, les chercheurs décident d'employer l'une des nouvelles caméras ultra-rapides, qui, à la fin des années 1950, fixent déjà jusqu'à 4 000 images par seconde. Ils embauchent une équipe d'artistes de music-hall : les *Los Larabees*. Ces artistes entraînés peuvent reproduire des claquements de fouet comparables toujours au même endroit : dans le champ de la caméra. Les chercheurs mesurent ainsi, pour la première fois, la vitesse de l'extrémité d'un fouet réel : elle est 30 pour cent supérieure à la vitesse du son.

Il reste à visualiser l'onde de choc. Cela est possible en éclairant la scène avec une impulsion lumineuse très brève déclenchée grâce à un micro placé près de la zone du claquement. S'il permet de voir l'onde de choc, ce dispositif ne permet pas de prendre des images de sa formation. Il faut donc réaliser une expérience définitive qui prouve de façon indiscutable que le déplacement supersonique de l'extrémité du fouet engendre bien une onde de choc sonore.

En 1998, trois physiciens de l'Institut Fraunhofer pour l'étude des phénomènes brefs (à Fribourg) réalisent cette expérience. Grâce à une caméra vidéo enregistrant plus de 9 000 images par seconde, ils prennent des images d'excellente qualité et mesurent avec précision la vitesse de l'extrémité du fouet : elle excède la vitesse du son pendant une durée très courte d'environ 1,2 millièmes de seconde. La vitesse de l'extrémité du fouet peut même excéder deux fois celle du son. L'accélération de l'extrémité atteint alors 50 000 fois celle de la pesanteur (soit 500 kilomètres par seconde au carré). Dans

cette expérience, les physiciens utilisent un laser aux impulsions ultra brèves, qu'ils synchronisent avec la caméra, afin de prendre une image du fouet tout en observant l'ombre créée par l'onde de choc à chaque instant. Leur but est de mettre en évidence l'onde de choc et les résultats ne laissent aucune place au doute : au moment où la vitesse du fouet devient supersonique une onde de choc est émise. Ils constatent aussi qu'en moins de 20 centimètres, l'extrémité de la lanière décélère et repasse sous la vitesse du son.

Grâce à ces avancées, une image cohérente de la physique du claquement de fouet se dégage aujourd'hui. Il apparaît qu'un fouet est une machine à transformer le mouvement lent de la lanière en un mouvement final ultra rapide de la masselotte attachée à son extrémité (ou de la masse de son extrémité).

LA PHYSIQUE DU COUP DE FOUET

Examinons la dynamique d'un fouet de charretier fait d'une lanière attachée à un manche rigide. D'un mouvement rapide du poignet, le charretier crée un coude qui se propage le long de la lanière du manche vers l'extrémité.

Lors de ce mouvement, il incline son manche vers l'arrière afin de dérouler la lanière dans l'air, puis le ramène brusquement vers l'avant pour lui imprimer une vitesse d'ensemble. Poursuivant son mouvement, le charretier ramène le manche à la position initiale. Au cours de la première phase de son mouvement de poignet, la lanière acquiert une quantité d'énergie cinétique proportionnelle au produit de sa masse par le carré de la vitesse de l'extrémité du manche (la vitesse d'ensemble de la lanière). La deuxième phase du mouvement crée le coude recherché ; celui-ci se forme au voisinage du manche, et se propage vers l'extrémité de la lanière.

À mesure que ce coude se propage, l'énergie cinétique conférée initialement à l'ensemble de la lanière se concentre dans la portion mobile dont la vitesse augmente. Avec ces approximations, l'énergie cinétique initiale étant concentrée dans l'extrémité de la lanière, sa vitesse est la vitesse initiale de la lanière multipliée par le quotient des racines carrées des masses de l'ensemble et de l'extrémité de la lanière (jusqu'à une certaine valeur limite). Dans les fouets usuels, ce rapport est typiquement de l'ordre de 300. Il suffit donc que le charretier imprime une vitesse initiale de l'ordre de 20 mètres par seconde à l'ensemble de la lanière pour que l'extrémité dépasse la vitesse du son.

Les expériences réalisées à l'aide de fouets de laboratoire montrent qu'un nœud placé près de l'extrémité est arraché au cours du claquement, comme si des ciseaux invisibles l'avaient tranché! Les fortes tensions à l'origine de ce phénomène expliquent aussi pourquoi l'extrémité d'un fouet s'effiloche et se transforme en une houppe, c'est-à-dire en un faisceau de fils. Cette houppe favoriserait l'émission de claquements plus bruyants, ce que les expériences menées à Fribourg ont confirmé.

