

LA MALADIE D'ALZHEIMER • LES POUSSIÈRES D'ÉTOILES • LES NANOTUBES

Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Février 2001

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

www.pourlascience.com



Les rois des mers
du Jurassique

Canada : \$ 8,75 / Belgique : 277FB / Suisse : 11FS

M 2687 - 280 - 38,00 F



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

TRIBUNE DES LECTEURS

SCIENCE ET ÉCONOMIE

Mauvaise année!

par Ivar Ekeland



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Jeux de texture

par Hervé This

POINT DE VUE

Les politiciens face à la vache folle

par Brigitte Chamak



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Les tunnels alpins

par Mario Sintzel et Gerhard Girmscheid



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ Vagues scélérates

■ Le calculateur prodige ■ La communication des

muqueuses ■ La prothèse de la momie ■ La coloration des vitraux

■ Dans les filets de Scarlet ■ Le froid qui accélère

■ L'ADN en direct ■ L'intérieur de la neige ■ Les forêts, pièges à

dioxyde de carbone? ■ Tête chercheuse ■ L'extinction des

mammouths ■ Des bus chaotiques ■ Satellites par dizaines



ART ET SCIENCE

Un bouquet de Bruegel

par Gérard-Guy Aymonin

LOGIQUE ET CALCUL

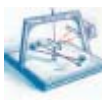
Ce qui est faux... peut être utile

par Jean-Paul Delahaye

VISIONS MATHÉMATIQUES

Le fond et l'informe

par Ian Stewart



IDÉES DE PHYSIQUE

La gravité à très courte distance

par Roland Lehoucq et Jean-Philippe Uzan



ANALYSES DE LIVRES

■ Dinosauriens. Enquête sur une disparition, de Eric

Buffetaut ■ Le grain de blé, composition et utilisation,

de Pierre Feillet ■ OGM, le vrai débat, de Gilles-Eric Séralini.

Deux encarts d'abonnement entre les pages 18 et 19, un encart broché service lecteurs et une carte d'abonnement entre les pages 98 et 99. Un encart parrainage pour les exemplaires destinés aux abonnés. Un dépliant trois volets «Pour la Science vous recommande» sur tous les numéros.



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 maîtres des océans jurassiques

par Ryosuke Motani

Pendant que les dinosaures étaient les maîtres des continents, les ichthyosaures, des reptiles aux allures de poissons, régnaient sur les océans.



La maladie d'Alzheimer

par Peter Saint-George-Hyslop

On commence à élucider les mécanismes biochimiques responsables de cette maladie qui détruit inexorablement les capacités cognitives, et la vie elle-même.



La perception subliminale

par L. Ferrand et J. Segui

La perception non consciente d'images modifie notre comportement. Toutefois, qu'on se rassure, les manipulations mentales par messages subliminaux sont impossibles.



Les secrets des poussières d'étoiles

par Mayo Greenberg

De minuscules grains de poussière flottent dans l'espace interstellaire; ils ont eu une influence notable sur l'évolution de notre Galaxie.



Les maladies de nos ancêtres

54

par O. Dutour et Y. Ardagna

Les ossements anciens présentent parfois des lésions ou des déformations ; le paléopathologiste dépiste ces indices et en déduit les maladies en cause.



Les marées noires naturelles

62

par Ian MacDonald

Dans le golfe du Mexique, du pétrole s'échappe naturellement des fissures du fond marin et se répand dans l'océan.

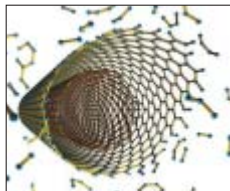


Les nanotubes en électronique

68

par P. Collins et P. Avouris

Plus résistants que l'acier, les nanotubes devraient améliorer la rapidité, l'efficacité et la longévité des composants électroniques.

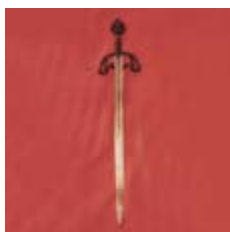


L'épée du Cid

78

par A.-J. Criado, J.-A. Martin, J.-M. Jiménez et R. Calabres

L'épée qui fut sans doute celle du Cid date du XI^e siècle. Elle a traversé les siècles malgré des réparations maladroites.



Un monde de spins

86

par Brian Hayes

Les physiciens continuent à étudier le modèle d'Ising, une représentation simplifiée de l'aimantation. Après de francs succès à une et deux dimensions, ils simulent le modèle à trois dimensions.



Vraies bonnes idées fausses

Qui se souvient d'Arnould Galopin, écrivain de science-fiction du tout début du siècle passé (XX^e) dont les ouvrages au label rouge et or pesaient lourdement dans les mains des lauréats des distributions de prix? Galopin, écrivain populaire, a eu une intuition étonnante. Écoutons son héros, *Le Docteur Oméga* : «Depuis Lavoisier il était bien évident que le poids d'un corps composé devait être égal à la somme des poids des corps composants. [...] Un jour, après avoir minutieusement pesé les différents minéraux qui devaient se combiner dans mon cubilot, je m'aperçus... que la balance indiquait un poids sensiblement inférieur à celui qu'elle aurait dû marquer.»

Le docteur Oméga, ne déduit pas du défaut de masse, comme Einstein le prédira après lui, que la masse manquante s'est transformée en énergie, mais qu'il s'est formé un corps de masse négative, donc repoussé par les autres masses. Notre bon docteur se servira de cette substance, qu'il dénomme *répulsite*, pour aller sur Mars, où il accomplira maints exploits gullivériens. Aux temps héroïques de la physique, où les plus folles intuitions se donnaient libre cours, où les physiciens inventaient des particules aux propriétés bizarres, n'est-il pas un qui a suivi cette hypothèse d'une masse négative?

Les images subliminales sont nées aussi d'une fausse intuition. Un publicitaire espérait que des images, intercalées et non perçues consciemment de *Pop-Corn* et de *Coca-Cola*, inciteraient les spectateurs, durant l'entracte, à dévaliser les distributeurs. Cette hypothèse a fait long feu, mais elle a intéressé les chercheurs, qui ont montré que perception et conscience de cette perception sont deux activités distinctes (voir *La perception subliminale*, pages 42 à 47). L'ingéniosité des expériences ayant démontré ce phénomène de perception est admirable, tout comme les confirmations par l'imagerie cérébrale.

Nombre des intuitions mathématiques sont erronées et la communauté des mathématiciens met parfois quelques dizaines d'années à s'en rendre compte (voir *Ce qui est faux... peut être utile*, pages 100 à 105). Mais ces méprises dévoilent des pans de vérité que nous n'aurions pas abordés si nous ne les avions pas commises : là aussi, l'erreur peut être corne d'abondance.

Philippe BOULANGER



BLOC-NOTES

DIDIER NORDON

Ah, les braves genres

De La Rochefoucauld à Cioran, les moralistes s'accordent sur un point : vus de près, les prétendus hommes de bien sont, en général, de franches canailles. Énonçons ce constat sous la forme d'un aphorisme : les bonnes gens sont méchants.

Au vrai, ce n'est pas pour sa morale, trop banale, que j'avais fabriqué la formule ci-dessus, mais pour donner un exemple de phrase localement correcte et globalement incorrecte, ce qui est un paradoxe amusant – et pas banal, lui. Dire «les bonnes gens» est correct. Dire «les gens sont méchants» l'est également. Le mélange de masculin et de féminin obtenu en rapprochant ces deux tournures semble tellement incongru que je croyais incorrecte la phrase : «les bonnes gens sont méchants.» Manque de chance, elle est irréprochable et je n'ai aucun droit à l'expulser hors de la langue française. En effet, notre grammaire veut (en gros) que les adjectifs placés après gens soient masculins, et que ceux placés avant soient féminins sauf s'ils ne sont avant que par inversion. Le dictionnaire Robert tient ainsi pour correcte la phrase suivante : «Instruits par l'expérience, les vieilles gens sont prudents.»

