POUR LA
SCIENCE
pourlascience.com
Juillet 2001
Édition française de Scientific American

La vie sur les îles antarctiques

La supercavitation

Les librations de la Lune

Prothèses dentaires étrusques

Canada : $ 8,95 / Belgique : 285FB / Suisse : 11,20FS
M 2687 - 285 - 39,00 F

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 XXIe 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 XXe siècle l'a abrégé par rapport au XIXe : plusieurs mois au début du XIXe, quelques heures à la fin du XXe. 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 XXIe siècle et le XXe qu'il l'a été entre le XXe et le XIXe, 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 XXIe 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 XXe 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 XXIe siècle saura-t-il faire la synthèse entre ces analyses contradictoires. En vertu du théorème «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! Connaissez-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?

POUR LA SCIENCE

BLOC-NOTES
de Didier Nordon 2

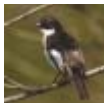
SCIENCE ET ÉCONOMIE
Peinture fraîche 3
par Ivar Ekeland

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'obscure 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 : STONE/TIM DAVIES

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

N° 285 – Juillet 2001

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.

Transportés…

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 physiciens 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

J.-M. THIRIET

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 Demoiselles d'Avignon* 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?

Gérome 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'amusais 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'interférences. 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 inclinaison : 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@pourlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pourlascience.com.

J.-M. Thiriet

Les saveurs amères

HERVÉ 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.

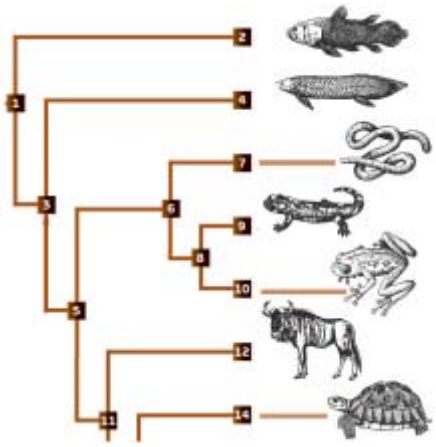
Les cellules réagissent-elles différemment aux cinq molécules amères testées, ou bien certaines cellules sont-elles spécifiques de certaines molécules ? Les physiologistes ont appliqué successivement les cinq stimuli aux mêmes cellules et observé que la plupart des cellules sensibles à l'amer ne réagissent 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 atrophiée 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, 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

«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 donnée raison – qu'elle jouerait un rôle considérable dans le développement de la physique.»

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

Toutes les photos proviennent de la Photothèque de l'École des Houches

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 coté 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 Goldschmicht-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 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 transformée 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 reconstruction 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.

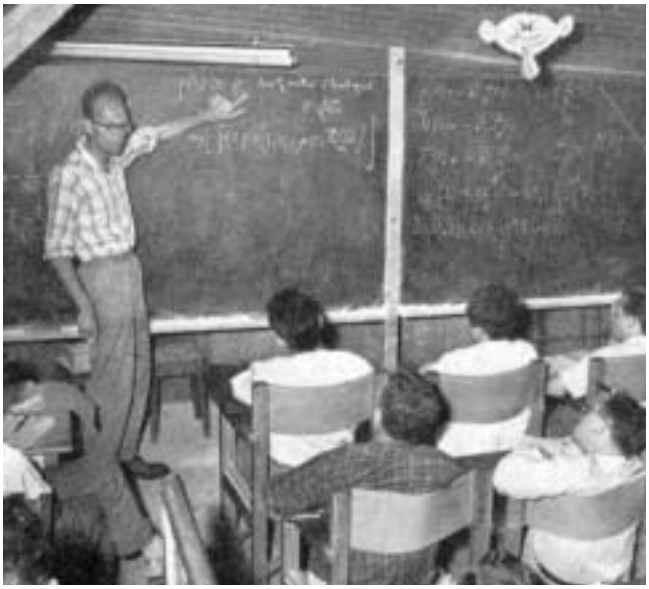
Trente et un élèves, dont seize français allaient suivre les cours de professeurs prestigieux dont W. Pauli, lauréat Nobel 1945, A. Kastler, E. Segré et W. Kohn, futurs titulaires de cette distinction. Les craintes exprimées avant la création par certains administratifs timorés qui pensaient qu'en montagne 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 a exister en tant que mathématicien.»

Alain Connes
Médaille Fiels 1983



À gauche, la salle de cours primitive où enseigne L. Van Hove en 1956. À 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 remplacés par deux sessions d'un mois, suivant-là un mouvement général (les autres écoles d'été sont passé 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 concurrence 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.