Le mécanisme dominant dans l'émission sonore serait le pivotement rapide de cette houppe (90 degrés en 0,1 millièmes de seconde). Lummer a raison, depuis plus d'un siècle : le claquement du fouet résulte d'un choc supersonique.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. Jean-Michel COURTÉY est physicien, chargé de recherche au CNRS. Edouard KIERLIK est physicien et maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie.

P. Krehl, S. Engemann and D. Schwenkel, *The puzzle of whip cracking uncovered by a correlation of whip-tip kinematics with shock wave emission*, Shock Wave, vol. 8, pp. 1-9, 1998.

Histoire des sciences

Voronoff

Jean Real. Éditions Stock, 2001 (287 pages, 115 francs).

Serge Voronoff (1866-1951), ou plus exactement Samuel Abrahamovitch Voronoff, originaire de Russie, naturalisé français, fut un chirurgien célèbre pour avoir réussi des greffes osseuses (1914-1917), et surtout pour avoir, le premier, effectué des greffes testiculaires de singes à l'homme dans les années 1920. Voronoff participait aux recherches thérapeutiques visant à lutter contre les effets du vieillissement. Lui et ses disciples évoluaient dans le cadre idéologique d'une «régénération» ou d'une «résurrection» de l'homme, nécessitée par la «dégénération» qu'il subissait en raison du développement de l'industrie polluante, de la paupérisation, de la syphilis, de l'alcoolisme, et autres maux qui risquaient d'atteindre, et c'est là que le bât blessait, les couches privilégiées de la société. Il était donc urgent de protéger et de sauver ces hommes par la greffe «régénérante».

Si les travaux de Voronoff étaient connus des historiens des sciences de la vie et de la médecine depuis long-



Plus de 2 000 greffes de testicules de singes ont été effectuées sur des humains avant 1940 par le chirurgien d'origine russe Voronoff et ses disciples : une hypothèse qui expliquerait la transmission du virus du SIDA du singe à l'homme ?

temps, sa vie était en revanche parsemée de nombreuses lacunes. Grâce à son travail de recherche de documents originaux, Jean Real comble un vide que nous aurions accueilli favorablement, s'il n'avait pas volontairement fait le silence sur les travaux des historiens des sciences qui se sont intéressés à cette époque et qui ont déjà écrit sur les pratiques de Voronoff. Ces textes sont certes quelque peu en désaccord avec ce qu'il exprime, aussi donne-t-il l'impression d'être le premier à écrire sur Voronoff et même à le découvrir, dans la mesure où il précise qu'aucun de «ses amis scientifiques, biologistes, médecins ou chirurgiens» ne connaissait ni le nom, ni l'œuvre chirurgicale de son héros.

Cet ouvrage offre deux lectures possibles. La première est celle d'un roman biographique, qui renseigne le lecteur sur la vie du personnage. L'auteur essaie de communiquer son admiration aux lecteurs. Il n'y a pas lieu de critiquer ici cette littérature, faite pour distraire. Toutefois, ce type de littérature offre à l'historien un intérêt quand elle apporte des informations inédites, ce qui est le cas du *Voronoff* de Jean Real. Ce livre a le mérite de présenter une première biographie complète de ce chirurgien, et nous conduit à la seconde lecture possible, celle de l'historien.

Jean Real, réalisateur de documentaires, a reconnu qu'il n'était pas historien. L'image qu'il se fait de Voronoff est particulière, dans la mesure où l'auteur ne se soucie guère de comprendre et de situer son personnage dans le contexte des sciences de la vie et de la médecine des années 1920-1930 ; son livre masque de nombreux événements historiques, et devient parfois ennuyeux.

Une critique de fond, parmi d'autres : pourquoi répéter que Voronoff est «en désaccord» avec Retterer qui refusait d'admettre que l'hormone mâle était sécrétée par les cellules interstitielles, tandis que les textes prouvent le contraire ? Pourquoi faire croire que Voronoff «se tait» sur les idées de Dartigues, alors qu'ils évoluent l'un et l'autre dans le même contexte idéologique et eugénique de l'époque de la «résurrection de l'homme» par la greffe ? J. Real n'a pas réussi son *Voronoff*, car il a voulu le protéger, mais de quoi ?