Dire qu'il se trouve des beaux esprits pour prétendre que la langue française est la plus pure expression de la raison!

Experts en consensus

Si, sur tel ou tel problème complexe, les experts sont d'accord, le citoyen de base est soulagé : il n'hésite plus, il se range à l'avis unanime soutenu par ceux qui savent, et il est sûr d'avoir raison. Pourtant...

Un avis très majoritaire dans quelque collège d'experts s'impose aux autres experts du collège et les contraint plus rigoureusement que l'opinion majoritaire d'une société ne contraint les citoyens. Il est plus difficile à un expert de résister à la pression exercée par la masse de ses collègues qu'à un citoyen de résister au courant dominant.

C'est qu'un expert a tout à perdre s'il joue seul contre tous. Ses collègues savent de quoi ils parlent. À ne pas penser comme eux, il semble montrer qu'il sait non pas mieux (allons donc!), mais moins bien. En plus, camper seul sur ses positions, cela s'appelle «faire l'original», ce qui est la dernière chose que la société attend d'un expert. Elle a besoin de savoir, elle veut qu'il dise, et le rejette comme un rigolo

si elle a le sentiment qu'il cherche à se distinguer. Chez un expert, l'originalité est tout sauf une vertu. Proclamer son accord avec ses collègues lui donne une crédibilité beaucoup plus grande. Si, sans aller jusqu'au désaccord, il manifeste des doutes que ses collègues ne manifestent pas, il paraît peu sûr de lui. Là encore, il perd sa qualité, car le professionnalisme d'un expert s'exprime par son assurance. Ces inconvénients ne seront pas compensés si, par hasard, l'avenir lui donne raison. Être resté solidaire d'une profession qui s'est globalement trompée ne marginalise pas. Avoir été seul à ne pas se tromper marginalise et attire des inimitiés durables.

Le conformisme n'est pas moins à craindre chez un expert s'exprimant sur son domaine qu'il ne l'est chez un citoyen parlant hâtivement, mais sans y risquer son rôle social, d'un sujet qu'il connaît mal.



Parapluie, trampoline, surf

Un texte intellectuel se caractérise par son usage des citations. Or il n'y a guère que trois façons de citer.

La citation-parapluie, pour se couvrir. Exemple. Je juge que Finkelkraut occupe plus de place dans les médias que ses talents ne le justifient, mais je n'ose pas l'attaquer de face. Qu'à cela ne tienne! Bouveresse l'a accusé de pratiquer le copinage. Je cite donc Bouveresse et, abrité derrière son autorité de professeur au Collège de France, je ne crains plus que Finkelkraut vienne me chercher noise.

La citation-trampoline. Prendre un texte d'un auteur canonique, Freud par exemple (c'est un de ceux avec qui elle réussit le mieux). Décortiquer le texte, le commenter, explorer longuement quelque piste extraordinaire ouverte par lui, puis revenir au texte et expliquer qu'on peut l'interpréter tout autrement, fouiller non moins longuement cette nouvelle voie,

revenir encore au texte pour analyser ses limites, montrer comment les dépasser, revenir encore et toujours au texte, décidément inépuisable, afin d'en souligner l'étonnante modernité, etc. À force de s'élaner depuis le texte, de retomber dessus, de rebondir de plus belle, le glossateur arrive tellement haut qu'il finit par passer pour aussi profond que Freud (dans ce cadre, profond et haut sont synonymes).

La citation-surf est répandue en sciences humaines. Pastichons (à peine, hélas). *Il y aurait toute une archéologie, au sens foucauldien, à repérer dans la déconstruction (Derrida) qui – sous l'effet de l'incertitude heisenbergienne conjuguée à l'incomplétude gödelienne, sous couvert de la relativité einsteinienne – a fait passer notre imaginaire (nous empruntons le terme à Gilbert Durand) d'une foi laplacienne dans le déterminisme jusqu'à ce sentiment moderne (Baudrillard) de complexité cher à Edgar Morin et fondateur de l'imaginaire social (Castoriadis) contemporain.* Quiconque recourt à la citation-surf démontre ipso facto que sa pensée coïncide avec l'ensemble vide. Inutile de s'imposer la pénible lecture de son livre, on peut le refermer sans manquer quoi que ce soit. Malgré son apparence désagréable, la citation-surf est donc, pour le lecteur, une aubaine.

La rosse... l'espace d'un matin

De Malherbe et Ronsard jusqu'à Aragon, la rose fait une belle carrière dans la poésie française. Pourquoi? Pas pour son parfum. Ni pour sa grâce éphémère. Mais, tout simplement, parce qu'elle est une des rares fleurs dont le nom en français ne soit pas hideux. Le moins musicien des versificateurs renoncera à ces rimes pourtant faciles que lui offrent hortensia et pétunia, catleya et camélia, clivia et forsythia, magnolia et zinnia, kniphofia et kolkwitzia, gloxinia et rudbeckia, rhododendron et platycodon. Et si une inspiration malheureuse l'a conduit à orner une fin de vers d'un géranium, il choisira pour rimer un composé chimique plutôt qu'une fleur : chlorure de sodium est plus poétique que pélargonium ou podophyllum!

Un tel systématisme dans la laideur ne peut être dû au hasard : jalouse de leur beauté, la langue se venge des fleurs en les affublant de noms repoussants...



TRIBUNE DES LECTEURS

Air France vs SNCF

Difficile de résister à la chronique d'Ivar Ekeland *Voyage à Bast(i)a* (voir *Pour la Science*, décembre 2000), tant, sous une forme plaisamment didactique, elle illustre à merveille le vice fondamental de l'économie mathématique, régulièrement dénoncé par les plus grands économistes, (Marshall, Keynes, Mises...) : inventer des concepts imaginaires, au mépris des observations élémentaires, pour se livrer à des raisonnements formellement rigoureux, mais sans rapport avec la réalité.

D'abord cette manie des économistes de vouloir que toutes les manifestations de l'action d'une entreprise soient la conséquence explicitement voulue d'une stratégie rationnelle, alors que tous les praticiens savent d'expérience qu'il n'en est rien. C'est à la fois surestimer grossièrement la rationalité des agents économiques et sous-estimer tout aussi grossièrement les effets du hasard et des causes non économiques. Les retards ne font pas partie de la stratégie d'*Air France*, et la différence avec la SNCF n'est pas d'abord une différence de stratégie ; c'est que contrairement à la SNCF qui maîtrise presque tous les paramètres du trafic ferroviaire, *Air France* ne maîtrise que très imparfaitement les paramètres du trafic aérien. Les risques et l'incertitude y sont plus grands et donc les coûts de la sécurité très supérieurs. Qu'il n'y ait jamais de retard sur les lignes aériennes est tout simplement inenvisageable pour un coût raisonnable. La différence avec la SNCF est moins une différence de stratégie qu'une différence « naturelle » d'activité qui est pour l'économie une donnée exogène et limite le choix des stratégies possibles de chaque acteur.

De même pour la distinction entre « biens d'expérience » et biens ordinaires, Ivar Ekeland n'a-t-il jamais acheté d'œufs avariés ? Dans la réalité, le cas général est qu'on ne peut constater la qualité qu'après l'achat, surtout si les caractéristiques constitutives de cette qualité ne sont pas encore fixées au moment de l'achat, ce qui est le cas quand le processus de production du bien n'a pas encore été exécuté (on parle alors de « service »). Tous les biens réels répondent à la définition des biens « d'expérience », et ceux qui ne le seraient pas sont pure fiction. Si la théorie classique du monopole ne s'applique pas aux biens d'expérience, elle ne s'applique donc jamais dans le monde réel ! La théorie classique du monopole n'avait d'ailleurs pas besoin de cela pour être invalidée ! Plusieurs économistes pourtant néoclassiques (Stigler, Baumol) ont déjà montré qu'elle n'est vraie qu'en l'absence d'économies d'échelle et si le monopole n'est pas « contestable », autrement dit si le monopole est à la fois artificiel et protégé,

ce que seul peut être un monopole d'État comme la SNCF, mais plus *Air France*. Si cette théorie est le résultat « le mieux assuré » de la modélisation mathématique en économie », que dire alors du reste ?