Le plus vieux mammifère?

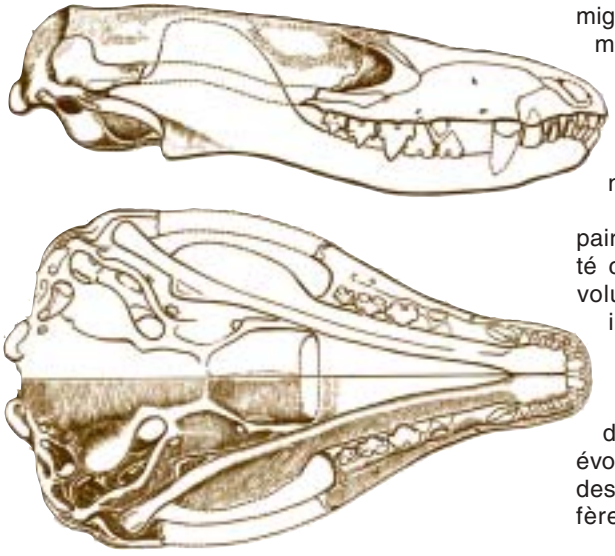
Un crâne fossile reculerait de 45 millions d'années la séparation des reptiles et des mammifères.

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.

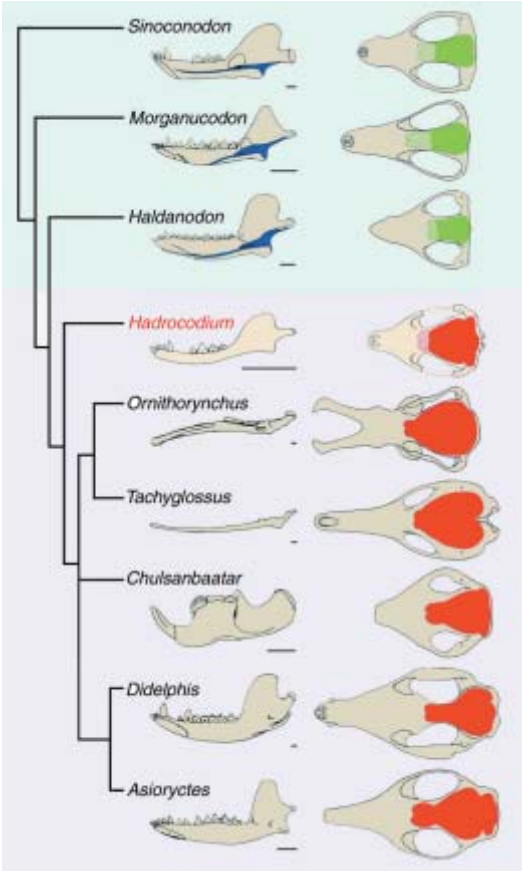
Plus remarquable encore est la mâchoire et son articulation à l'os temporal du crâne. La mandibule des reptiles est composée de plusieurs os, un principal et deux petits de chaque côté qui assurent la jonction avec le crâne. Or, celle de *Hadroconium wui* est d'un seul tenant, tout comme celle des mammifères 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 coévolution, 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.

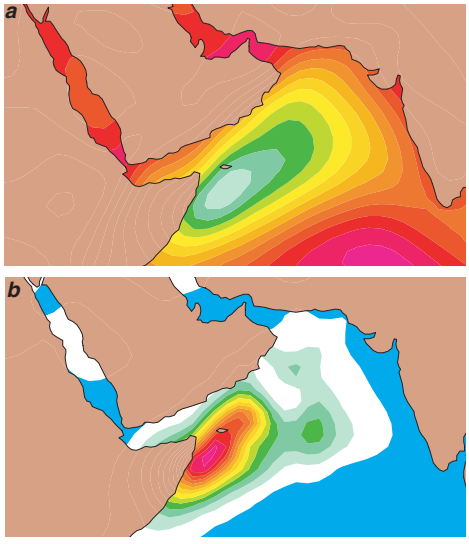
Aucun modèle climatique ne tient compte explicitement des moutons sur la mer. Peut-être à tort, viennent de montrer Pierre-Yves Deschamps du Laboratoire d'optique atmosphérique de Lille et ses collègues de l'Université de Californie à San Diego. Les moutons apparaissent sur la crête des vagues, quand 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 vent à la surface, ont une réflexion très élevée : 55 pour cent en moyenne

Ainsi, l'albédo – la proportion du rayonnement solaire réfléchie – 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.