Les pratiques de greffes testiculaires de singes à l'homme par Voronoff et ses disciples pourraient-elles avoir favorisé le passage du virus du SIDA du singe à l'homme ? La question se pose. En effet, en 1939, Voronoff recensait 2 000 greffes dans le monde, effectuées depuis les années 1920, surtout en France et en Amérique, mais aussi en

Italie, Allemagne, Espagne, Portugal, Chili et au Brésil. Il y en eut certainement beaucoup plus. Les singes utilisés étaient principalement le chimpanzé (Guinée) et le cynocéphale (Guinée, Soudan, Abyssinie). Or, les rétrovirus responsables du sida chez l'homme trouvent leur origine chez le singe et les premières contaminations humaines remonteraient à une époque comprise entre 1920 et 1940. Le premier cas de sida déclaré remonte certes à 1959, mais un délai de 20 à 40 ans pourrait être nécessaire pour que le virus du singe transmis à l'homme mute et devienne pathogène pour l'homme. Sachant que la greffe testiculaire se pratiquait à la suite d'une incision du greffon testiculaire du singe et de la vaginale du testicule de l'homme pour favoriser le contact sanguin et offrir une meilleure prise à la greffe, nous avons là une source possible de contamination. Affaire à suivre...

Jean-Louis FISCHER,
Centre Alexandre Koyré d'histoire
des sciences et des techniques.

Astronomie

Les nouveaux mondes du cosmos. À la découverte des exoplanètes

Michel Mayor, Pierre-Yves Frei.
Éditions Le Seuil, 2001 (284 pages, 129 francs).

La science, c'est bien connu, s'éloigne hélas du citoyen. Son message s'écrit de plus en plus dans une langue et avec des concepts incompréhensibles pour l'homme de la rue. Même la biologie, avec ses techniques de procréation assistée et ses manipulations génétiques qui concernent la santé et la vie de chacun, n'utilise pas des concepts immédiatement abordables. Dans cette perspective un peu sombre, il y a une éclatante exception : la question «Sommes-nous seuls dans l'univers ?» est immédiatement compréhensible par chacun. Elle est d'ailleurs aussi vieille que la pensée grecque, mais reste à l'extrême pointe de la recherche astronomique. Après avoir fait, en 1995, l'objet d'une des plus grandes découvertes scientifiques du XX^e siècle, elle fait partie des projets les plus ambitieux de la NASA et de l'Agence spatiale euro-

péenne. Nous vivons là une époque exceptionnelle.

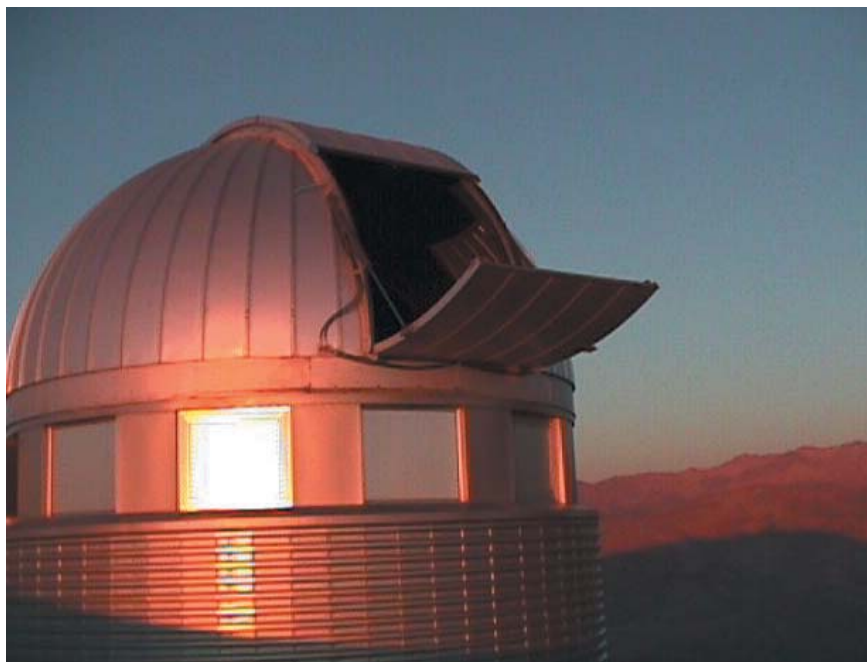
Le livre de M. Mayor et P.-Y. Frei, l'astronome et le journaliste scientifique, relate la découverte de 1995, son histoire et ses conséquences. Il mêle de manière heureuse le témoignage personnel et l'information scientifique, parfois pointue, mais toujours claire. On y trouvera des informations de première main puisque M. Mayor est, avec son étudiant Didier Queloz, le découvreur de la première planète autour d'une étoile de type solaire, une exoplanète.