Bref, pour tenter de comprendre son infortune, Ivar Ekeland a fait appel à des concepts qui forment la base d'un divertissement intellectuel – l'économie mathématique – sans doute passionnant pour ses adeptes, mais trop étranger à la réalité pour être d'un quelconque secours, fût-ce psychologique...

Gérard DREAN, Jouy-en-Josas

Réponse d'Ivar Ekeland

On peut effectivement présenter *Air France* comme une victime de circonstances indépendantes de sa volonté. Il faudrait alors expliquer pourquoi *Air France* persiste à annoncer des horaires qu'elle sait ne pas pouvoir respecter, et pourquoi elle n'aborde pas le problème de front, en annonçant, par exemple, un tarif dégressif suivant l'heure de départ.

Par ailleurs, si vraiment les retards ne dépendaient que du trafic aérien autour de Paris, cela impliquerait qu'ils sont indépendants de la destination, c'est-à-dire que le Paris-Bastia est aussi souvent et aussi longtemps en retard que le Paris-Madrid, l'un et l'autre partant d'Orly. Il ne me paraît pas évident que ce soit le cas : autour de moi, ce jour-là, j'entendais dire qu'*Air France* était toujours à l'heure sur les vols internationaux.

Quant aux œufs, non, je n'en ai jamais acheté d'ariés : je ne les aime pas, et je fais donc attention à la date de péremption qui est inscrite sur la boîte.

Les réels en physique

Dans l'article *L'infini, pierre de touche du constructivisme* (voir *Pour la Science*, décembre 2000), Alan Carter s'interroge, en conclusion, sur l'usage des nombres réels en physique. Je me suis moi-même, à plusieurs reprises, prononcé sur ce sujet. En effet, d'une part, même si les nombres réels sont d'une redoutable efficacité (en particulier par l'intermédiaire des équations différentielles), il n'est pas possible de ne pas se demander s'ils sont bien les « nombres de la nature » ? D'autre part, le physicien, tout comme l'ingénieur, fait aujourd'hui largement (trop ?) appel à la simulation numérique, lors des activités de type expérimentation virtuelle.

Or l'ordinateur est, par essence, une machine tout à la fois limitée (ses « mots » ne contiennent qu'un nombre fini de bits, ses mémoires ne contiennent qu'un nombre fini de mots...) et discrète (l'information, pour y être manipu-

lée, doit être quantifiée et échantillonnée). Les nombres réels y sont très grossièrement représentés par les nombres dits « flottants », pour lesquels, en toute généralité, les opérations élémentaires ne sont pas internes et perdent leurs propriétés les plus élémentaires (comme l'associativité). Par conséquent, le continu et les divers infinis n'existent pas, numériquement parlant, dans nos machines. En général, cela conduit pour chaque opération élémentaire effectuée à une erreur d'arrondi et peut mener à des résultats complètement faux, par exemple, dans le cas des modèles non linéaires.

Alors, il semble qu'effectivement « les mathématiques du continu sont mal ajustées aux besoins véritables du physicien », il importe que la recherche fondamentale à mener sur ce sujet soit faite sans négliger le rôle de plus en plus important que les informaticiens théoriques et appliqués jouent dans l'ensemble de nos activités (l'outil n'est pas neutre...).

Jean-François COLONNA, Palaiseau.

Univers fini ou infini

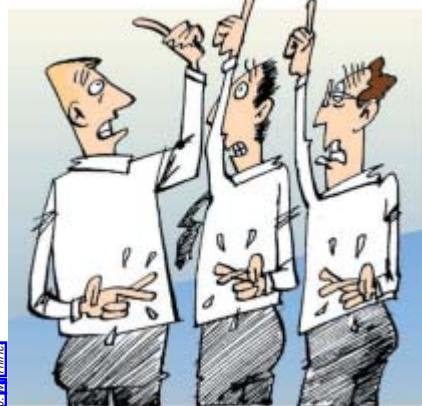
J'ai été ravi de voir qu'un numéro entier de *Pour la Science* ait comme sujet l'infini (voir *Pour la Science*, décembre 2000). Pourtant, j'ai été également déçu que la question de la finitude ou l'infinitude de l'espace, dans le cadre du modèle standard du Big Bang, soit ignorée, bien qu'elle soit un thème fondamental de la cosmologie empirique d'aujourd'hui.

La Terre est-elle infiniment grande ? Non, elle est... ronde et finie. Ce qui n'est plus controversé. Or, dans la communauté des cosmologistes observationnels, nous nous interrogeons toujours sur la forme globale de l'Univers. Nous ne savons pas du tout si l'Univers (ou plutôt une hypersurface spatiale de celui-ci, en mots plus techniques) est fini(e) ou infini(e). Karl Schwarzschild en a parlé en 1900, et *Scientific American* en a fait une excellente revue en avril 1999.

Une analyse observationnelle plus récente, concernant les observations du fond diffus cosmique par le satellite COBE, démontre que la finitude de l'Univers reste toujours une question très abordable empiriquement, dans le cadre du modèle de Friedmann-Lemaître, (c'est-à-dire, où l'espace est toujours continu, sans bords, et presque homogène).

Boud ROUKEMA,
Observatoire de Paris-Meudon

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.



Mauvaise année!

IVAR EKELAND

L'année boursière a été traumatisante. Toutefois, sur de longues périodes, les individus gagnent en Bourse 7% de plus que les épargnants de la Caisse d'épargne. Cette différence est la prime de risque.

Autant l'année 1999 avait été euphorique sur les places boursières, autant 2000 a été décevante. Le NASDAQ a perdu 39% depuis le début de l'année, le Dow Jones 6,2%, et si le CAC 40 ne perd «que» 0,6%, il faut se rappeler qu'en 1999 il avait gagné 51,12%. À la Bourse comme à la boxe, on appelle cela une correction et tous ceux que les performances de l'an dernier ont incité à placer leurs petites économies à la Bourse terminent l'année au tapis.

Pourquoi la Bourse a-t-elle chuté en 2000 alors qu'elle avait monté en 1999? Les explications foisonnent : c'est la bulle financière qui s'est dégonflée, ce sont les valeurs technologiques qui étaient surévaluées, c'est la nouvelle économie qui n'a pas tenu ses promesses, c'est le prix du pétrole, c'est la mauvaise tenue de l'euro. Effet comique garanti et inusable de l'avertissement après coup, si bien stigmatisé par Edgar Faure, qui disait d'un jeune et brillant énarque, promis à un grand avenir : «Giscard est excellent pour expliquer pourquoi cela n'a pas marché.»

Tout cela n'aide guère l'investisseur qui souhaiterait être prévenu, de manière à ne placer ses économies qu'à bon escient. Dans le même souci de précaution, le capitaine des pompiers, immortalisé par Christophe, dans «Le sapeur Camember», avait donné l'ordre que l'on essayât les lances la veille de chaque incendie. Pour louable que soit cette intention, elle est «logiquement irréaliste» : si l'on savait que demain il y aura un incendie dans la commune, l'on prendrait des précautions (et l'incendie ne se produirait pas), et si l'on savait que l'action X, cotée 100 F aujourd'hui, en vaudra 200 demain matin, bien fou qui la vendrait 100 F aujourd'hui.

Le vrai problème du détenteur d'une action, c'est l'incertitude : son action pourra valoir beaucoup plus (il suffit qu'une OPA soit annoncée), elle pourra aussi valoir beaucoup moins (il suffit que le PDG de la société annonce que les résultats seront moins bons que prévu). Le détenteur d'actions est un inquiet qui se sent à la merci de tout ; il n'a jamais été au Japon, mais

il écoute les informations tous les matins pour savoir où en est le *Nikkei* ; il a toujours évité les tribunaux, mais il suit le procès *Microsoft*. Il a d'heureuses surprises, comme la flambée des cours en début d'année, mais paradoxalement les bonnes nouvelles l'inquiètent presque autant que les mauvaises, car il craint de perdre ce gain. Ces variations imprévisibles constituent ce que les financiers dénomment le risque.