À 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.



R. Frouin, Scripps Institution of Oceanography

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)*.

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 *Ginko* dans toutes les strates fossilifères, G. Retallak 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 retiraient 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'obscure 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 renvoient 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 semiconducteurs 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.

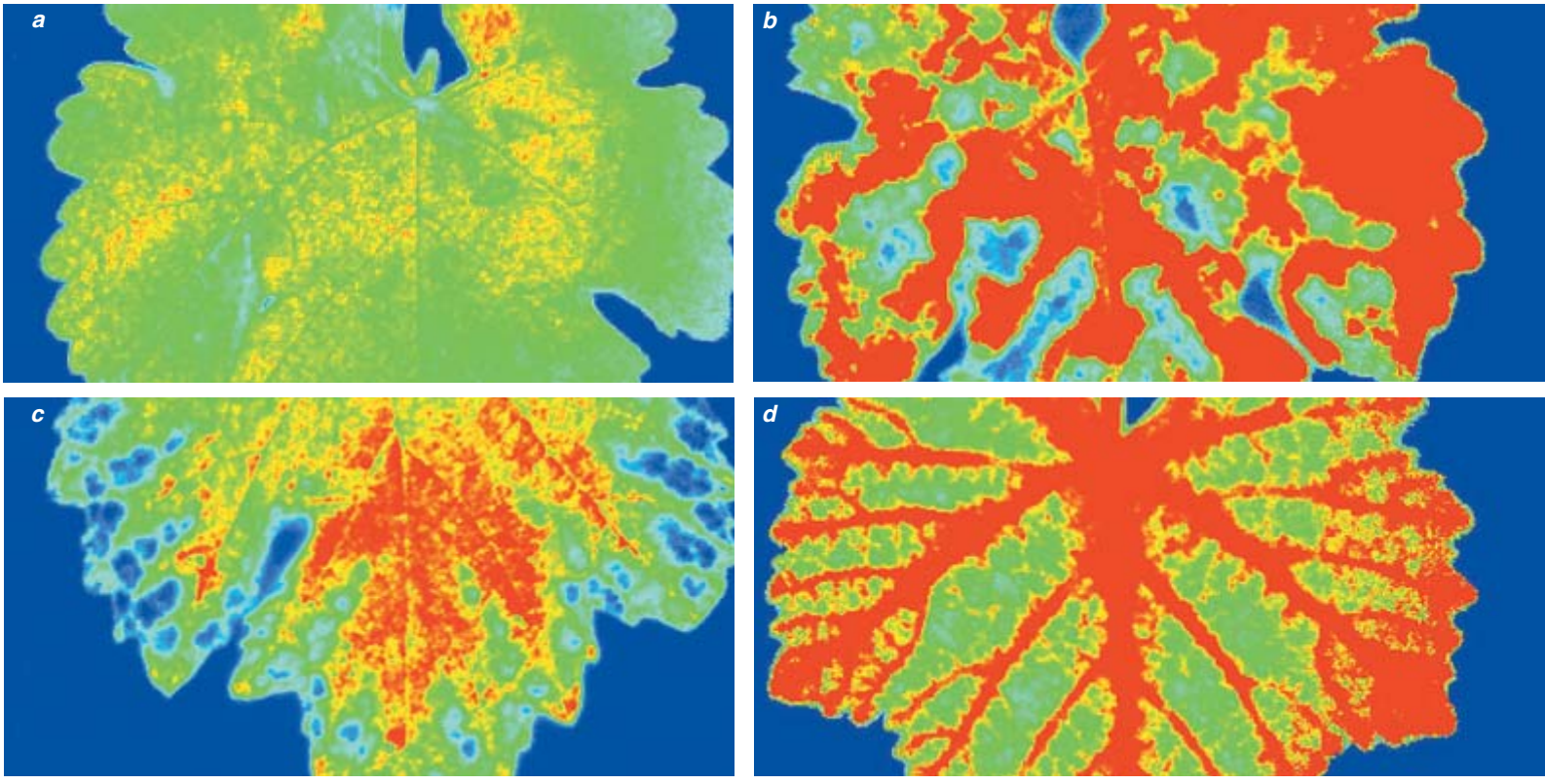
Par cette méthode, on éclaire la plante analysée par un rayonnement ultraviolet proche. Ce rayonnement est absorbé par les molécules ou par les atomes constitutifs de la plante, lesquels en réemettent une partie à des longueurs d'onde supérieures, dans le spectre visible. Le rayonnement rouge est dû 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 méthode 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.