M. Mayor évoque d'abord les circonstances de cette découverte, ses souvenirs personnels, ainsi que les doutes qui l'ont rongé, lui et Didier Queloz. Leur éventuelle découverte ne violait-elle pas le consensus largement partagé du moment ? Un article, rétrospectivement célèbre, d'A. Boss, publié au moment où apparaissaient (à son insu) les signes avant-coureurs de la découverte, démontrait en effet qu'une planète ne pouvait pas exister très près de son étoile. Or c'est précisément où M. Mayor et D. Queloz ont décelé les premiers indices. Comment ne pas douter : ils avaient eu tant de prédécesseurs qui avaient pris pour des planètes ce qui ne s'était révélé être que des artefacts divers !

En bons scénaristes, les auteurs procèdent dans les chapitres suivants à un retour en arrière et à une mise en perspective du sujet. L'histoire commence avec Aristote, selon qui, il ne saurait y avoir qu'un monde analogue au nôtre, puis Démocrite et Épicure, qui étaient au contraire persuadés de la pluralité des mondes. Depuis, et jusqu'au XX^e siècle, de nombreux auteurs, Albert le Grand, Giordano Bruno, Huygens, Fontenelle, etc., croyaient en la pluralité des mondes. Ajoutons que non seulement Huygens était partisan de cette pluralité, mais il fut aussi le premier astronome à poser la question de la détection des exoplanètes en termes scientifiques.

Dans les années 1970, il avait outre Atlantique un grand enthousiasme pour la recherche de planètes. Cet enthousiasme n'a pas traversé l'océan et peu nombreux étaient ceux qui, souvent sous les sarcasmes, voire les oppositions de leurs collègues, croyaient en l'avenir de cette branche de l'astronomie. Le pari était risqué : fin 1994, Campbell et ses collègues annonçaient que, sur 21 étoiles observées avec soin, aucune n'avait de planète géante (les plus petites étant indécélables).

La suite est un excellent exposé sur la structure des étoiles et sur le scénario généralement accepté de la for-



À 2 400 mètres d'altitude, l'Observatoire de la Silla au Chili est l'un des hauts lieux de la découverte des planètes extrasolaires.

mation des planètes. Il soulève aussi quelques questions non résolues (par exemple, pourquoi tant d'orbites sont-elles elliptiques ?). Nous assisterons peut-être encore à des évolutions radicales dans ce domaine, les dernières découvertes d'exoplanètes ont imposé une remise en question de l'unicité de la définition d'une planète : certaines pourraient apparaître comme planète et devenir naine brune.

Revenant ensuite sur la démarche ayant conduit à la détection de la planète *51 Peg b*, les auteurs expliquent en détail la méthode qui permet de détecter une planète sans la voir, en mesurant les perturbations qu'elle induit sur la vitesse de l'étoile. Ils évoquent les autres méthodes de recherche de planètes, en particulier celle dite des « transits planétaires » qui a confirmé, avec un tout petit télescope d'amateur, que l'étoile *HD 209458* possède bel et bien une planète. Enfin, les nombreux programmes de détection de planètes, au sol et dans l'espace, qui vont être développés d'ici 2020, sont présentés.

Tout cela ne serait que de l'astronomie « courante », si ne s'y ajoutait pas une dimension autrement plus importante : la recherche de vie au-delà du système solaire. Les deux derniers chapitres sont consacrés à la recherche d'autres Terres et de la vie sur ces planètes. Comme nous n'avons pas détecté à ce jour de signaux « artificiels », la vie sur les exoplanètes n'est peut-être, la plupart du temps, qu'à un stade cellulaire (ou primitif en termes d'évolution biologique). C'est pourquoi l'on s'appuie

sur l'exemple terrestre des premières formes de vie, ainsi d'ailleurs que des extrêmophiles, pour cerner les chances de développement et les propriétés d'une vie primitive en dehors du Système solaire. La réflexion du livre est là moins poussée, dans un domaine, pourtant important.