Il y a des placements sans risque. Mon argent à la Caisse d'épargne donne 3% nets d'impôts tant que je l'y laisserai (et tant que le taux ne changera pas), et je pourrai le retirer à tout instant (soit que j'en aie besoin, soit que j'aie trouvé mieux ailleurs). La plupart des placements boursiers sont risqués : si j'achète un portefeuille d'actions, je ne sais ni combien il me rapportera tant que je le conserve (les dividendes dépendent des performances de la société et de la politique de ses dirigeants) ni combien j'en tirerai le jour où je vendrai. Le portefeuille peut valoir plus, comme il peut valoir moins : ce risque est un des deux éléments d'appréciation que le financier utilise pour juger d'un placement, l'autre étant le rendement.

Hélas, le rendement réel d'un placement n'est connu qu'à la fin, quand on sait comment les cours auront évolué. Au moment d'investir, on se contente d'un rendement probable, qui peut être une moyenne calculée sur les années précédentes, ou une prévision faite par les analystes financiers, ou une combinaison des deux. Quoi qu'il en soit, ce rendement probable n'est en rien garanti, et l'investisseur devra donc tenir compte du risque inhérent au placement. Rendement probable d'un côté, risque de l'autre, ce couple détermine le comportement des investisseurs.

À rendement probable égal, les investisseurs préfèrent toujours le placement le moins risqué. Un portefeuille d'actions qui offre un rendement probable de 3% après impôts n'aura pas de clients, lesquels préféreront la Caisse d'épargne.

La différence entre le rendement probable d'un placement risqué et le rendement sans risque (ici 3%) est dénommée la prime de risque : elle est d'autant plus élevée que le placement est plus risqué. Ainsi, ceux qui investissent dans une *start-up* internet, dont le taux de survie à un an est de 1/4, en attendent des rendements très importants en cas de réussite, au moins 100% par an, de manière que le rendement probable soit de l'ordre de 25%, ce qui correspond à une prime de risque de 22%.

Cette notion de prime explique d'autres phénomènes apparemment paradoxaux. Il est, par exemple, avéré que, sur une longue période, il vaut mieux placer son argent à la Bourse qu'à la banque. Aux États-Unis, de 1926 à 1990, en dépit des nombreuses crises financières qui ont émaillé le siècle, la rentabilité moyenne des placements en actions, corrigée de l'inflation, dépasse de 7% le taux sans risque. En termes de rendements, il n'y a pas photo : avec une différence de 7% par an, 1F placé en actions pendant dix ans rapportera en moyenne autant que 2F sur un compte rémunéré. Pourquoi les gens s'obstinent-ils à porter leur argent dans les caisses d'épargne, alors qu'ils auraient un bien meilleur rendement en bourse?

La réponse est que les 7% de différence représentent la prime de risque, c'est-à-dire le rendement supplémentaire qu'il faut laisser espérer aux investisseurs pour qu'ils acceptent de faire moins (ou plus) qu'ils n'escomptaient. Certes, la plupart du temps, on fait plus : c'est la première fois depuis 1995 que le CAC 40 termine l'année en baisse. Mais quand on fait moins, cela peut faire très mal : nombre de valeurs phares de 1999 ont perdu 40 à 60% cette année. Pour celui qui a perdu la moitié de son argent en 1999, la perspective de le regagner dans cinq ou six ans n'est qu'une piètre consolation. Les placements sans risque, même à 3%, ont encore de beaux jours devant eux.



Jeux de texture

HERVE THIS

L'exploration d'émulsions qui gélifient conduit... à un gâteau au chocolat.

Les émulsions sont des sources inépuisables de découvertes culinaires. Toutefois, ici, elles ne seront qu'un point de départ, et nous conduiront à des systèmes physico-chimiques plus complexes, que chacun peut pourtant réaliser en cuisine.

Au fil des mois nous avons considéré plusieurs types d'émulsions. La vedette est évidemment tenue par la mayonnaise, le prototype de l'émulsion citée par tous les livres de «physique de la matière molle». Elle s'obtient par dispersion, dans l'eau, de gouttelettes d'huile stabilisées par les protéines du jaune d'œuf. Voilà le thème ; abordons maintenant les variations.

La première est la mayonnaise sans jaune d'œuf : on la confectionne comme la mayonnaise classique, mais on remplace le jaune par le blanc. En effet, le blanc d'œuf est composé de 90 pour cent d'eau et de 10 pour cent de protéines, qui ont le même type de propriétés «tensioactives» que les protéines du jaune. En pratique, la procédure est exactement la même que pour la mayonnaise habituelle : dans un bol, on ajoute goutte à goutte de l'huile à un blanc d'œuf, en fouettant. Au début, le blanc mousse, mais, progressivement, l'huile, divisée en gouttelettes de plus en plus petites par l'action du fouet, remplace l'air qui se trouve dans les bulles. Comme les bulles d'air, les gouttelettes d'huile sont stabilisées par les protéines du blanc d'œuf, car ces dernières sont déroulées par le cisaillement du fouet, de sorte que leurs parties hydrophobes viennent au contact de l'huile, les parties hydrophiles des protéines restant dans l'eau.

Deuxième variation : la mayonnaise sans œuf, que l'on obtient à partir d'un peu d'eau chauffée (ce peut être un fond de crustacé), d'une demi-feuille de gélatine que l'on y dissout, et d'huile que l'on introduit en la fouettant, tout comme on fouette une mayonnaise. Dans un premier temps, une émulsion blanche apparaît, les protéines apportées par la gélatine venant se placer à l'interface de l'eau et de l'huile, autour de chaque gouttelette. Puis, quand cette émulsion repose et refroidit, elle gélifie parce que les molécules de gélatine ont tendance à s'associer par leurs extrémités et à former un réseau au sein duquel l'émulsion est piégée.

Cette gélification s'observe au microscope par un effet indirect : au début de la prise en gel, les gouttelettes d'huile se fondent les unes aux autres (*voir la figure*), parce que les molécules de gélatine qui entouraient les gouttelettes d'huile s'associent, ce qui crée des contraintes supplémentaires. Une fois le gel formé, il libère l'huile si l'on a la curiosité de le fouetter à nouveau (une mayonnaise classique, au contraire, se stabiliserait davantage) : quand on bat le gel, on dissocie le réseau, et les gouttelettes d'huile sont libérées.

Cherchons une nouvelle variation. Le principe de la mayonnaise à la gélatine est le suivant : nous avons formé une émulsion, qui s'est transformée en un gel «physique», c'est-à-dire un gel qui se défait quand on le chauffe, et se rétablit en refroidissant. Pouvons-nous nous amuser à changer quelques ingrédients, afin d'obtenir de nouvelles variations sur le thème ? Revenons à la mayonnaise au blanc d'œuf,

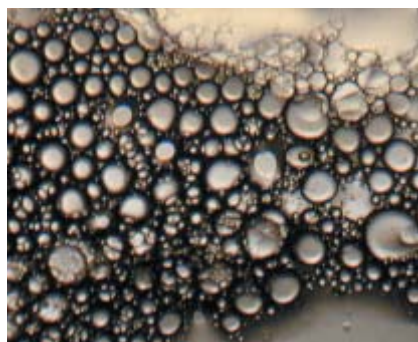
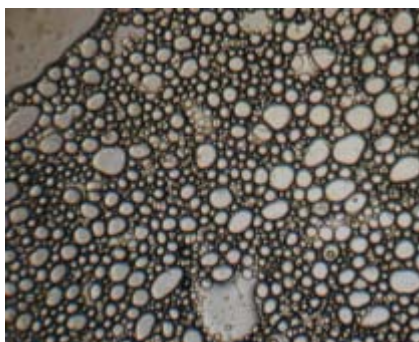
et cherchons à la faire gélifier. En termes moins prétentieux, il s'agit de cuire ! Cette fois, nous prévoyons la formation d'un gel chimique, permanent et non physique, comme avec la gélatine.