La vie ne peut se définir, contrairement à la tendance actuelle, que de manière subjective. La vie ne caractérise pas un organisme, elle caractérise une relation à cet organisme. Et le caractère « vivant » de cette relation est affaire de libre jugement, au sens kantien, comme le montrent les débats sur la bioéthique. Ce n'est que dans un second temps qu'on peut chercher à analyser les corrélats physico-chimiques de cette relation, sans savoir, pour l'instant, ce qu'ils ont d'universel.

C'est d'ailleurs parce que l'exobiologie nous permettra d'analyser, le moment venu, l'universalité, ou non, des corrélats, que la recherche de vie en dehors du système solaire prend tout son intérêt. Sans exiger des auteurs qu'ils adhèrent à cette pensée, il aurait été souhaitable qu'ils développent une réflexion sur la notion de vie, en évitant de se précipiter d'emblée sur la pure chimie organique. Un dernier mot : ce livre est heureusement loin de toute cette séduction démagogique à la mode depuis quelques années qui donne de l'univers une image romanesque ; ici, au contraire, on respecte l'intelligence du lecteur.

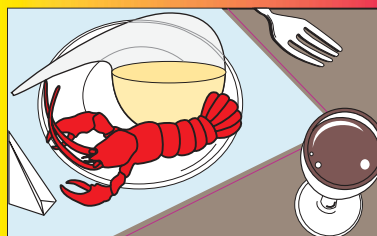
Jean SCHNEIDER,
CNRS - Observatoire de Paris.

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

**vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :**

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 25 juillet 2001.



Psychologie

Les vilains petits canards

Boris Cyrulnik. Éditions Odile Jacob,
2001 (240 pages, 135 francs).

Le mot est peu connu, le concept est nouveau, et il fallait les connaissances, l'expérience et le style de Boris Cyrulnik pour présenter de façon convaincante la résilience, «capacité à réussir à vivre, à se développer en dépit de l'adversité», à un vaste public. Voilà qui est fait dans cet ouvrage où l'éthologue utilise une double métaphore, celle du titre qui, en suivant Andersen, présente la métamorphose des vilains petits canards en beaux grands cygnes blancs, et celle de l'argument, qui transforme la banale chenille rampante en brillant papillon.

Le lecteur peut suivre pas à pas ce cheminement, d'ailleurs non linéaire, au fil de chapitres dont les titres sont autant d'invitations : «les éclopés du passé ont des leçons à nous donner» ; «comment les fœtus apprennent à danser» ; «quand le cadre du nouveau-né est un triangle parental» ; «quand un combat héroïque devient un mythe fondateur» ; «ordalie secrète et réinsertion sociale»... Toutes aussi évocatrices sont les explications de ces titres : l'adaptation n'est pas la résilience, elle est trop coûteuse, mais elle permet de sauver quelques îlots de bonheur triste ; que le nouveau-né soit grincheux ou souriant, le moindre de ses actes habite les rêves et les cauchemars de ceux qui l'entourent ; avec le travail de la mémoire, le moindre traumatisme se transforme en épopée grâce à une victoire verbale.

Tout cela ne relève pas seulement de l'art des mots : en effet, chaque proposition est développée, étayée à la fois par des considérations théoriques et par des vignettes historiques, littéraires ou cliniques, tirées de la vaste culture et de l'expérience de l'auteur. C'est ainsi qu'au fil des pages, compétence, attachement, séparation, traumatismes, adaptation, culture, apprentissage, affectivité sont présentés dans une dynamique existentielle individuelle, familiale, collective, et dans des contextes et des histoires de vie qui leur donnent sens.

Voilà la résilience mise en scène avec ses deux aspects de résistance à la destruction et de reconstruction d'une vie valant la peine, et dans ses deux modalités d'apparition : situations extrêmes ou souffrances ordinaires, rési-

lience conjoncturelle ou structurelle. Boris Cyrulnik, psychiatre et psychanalyste, est à l'aise pour parler de traumatismes, d'après-coup, de déni, de clivage, de fantasmes, de falsification créatrice, d'organisation du Moi. Il en parle en termes imagés, simplement, les mettant à la portée des non-spécialistes. La résilience prend ainsi corps au long des pages avec son originalité, sa richesse, sa force et ses faiblesses : on n'est pas résilient tout seul, ni de façon définitive, ni dans tous les secteurs de sa personnalité. Elle n'est pas, dit-il, «un catalogue de qualités que posséderait un individu. C'est un processus qui, de la naissance à la mort, nous tricote sans cesse avec notre entourage.»