En pratique, essayons simplement de passer la mayonnaise au blanc d'œuf au four à micro-ondes pendant une minute environ, afin que les protéines qui entourent les gouttelettes d'huile s'associent : nous obtenons une sorte de masse coagulée où toute l'huile reste piégée. Nous retrouvons un système physique analogue à la mayonnaise gélifiée par la gélatine. L'huile est-elle bien tenue ? Pressons la masse : l'huile en sort.

Passons alors en cuisine et demandons à quoi peuvent bien servir ces jeux de texture, qui ne semblent bons qu'à faire des éponges à huile. À faire tenir les sauces ? Je vous propose plutôt l'idée suivante : remplaçons l'huile par du chocolat (il est composé d'une proportion notable de beurre de cacao) que nous laissons fondre dans une casserole avec un peu d'un liquide contenant de l'eau, tels du rhum, du café, du jus d'orange... Puis, quand la température de l'émulsion de chocolat ainsi formée est inférieure à la température de coagulation de l'œuf (62 °C), versons l'émulsion de chocolat sur un blanc d'œuf, en fouettant. Ayant formé l'émulsion de chocolat, cuisons la préparation au four à micro-ondes. Prédiction : les protéines du blanc d'œuf vont gélifier et emprisonner l'émulsion de chocolat.

Je vous recommande l'expérience : vous obtiendrez un délicat gâteau au chocolat ! Son goût est bien plus puissant que celui du chocolat, sans doute parce que le chocolat est dans un état dispersé, et sa texture est originale (on peut l'ajuster à volonté en modifiant les proportions d'eau et de chocolat). Je vous propose de le nommer «dispersion de chocolat»... et d'étudier comment, dans les trois systèmes considérés, la gélification perturbe l'émulsion.

Prochain rendez-vous *France Info* et *Pour la Science* le 27 février 2001, avec la chronique *Info Sciences* de Marie-Odile Monchicourt.



Ces deux photographies montrent la même zone d'une «mayonnaise à la gélatine», à deux instants successifs. La prise en gel a fait fusionner les gouttelettes d'huile voisines (leur diamètre moyen est de un dixième de millimètre sur l'image de gauche).



Les politiciens face à la vache folle

BRIGITTE CHAMAK

Rétention d'informations, lenteur des décisions et surveillance molle de l'application des décrets ont caractérisé cette crise... au moins jusqu'en 1996.

Le mercredi 20 mars 1996, Stephen Dorrell, ministre britannique de la Santé, déclare à la Chambre des Communes que l'encéphalite spongiforme bovine serait transmissible à l'homme par des aliments, sous une forme apparentée à la maladie de Creutzfeldt-Jakob. Pourtant, quelques mois plus tôt, en décembre 1995, le même ministre avait affirmé qu'il n'y avait «aucun risque envisageable». Alors même que les hommes politiques se retranchent derrière les incertitudes scientifiques pour expliquer la lenteur de certaines décisions, l'analyse de l'histoire de la crise de la «vache folle» révèle de nombreux manquements graves aux principes élémentaires de précaution et de déontologie.

En Grande-Bretagne, au début de l'année 1987, pour ne pas nuire à l'industrie de la viande et au marché de l'exportation, les autorités britanniques ne diffusent pas toutes les informations qu'elles détiennent concernant l'épizootie qui touche les vaches britanniques. La publication des cas d'encéphalopathie spongiforme bovine est retardée. En avril 1988, une enquête épidémiologique conduite par John Wilesmith révèle que l'utilisation des farines animales de viandes et d'os est à l'origine de l'épizootie. Pourtant, ce n'est que trois mois plus tard que ces farines seront interdites, délai permettant aux producteurs de farines animales d'écouler leurs stocks.

Ce délai de grâce, l'absence de demande de retrait des anciens lots et le fait que l'exportation des farines animales n'ait pas été interdite confortent l'industrie des farines incriminées à ne pas réellement mettre en œuvre l'interdiction : les éleveurs continuent à utiliser leurs stocks de farines. Ainsi, faute de message clair, des animaux seront contaminés jusqu'en 1996. Par ailleurs, le gouvernement britannique interdit l'utilisation de ces farines, mais en autorise l'exportation ! Sans conteste, cela pose un réel problème de déontologie politique. Par cette attitude, le gouvernement britannique a favo-

risé la propagation de l'épizootie en Europe, via l'exportation des produits incriminés. Le 13 novembre 1989, les abats bovins sont interdits en Angleterre, mais, là encore, ils peuvent être exportés.

Comment la communauté européenne a-t-elle réagi ? L'obsession de la mise en place d'un marché unique et la volonté de garantir la libre circulation des marchandises l'ont conduite à choisir le marché unique plutôt que la prudence et le droit à la santé. Un exemple illustre cet état d'esprit : le 30 mai 1990, la France décide de suspendre temporairement toute importation d'animaux vivants en provenance du Royaume-Uni. Un embargo de même nature est mis en place par l'Allemagne et l'Italie. Un conseil extraordinaire des ministres de l'Agriculture, réuni les 5 et 6 juin 1990, invite la commission à limiter les exportations britanniques de viande bovine qui devront provenir exclusivement d'exploitations où aucun cas de vache folle n'a été confirmé au cours des deux années précédentes. Le commissaire en charge de l'agriculture, Ray Mac Sharry, estime qu'aucune mesure complémentaire n'est justifiée. Le 14 juin 1990 le même commissaire déclare à Strasbourg que toute action unilatérale de la part des États membres limitant la libre circulation des biens de la communauté serait inacceptable.

Le 12 octobre 1990, le comité vétérinaire se réunit à Bruxelles. Un fonctionnaire assistant au débat rédige une note dont le contenu stupéfiant sera révélé dans la presse. Le représentant de la Commission déclare : «Il faut avoir une attitude froide pour ne pas provoquer de réactions défavorables sur le marché. Ne plus parler d'encéphalopathie spongiforme bovine. Ce point ne devrait pas figurer à l'ordre du jour». Au cours de la réunion, on demande officiellement au Royaume-Uni de ne plus publier les résultats de ses recherches. Il faut minimiser cette affaire à tout prix en pratiquant la désinformation.

Le contexte politique et économique était décidément peu favorable aux préoccupations sanitaires. La crise de la vache folle a été gérée par les ministres de l'agriculture soucieux, avant tout, de défendre les intérêts des producteurs de viande bovine. Les ministres de la santé étaient singulièrement absents. L'embargo décidé par la communauté le 27 mars 1996 marque le début d'une évolution dans l'attitude communautaire : désormais les problèmes de santé publique ne peuvent être ignorés... mais la libre circulation des marchandises reste toujours le pivot de la construction européenne.

De surcroît, les intérêts particuliers nationaux sont systématiquement passés avant l'intérêt général communautaire. Après la décision du Comité vétérinaire des 20 et 21 mai 1996 de maintenir l'embargo sur les dérivés de boeufs britanniques, le Royaume-Uni a décidé d'adopter une politique systématique d'obstruction au bon fonctionnement des institutions européennes. La communauté européenne n'a su imposer ni la transparence des informations entre les États membres ni la mise en place d'un réseau de surveillance fiable et efficace. Il faudra attendre le 27 juin 1994 pour que la commission européenne adopte une décision interdisant les farines animales dans l'alimentation des ruminants. Plus grave encore, on comprend mal pourquoi la communauté européenne a suspendu entre juin 1990 et mai 1994 tous les contrôles, au Royaume-Uni, visant à s'assurer du respect de la réglementation concernant la lutte contre l'épizootie.

Tous ces manquements du passé ont eu de graves conséquences. Ce nouvel épisode fera-t-il enfin comprendre que la prééminence des intérêts économiques à court terme se paye parfois très cher ?