Nouvelle venue dans notre culture conceptuelle et dans notre arsenal d'interventions sanitaires, sociales, éducatives voire juridiques, la résilience se nourrit d'approches transdisciplinaires et d'allers-retours incessants entre chercheurs et travailleurs du terrain. Elle peut donner un second souffle à nos pratiques, nous conviant à porter un regard nouveau sur celles et ceux – personnes, familles, groupes – dont nous avons à prendre soin. Elle n'est pas une panacée, mais simplement un enrichissement à la fois théorique et concret ; elle n'est pas vraiment une nouveauté ; et les romanciers ont su l'observer et la décrire bien avant les professionnels. Que l'on pense à Gavroche et Cosette, chez Victor Hugo, à Poil de Carotte, de Jules Renard ; à Rémy, d'Hector Malot, à David Copperfield de Charles Dickens, et beaucoup d'autres.

Avec un retard notable par rapport aux auteurs anglo-saxons, la résilience séduit actuellement un large public et connaît un essor incontrôlé, non dénué de risques. Il faut du discernement pour la voir à l'œuvre, du respect des personnes pour les aider à la développer, une démarche à la fois objective et empathique, clinique et scientifique, pour la décrire et l'étudier. Il faut être conscient des risques de dérives conceptuelles, de récupération à différents niveaux. C'est pourquoi le livre de Boris Cyrulnik vient à point nommé à la fois pour donner à la résilience ses lettres de noblesse et pour apprendre à beaucoup, profanes ou professionnels, les ressources qu'elle peut nous offrir, si nous faisons l'effort de la mieux connaître et si nous savons en faire bon usage.

Michel MANCIAUX,
Professeur émérite de pédiatrie
préventive et sociale et de santé
publique, Université de Nancy.

La conservation des métaux

dirigé par Claude Volfovsky.
CNRS Éditions, Ministère de la Culture et de la Communication, 2001
(240 francs, 296 pages).

Cet ouvrage constitue sans conteste un document de référence pour tous ceux qui ont à faire avec les métaux comme composants du patrimoine. Restaurateurs, conservateurs, archéologues et chimistes trouveront ici un accès à une documentation jusqu'à présent dispersée. De ce point de vue, l'ouvrage est très utilement complété d'annexes qui peuvent être consultées indépendamment de la lecture, et les nombreux encadrés fournissent des exposés synthétiques, rapides à repérer.

Ce livre apparaît au premier abord comme un ouvrage de spécialiste, mais il intéressera aussi les amateurs d'art et les lecteurs curieux de la conservation d'un vaste patrimoine métallique. Après un large panorama consacré à la métallurgie pré-industrielle, le lecteur trouvera une contribution sur «le matériau métal» qui motive à elle seule, et pour tous, la lecture de l'ouvrage. Claude Volfovsky propose ici un exposé didactique des connaissances complexes qui entrent en jeu dans la compréhension de ce que sont les métaux : comment on les a obtenus, comment ils se dégradent et comment on peut intervenir, à l'heure actuelle, sur ces mécanismes de dégradation. Son propos est illustré par des schémas très clairs, et étayé par une démonstration scientifique. Véritable pivot de l'ouvrage, ce chapitre renvoie à des études de cas, du casque de Charles VI aux statues de Rodin, et qui se répartissent en deux volets : les métaux archéologiques, dont la conservation est assurée en milieu protégé, puis le patrimoine métallique situé en extérieur.

Au-delà de leur aspect parfois dramatique, avec un décapage complet de leur surface (tels le pont Alexandre III, la Nageoire de Calder...), les interventions sur les œuvres métalliques situées en extérieur montrent que les techniques de conservation employées par les restaurateurs sont l'aboutissement d'une démarche raisonnée. Ils cherchent avant tout à garantir l'intégrité des œuvres. Grâce à une recherche documentaire et analytique,

ces spécialistes précisent autant que possible l'état d'origine et de conservation des œuvres. Les auteurs exposent de façon claire combien des paramètres, comme l'efficacité, la durabilité, le coût des traitements et de la maintenance, sont déterminants ensuite dans le choix des méthodes de restauration. Lorsque cela est nécessaire, ils font appel à des prestataires de services pour la maîtrise de certaines techniques. Par exemple, la dorure à la feuille, effectuée par des artisans, a ainsi été retenue pour le chantier du dôme des Invalides, après des tests comparatifs de vieillissement avec la dorure par électrolyse. Les restaurateurs affirment ici la spécificité de leur fonction : maîtres-d'œuvres de l'intervention de conservation, ils assument des choix dans l'éventail du possible. À l'heure actuelle, leur préférence va vers une intervention minimaliste, comme le montre l'exemple d'une grille traitée à Sainte-Foy à Conques.