Brigitte CHAMAK est historienne des sciences à l'IRESCO.

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

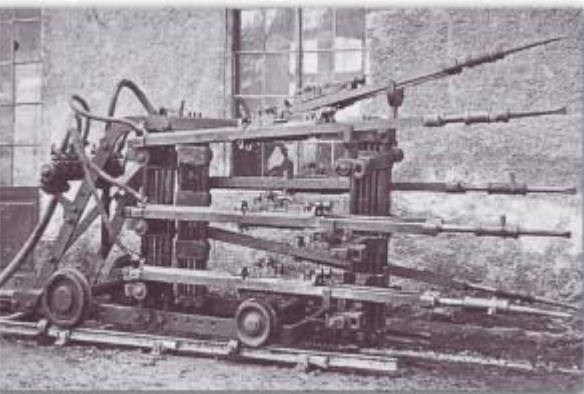
soit **4 € seulement par numéro** au lieu de 5,20 €

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.



Les tunnels alpins

MARIO SINTZEL • GERHARD GIRMSCHEID

A partir de la fin du XIX^e siècle, les tunnels se multiplient dans les Alpes, reflétant le progrès des techniques de construction. Les accidents de chantier diminuent, mais le percement des tunnels reste une entreprise périlleuse.

Les Alpes sont un obstacle majeur à la circulation. Avec leurs 300 milliards de tonnes de roches et de glace répartis sur 72 000 kilomètres carrés, elles forment une barrière entre l'Europe du Nord et l'Europe du Sud. L'histoire du franchissement de ces montagnes, par des sentiers, puis par des routes et, aujourd'hui, par des tunnels, reflète les événements politiques et économiques qui ont eu lieu dans les pays limitrophes, mais aussi l'évolution des techniques.

A partir du XII^e siècle, les personnes qui voyagent entre l'Allemagne et l'Italie empruntent le sentier du col du Saint-Gothard. La gorge de Schöllén est alors barrée par l'éperon rocheux du Chilchberg, que l'on contourne à l'aide d'une rampe en bois, souvent emportée par les eaux. En 1707, l'architecte suisse Pietro Morettini ouvre à l'explosif une trouée de 64 mètres de long dans le rocher, pour former ce que l'on nomme aujourd'hui le trou d'Uri. Avec ses 2,7 mètres de hauteur et presque autant de largeur, cette trouée est saluée comme un exploit. Puis, entre 1818 et 1830, les travaux entrepris par les autorités des cantons d'Uri et du Tessin finissent de rendre cet itinéraire carrossable.

Au XIX^e siècle, un nouveau moyen de transport apparaît : le chemin de fer. La réalisation de voies ferrées à travers les Alpes s'impose. En 1867, les Autrichiens ouvrent la première ligne, qui passe sous le col du Brenner. En 1871, les Français



1. Cette perceuse a été conçue en France et utilisée pour la première fois sur le chantier du tunnel du Mont-Cenis, qui relie l'Italie à la France et qui a été inauguré en 1871.

inaugurent la ligne qui relie l'Italie à la France, en passant sous le col du Mont-Cenis. Entre 1872 et 1882, les Suisses construisent la voie ferrée sous le col du Saint-Gothard, qui relie les villages d'Airolo et de Göschenen. L'ouvrage mesure près de 15 kilomètres de longueur. Pour réaliser ces voies ferrées, on construit des tunnels : les géologues procèdent à des relevés, les ingénieurs établissent les plans, percent des trous de mine et les garnissent d'explosifs. Viennent ensuite les tirs de mines, l'évacuation des déblais et la consolidation des voûtes pour empêcher les glissements de terrain ou l'effondrement de la roche : on pose des poutres de bois pour renforcer la voûte avant de la maçonner. À partir du début du XX^e siècle, les poutres sont remplacées par un coffrage en béton coulé sur place.

Si Pietro Morettini et ses ouvriers perçaient les trous de mine au marteau et au burin dans le front de taille (la surface rocheuse qui barre la section du tunnel), leurs successeurs, qui ont construit le tunnel du Mont-Cenis, puis celui du Saint-Gothard, ont utilisé des marteaux piqueurs à air comprimé qui leur ont facilité la tâche. Ces marteaux piqueurs ont été remplacés ultérieurement par des foreuses hydrauliques : le système de perçage est fixé sur un cylindre, qui tourne sous l'action d'un moteur à air comprimé et qui fait pression sur la paroi rocheuse grâce à un système hydraulique. La foreuse est creuse et munie d'une couronne à trois dents qui attaque et broie la roche.

En 1865, Alfred Nobel invente la dynamite : ce mélange explosif gélatineux constitué de 92 à 93 pour cent de nitroglycérine et



2. Le 23 mai 1882, le premier train à avoir emprunté le tunnel du Saint-Gothard atteint Bellinzona.

de 7 à 8 pour cent de nitrocellulose détrône la poudre noire utilisée jusqu'alors. On ajuste sa puissance explosive en ajoutant du nitrate de sodium et de la sciure de bois. Pour percer le front de taille du tunnel du Saint-Gothard, 24 trous de mines remplis de dynamite suffisent, tandis que pour le tunnel du Mont-Cenis, on avait dû utiliser 80 trous remplis de poudre.

Malgré ces progrès, les ouvriers travaillaient dans des conditions d'hygiène et de sécurité précaires. En l'absence de ventilation sur les chantiers, la silicose fait des ravages, mais on n'en comprend pas encore la cause. Les médecins parlent de «faiblesse du sang», de parasitoses, d'eau potable polluée... En réalité, les poussières de quartz microscopiques que les ouvriers respirent atteignent les ramifications les plus fines des lobes pulmonaires et détruisent les tissus. Seul le géologue allemand Friedrich Stapff (1836-1895) comprend, lors du percement du tunnel du Saint-Gothard, que l'air chargé de poussières est la cause de la maladie et recommande aux mineurs de percer dans une atmosphère humide. L'invention des foreuses hydrauliques permet de suivre ce conseil, car un jet d'eau sort de la tête de forage et entraîne les fragments de roches, limitant la formation de poussière de roche. À la fin du chantier du Saint-Gothard, sur les quelque 20 000 ouvriers qui y ont travaillé, on dénombre 146 décès et 350 accidents graves. Plus de 4 000 accidents se sont produits et ces chiffres ne prennent pas en compte les centaines de mineurs qui ont contracté une silicose.

La construction d'un nouveau tunnel à une seule voie sous le massif du Simplon est entreprise en 1898 et achevée en 1906. Une galerie, qui sert de gaine technique, est élargie pour en faire un second tunnel (à une voie), terminé en 1921. Ces tunnels mesurent 20 kilomètres de longueur. Ils relient Brigue, dans le Valais, en Suisse, et le lac Majeur, en Italie. On fabrique la dynamite dans une usine spécialement construite à proximité du chantier, puis on la transporte, sous la surveillance de policiers, sur des chariots tirés par des mules, jusqu'aux lieux de tir.

En 1911, on prolonge cette ligne vers le Nord. Cependant, sous la vallée de Gastner, les ouvriers rencontrent des roches meubles gorgées d'eau : la galerie s'effondre, tuant 25 mineurs. Pour éviter cet endroit, les ingénieurs reviennent au plan du tunnel qui doit désormais décrire trois courbes de 1 100 mètres de rayon chacune, d'une longueur totale de 2 267 mètres. Pour faire leurs calculs, ils matérialisent des polygones de 100 mètres de côté à l'aide de piquets et déter-



3. Cette foreuse hydraulique a facilité les travaux de percement du tunnel du Simplon, au début du xx^e siècle. Elle pouvait réaliser trois trous de mine en même temps.



4. Le transport de la dynamite qui servait à progresser au cœur de la montagne était périlleux, même quand l'usine de fabrication de l'explosif était proche de son site d'utilisation.

Sciences de la vie

Vient de paraître



LA SYMBIOSE
Structures et fonctions,
rôle écologique et évolutif

M.-A. Selosse
160 p., 139 FF
ISBN 2 7117 5283 6

Egalement aux Editions VUIBERT :

NOUVEAU MEMENTO DE BIOLOGIE

M. Dupont, J. Souchon
et J.-P. Veillat
272 p., 160 FF
ISBN 2 7117 5252 6



COMMENT RÉSOUDRE UN PROBLÈME DE BIOLOGIE

J. Souchon, Cl. Treilhou
176 p., 140 FF, ISBN 2 7117 5251 8

BIOLOGIE & PHYSIOLOGIE HUMAINES

C. Robert, P. Vincent
704 p., 230 FF, ISBN 2 7117 5234 8



DICTIONNAIRES ENCYCLOPÉDIQUES
Ouvrages collectifs
dirigés par
Nicole Aimé-Genty

LE SANG
240 p., 159 FF
ISBN 2 7117 5250 X

LE CERVEAU
208 p., 159 FF, ISBN 2 7117 5249 6

LA CELLULE
256 p., 159 FF, ISBN 2 7117 5248 8

de la Terre & de l'univers

PROBLÈMES RÉSOLUS DE SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

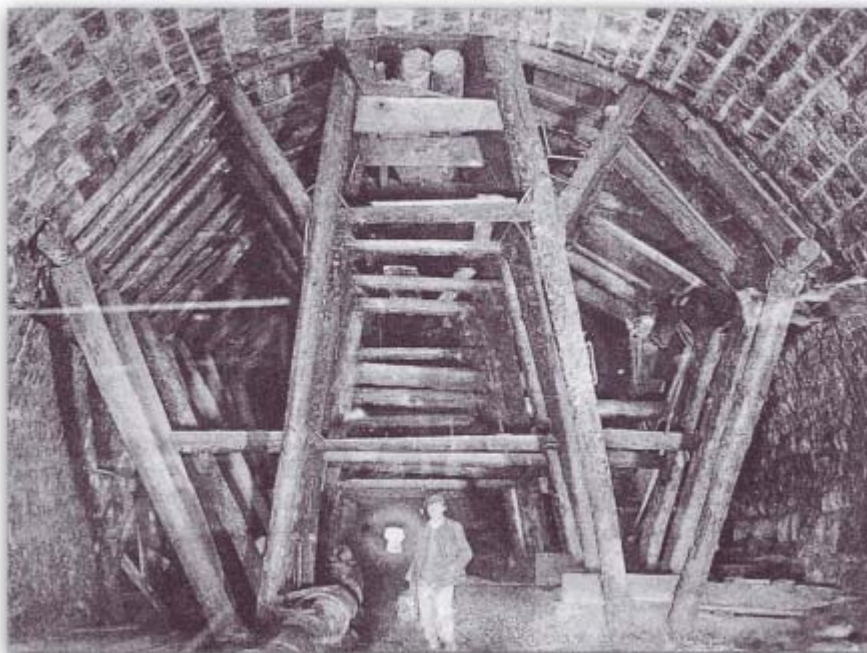
Ouvrage collectif
Coordination :
Ch. Aubourg,
J.-Y. Daniel et
P. De Wever
392 p., 199 FF
ISBN 2 7117 5281 X



SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

A. Brahic, M. Hoffert, A. Schaaf, M. Tardy.
Coordination J.-Y. Daniel
672 p., 255 FF, ISBN 2 7117 5280 1

En vente en librairie. Catalogue sur demande :
Vuibert, 12 rue des Cordelières 75013 Paris
Tél : 01 44 08 49 12
www.vuibert.fr



5. Opération de consolidation du tunnel de Lötschberg, en 1914.



6. Sur le chantier du tunnel du Simplon, les mineurs ont percé les premiers trous de mine, accrochés à la paroi rocheuse par des cordes.

minent les angles avec des théodolites (des instruments de visée munis d'une lunette) et des mires (des jalons pour repérer les directions lors des visées). Ils réalisent «une performance remarquable», comme l'indique le journal local, car le tunnel, une fois terminé, est conforme aux plans ainsi établis : l'erreur sur la longueur se limite à 41 centimètres et sur la hauteur à 10 centimètres.

Au début des années 1950, le développement du tourisme conduit à l'amélioration des routes, que l'on raccourcit en perçant des tunnels routiers. Des tunneliers, mis au point aux États-Unis, en Suède et en Allemagne, remplacent le percement aux explosifs : ces engins gigantesques «rongent» les couches de roches, grâce à une tête de forage rotative appliquée sous pression sur le front de taille. Pour le tunnel routier du Saint-Gothard,

qui relie Göschen à Airolo, comme le tunnel ferroviaire, mais qui suit le tracé du col, on utilise à Göschen des tunneliers équipés de onze bras de forage et montés sur des camions. Ils assurent aux mineurs une protection contre les chutes de roches de la voûte, mais après deux accidents mortels, les ingénieurs renoncent à percer la totalité de la section du tunnel (comprise entre 65 et 80 mètres carrés) en une seule fois : ils procèdent d'abord la moitié supérieure du tunnel et la voûte qu'ils consolident à l'aide d'ancrages, de filets et de béton projeté, avant de dégager la moitié inférieure. À Airolo, les tunneliers sont montés sur un plancher mobile, constitué d'éléments coulisants actionnés par des presses hydrauliques, sur une longueur de 240 mètres. La plate-forme est équipée d'un auvent de protection sous lequel se déroulent les travaux de renforcement et de consolidation, ainsi que le chargement des wagons pour évacuer les débris.

Aujourd'hui, l'action combinée de trépan de plus en plus résistants et de vitesses de rotation supérieures ainsi que le renfort du tunnel par des éléments de béton préfabriqués, consolidés par du béton projeté, autorisent une progression de 20 à 30 mètres par jour. Les tunneliers assurent l'essentiel du gros œuvre. Les explosifs ne sont plus guère utilisés et l'homme n'intervient plus qu'aux endroits les plus délicats.

Mario SINTZEL est ingénieur à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich. Gerhard GIRMSCHEID y enseigne le génie civil.

Vagues scélérates

On commence à comprendre pourquoi des vagues géantes surgissent en pleine mer, même quand la tempête ne fait pas rage.

Le 1^{er} Janvier 1995, au cours d'une tempête modérée où la hauteur des vagues atteignait une dizaine de mètres, une vague s'éleva soudain à plus de 18 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer et endommagea le matériel entreposé sur le pont de la plate-forme pétrolière *Draupner*, en Mer du Nord, bien que toutes les études aient prévu que ce pont était à une hauteur qui garantissait sa sécurité. Les rapports d'accidents mentionnent souvent de telles «vagues scélérates», des vagues géantes qui surviennent même quand la mer n'est pas déchaînée. En 1982, la plate-forme *Ocean Ranger*, au large de Terre-Neuve, a disparu, avec 84 de ses membres, à cause d'une vague scélérate qui a déferlé dans la salle de contrôle ; le navire *Derbyshire*, long de 300 mètres et qui transportait du minerai, a coulé en 1980, à proximité d'un typhon, dans la mer du Japon, probablement à cause d'une vague monstrueuse ; en 1943, une vague brisa les vitres de la passerelle, située à 27 mètres au-dessus de la ligne de flottaison, du paquebot *Queen Elizabeth*.

Certaines vagues géantes ont des origines connues. Ainsi, les raz-de-marée, ou tsunamis, résultent souvent de glissements de terrain sous-marins ; les «rouleaux du Cap», en Afrique du Sud, sont créés par la houle issue des quarantièmes rugissants qui se dirige vers le Nord-Est et qui se heurte au courant des Aiguilles, lequel longe vers le Sud-Ouest la côte Est de l'Afrique du Sud. Les vagues scélérates ne sont pas dues à ces phénomènes, et leur fréquence dépasse les prévisions des théories classiques, selon

lesquelles une vague, comme celle qui a touché la plate-forme *Draupner* en 1995, a une probabilité de l'ordre de trois pour 10 000 de se produire en une année. Toutefois, d'après l'examen des accidents survenus aux plates-formes pétrolières du monde entier, la probabilité serait supérieure à un pour cent.