Avec les objets conser-

vés en milieu protégé, on aborde une série d'œuvres issues essentiellement de l'archéologie terrestre et marine. Les métaux et alliages les plus courants dans ces contextes sont le fer, la fonte de fer, le cuivre, le bronze, l'argent, l'or et le plomb. Les études de cas illustrent principalement la mise en œuvre de traitements chimiques et électrochimiques curatifs. Les objets celtiques de Gournay-sur-Arondé sont présentés afin d'exposer aux lecteurs les techniques de nettoyage mécanique. Si on excepte ce développement, il faut se reporter au chapitre «le matériau métal» pour trouver des informations sur la conservation préventive. Par ailleurs, si une partie des contributions dresse un bilan rigoureux des avantages et limites des techniques disponibles, par exemple le traitement par électrolyse des canons provenant de fouilles sous-marines, d'autres méthodes sont traitées de façon arbitraire au regard de la documentation disponible. Ainsi, pour le traitement d'objets ferreux par bains de sulfite alcalin et par plasma d'hydrogène, le lecteur devra s'orienter vers d'autres ouvrages collectifs récents («À la recherche du métal perdu», les nouvelles technologies dans la restauration des métaux archéologiques, sous la direction de H. Meyer-Roudet, Éditions Errance, 1999).

Florence DUSSÈRE, responsable du Laboratoire de conservation-restauration du Musée archéologique du Val d'Oise.



Les restaurateurs recherchent la technique la mieux adaptée à chaque métal. Ici, un calice en argent doré trouvé dans le chœur de l'église de Cergy (95) et restauré au Musée archéologique du Val d'Oise.

Biologie

Classification phylogénétique du vivant

Guillaume Lecointre et Hervé le Guyader. Éditions Belin, 2001
(544 pages, 239 francs).

Ce livre est, à sa manière, un monument et, comme tout monument, il a vocation à être parcouru par des visiteurs aux motivations très variées.

Visitons d'abord le livre du point de vue des professeurs de l'enseignement secondaire et des étudiants en zoologie, auxquels cet ouvrage s'adresse particulièrement. Aucun doute : le monument sera très apprécié. En effet, au cours des 20 dernières années, les idées que l'on se faisait sur la classification du monde vivant ont considérablement changé. À la révolution des méthodes dite «hennigienne», qui consiste en une approche fondée sur l'existence de «groupes-frères» définis par la possession en commun de caractères «évolués», succéda la révo-

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 :
01-55-42-84-05

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Françoise Cinotti (Rédactrice en chef), Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulennec, François Savatier, Laurence Plévert, Marie-Neige Cordonnier, Xavier Muller, René Cuillierier (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet, Céline Lapert, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Pierre Saminadin. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Floryse Grimaud, assistée de Isabelle Huet. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Conseiller scientifique : Hervé This.

Ont également collaboré à ce numéro : Jean-Pierre Franc, Marcel Lambrechts, Christophe Pichon, Martin Schaffar, Pascale Thiollier-Dumartin.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Griesebach. President and Chief Executive Officer : Gretchen Teichgraber. Vice-President : Chuck McCullagh and Frances Newburg.

PUBLICITE France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté d'Irène Limon 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97
Télécopieur : 01 43 25 18 29
Étranger : 415 Madison Avenue, New York.
N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Anne-Claire Ternois : 01 55 42 84 04

SERVICE DE VENTE RESEAU NMPP

Christophe Vitiello : 01 55 42 84 81.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE 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-oides - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

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).

lution des données, c'est-à-dire l'utilisation, en plus des caractères morphologiques, de la composition en acides aminés des protéines, puis des séquences d'ADN et de la structure du génome.

Comme toutes les révolutions, celles de la classification du vivant ont provoqué des remous, même (et surtout!) entre spécialistes, et les personnes intéressées par l'aventure de la vie se sont senti souvent perplexes, voire déroutées.

Ce livre vient à point pour leur apporter, non le résultat final de ces révolutions (car ces révolutions sont fort heureusement continues!), mais un état des lieux fort utile, qu'il sera possible de confronter aux découvertes futures. Comme le dit T. Dobzhansky, un des fondateurs de la théorie moderne de l'évolution : «Imaginez que tout soit complètement connu et que la science n'ait plus rien à découvrir : quel cauchemar!»

Le lecteur non-spécialiste se perdra-t-il dans le dédale de ce monument? Certainement pas dans la partie introductive qui explique, de manière pédagogique et à l'aide de nombreux schémas, comment les spécialistes de l'évolution évaluent les parentés entre les espèces actuelles, et comment ils s'efforcent de reconstituer la généalogie la plus authentique possible du vivant.

Quant à la partie consacrée à la phylogénie du monde vivant, le lecteur attentif ne s'y sentira pas perdu pour de quelques minutes, car il découvrira vite la recette pour passer d'un étage à l'autre, et d'une pièce à l'autre de l'édifice. Tous les êtres vivants à structure cellulaire sont pris en considération (les bactéries, les végétaux, les animaux...). L'ouvrage comprend 15 chapitres, correspondant chacun à une branche maîtresse de l'arbre de la classification. Le lecteur dispose d'une astucieuse brochure, que l'on ouvre à contresens à la fin du livre, pour conserver sous les yeux la fraction de la phylogénie qui correspond à chacun des chapitres, tout en lisant les pages du texte. Une dizaine de pages intitulées «où sont-ils?» sont consacrées aux groupes anciens, invalidés par les classifications récentes (pourquoi avoir appelé ces groupes invalidés des groupes «disparus», ce qui risque de créer des confusions?).

La présentation est aérée, les schémas nombreux et de qualité, y compris de rappels de morphologie fort utiles. Tout a été fait pour faciliter la lecture. Les lecteurs apprendront au moins trois choses : comment se construisent les arbres phylétiques aujourd'hui, quel est l'état de la classification, où se trouve tel ou tel taxon (unité formelle représentée par un groupe d'organismes). Si par exemple vous ne savez pas à qui sont apparentés les Riffia, ces êtres qui entourent les sources

hydrothermales profondes des océans, ou quelle peut bien être la place des Cyclophora, ces commensaux des langoustines découverts il y a seulement cinq ans, courez à l'index du livre et vous aurez la réponse. Vous trouverez aussi des informations sur les premiers fossiles connus de chaque groupe.

Certaines originalités de l'ouvrage soulèvent des questions. Passons sur les choix de développer certains groupes aux dépens d'autres : ces arbitrages étaient difficiles à éviter et reviennent aux auteurs. Plus intrigant : d'après les auteurs, il existerait 233 885 espèces connues d'Angiospermes et 147 005 espèces de Spiraliens. On regrettera que certaines assertions ne soient pas expliquées, fût-ce en quelques lignes, surtout quand il s'agit de phrases-chocs comme «Si tout pouvait recommencer, la probabilité que tout se passe de la même manière est quasiment nulle». Une telle phrase, qui devrait plaire à Ilya Prigogine («La nature nous présente l'image de l'imprévisible nouveauté»), mérite d'être dite, mais devrait être commentée. Même si les auteurs ont pris le parti, dans une place nécessairement limitée, de laisser de côté certaines discussions, on aurait aussi aimé que les transferts de gènes soient mieux évoqués : ils ont probablement été très fréquents aux premiers âges de la vie, et ont engendré à cette période un réseau plutôt qu'un arbre de l'évolution.

De même, la place consacrée au tempo de l'évolution est réduite, ainsi qu'à la question : peut-on considérer qu'il existe, des plans d'organisation «intermédiaires» dans les êtres vivants actuels? On s'attendrait à une analyse plus complète des idées selon lesquelles des diversifications rapides se seraient produites il y a fort longtemps. Pourquoi enfin avoir peu développé le rôle grandissant que les structures du génome en général, et non plus seulement les séquences de tel ou tel gène, jouent dans la mise en place des grandes filiations? Aucun des points que je viens d'évoquer n'est étranger à la classification phylogénétique du vivant...

Certains biologistes auront peut-être la faiblesse de dire «J'aurais fait autrement». C'est évidemment l'illustration de la critique facile et de l'art difficile, et leurs réserves apparaîtront mineures au regard du vide que comble l'entreprise de Guillaume Lecointre et Hervé le Guyader. Je disais que le livre était un monument. Il fallait des connaissances très étendues et du panache pour entreprendre et mener à bien sa construction. Il figurera dans toutes les bibliothèques et sera même le livre de chevet de beaucoup de lecteurs.

Claude COMBES, Laboratoire de biologie animale de Perpignan.