Ces vagues sont dangereuses et font l'objet d'études, afin que nous puissions, à terme, prévoir les situations à risques pour alerter les professionnels. D'après des observations en mer, des reconstitutions en bassin et des simulations numériques, nous commençons à mieux comprendre leur formation. Les vagues «classiques» sont créées par la friction du vent sur la surface de la mer. Elles se propagent ensuite pendant quatre à cinq jours, avant de rencontrer une côte ou de s'atténuer et de disparaître. Elles se combinent aussi avec des vagues qui proviennent d'autres zones. La répartition de l'énergie est alors assez uniforme dans le temps et dans l'espace. Au contraire, les vagues scélérates concentrent énormément d'énergie vraisemblablement selon un des trois scénarios que nous présentons.

Certaines vagues scélérates se produisent plus fréquemment dans des mers fortes, où les vagues sont déjà formées. Elles proviendraient de vagues jeunes, qui naissent dans une mer en croissance. Ces vagues, de plus en plus hautes, se propagent toujours plus vite, et rattrapent celles que la tempête a déjà produites : les vagues finissent par «s'empiler» au même endroit.

D'autres vagues scélérates résultent de la présence de vents particulièrement violents, mais surviennent pendant les accalmies. Le vent, très fort, dissiperait l'énergie des vagues, un peu comme la soupape de sécurité d'une cocotte-minute et empêcherait les vagues de s'élever pendant la tempête ; au moment où le vent se calme, cette «soupape» serait enlevée et l'énergie emmagasinée serait



Cette vague géante, ou scélérate, se propage tel un mur d'eau. Cette photographie a été prise dans le Golfe de Gascogne, probablement dans les années 1940 ou 1950.

libérée d'un seul coup, donnant naissance à une immense vague.

Selon divers témoignages, certaines vagues scélérates ressemblent à un mur d'eau s'étendant à perte de vue. Elles proviendraient d'une dépression, à l'image d'un raz-de-marée. Plus précisément, différentes vagues surgies du centre de la dépression se conjugueraient en phase et en amplitude pour former une vague unique, et se propager ensuite comme telle.

Les trois scénarios n'ont jamais été détectés simultanément. Ces vagues scélérates sont probablement de différents types, avec autant de mécanismes distincts pour les engendrer. Nous cherchons à prévoir ces vagues à l'avance pour prévenir les personnes concernées et nous essayons d'élaborer une théorie de ces mécanismes. Pour y parvenir plus rapidement, il nous faudra mettre en commun les observations réalisées au sein d'une coopération internationale (Europe, Japon, USA, Russie...), faire l'étude statistique des résultats et valider nos modèles grâce à toutes ces données.

Michel OLAGNON, IFREMER, Brest

La vague géante qui s'est abattue sur la plate-forme *Draupner* a été reconstituée par simulation à partir des signaux mesurés sur la plate-forme 20 minutes avant la vague. Une de ses composantes se trouvait

à 250 mètres en amont 30 secondes avant le drame, une autre à 280 mètres, une autre à 200 mètres, etc. On voit ainsi la vague se rapprocher et les composantes se concentrer jusqu'au maximum (en rouge).

Le calculateur prodige

En observant le fonctionnement de son cerveau, on a découvert, chez un as du calcul mental, un mode spécifique de traitement des nombres.

Petit exercice de calcul mental : $2 + 2$? Facile! Maintenant : 17×12 ? Plus difficile, mais calculable avec quelques trucs et les tables de multiplication durement acquises à l'école primaire. Pour finir : 62 à la puissance 6 ? Vous n'y arrivez pas? C'est que vous n'utilisez pas votre cerveau comme le fait Rüdiger Gamm, un jeune prodige allemand du calcul mental, âgé de 26 ans, qui détermine le résultat de cette opération en quelques secondes. L'équipe de Nathalie Tzourio-Mazoyer, du Groupe d'imagerie neurofonctionnelle du CNRS, à Caen, en collaboration avec celle du neuropsychologue Mauro Pesenti, de l'Université catholique de Louvain, a percé ses secrets.

À l'aide de la caméra d'un tomographe à émission de positons (un dispositif qui mesure le débit sanguin dans le cerveau, indiquant de cette façon les zones cérébrales qui participent à telle ou telle tâche mentale), ils ont visualisé les aires activées lors d'un calcul complexe, et ils les ont comparées avec celles qu'utilise un calculateur normal. Com-

ment calcule-t-on? Depuis l'étude de personnes aphasiques (qui ont perdu la capacité de parler), on sait qu'il existe un rapport étroit entre le langage et le calcul, car des lésions de l'hémisphère gauche qui est dédié au langage entraînent des difficultés à calculer. De plus, des travaux récents effectués par Laure Zago, à Caen, ont mis en évidence, chez des calculateurs normaux, les aires du cerveau sollicitées par un calcul mental simple, et par un calcul complexe, par exemple, une multiplication de nombres à deux chiffres.

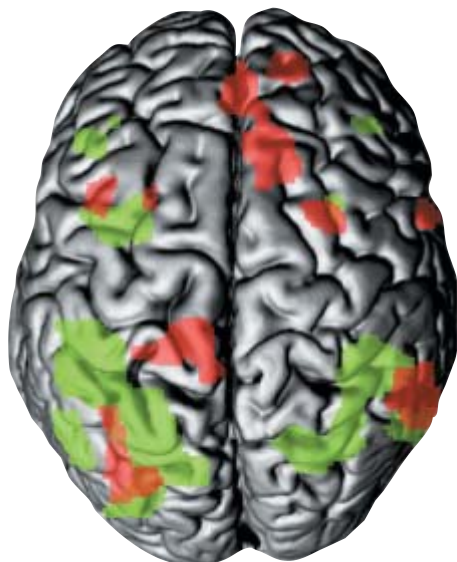
Chez les calculateurs normaux, le calcul complexe s'effectue dans les aires pariétales et frontales de l'hémisphère gauche. Il s'agit d'aires qui traitent les informations visuelles et spatiales et qui sont le siège de la mémoire dite de travail de ces mêmes informations : ces aires stockent des informations relatives à la tâche en cours, par exemple les résultats intermédiaires d'un calcul complexe. Lorsque la tâche est accomplie, ces «souvenirs fugaces» s'effacent, car la quantité d'informations que peut stocker cette mémoire et la durée de stockage sont limitées : une information chasse l'autre.

Lors d'une multiplication de deux nombres à deux chiffres, l'équipe d'imagerie fonctionnelle a montré que R. Gamm utilise en plus de ses aires pariétales et frontales, sa mémoire épisodique, dédiée à la mémorisation des événements vécus ; elle contient les éléments du passé individuel, c'est une sorte de mémoire autobiographique. R. Gamm mémorise les résultats intermédiaires d'un calcul complexe dans cette mémoire épisodique, et non dans sa mémoire de travail, comme le font les calculateurs normaux. Il a attribué à la zone cérébrale de la mémoire épisodique de nouvelles fonctions.

Cette mémoire épisodique, localisée dans des aires temporales et préfrontales de l'hémisphère droit, à des capacités illimitées. Par des séances d'entraînement intensives, dignes d'un violoniste virtuose (il s'entraîne plus de six heures par jour), il y a «emmagasiné» les tables de multiplication, mais aussi des tables de racines carrées, de carrés et de cubes, où il puise à volonté : pour R. Gamm, le calcul du carré d'un nombre à deux chiffres équivaut au rappel d'un résultat des tables de multiplication simples pour tout un chacun ; il lui faut environ une seconde.

Ainsi, de telles capacités de calcul ne résultent pas d'une augmentation de l'activité des régions activées par les calculateurs normaux, mais bien d'une stratégie différente à laquelle participent d'autres aires cérébrales.

Si vous n'avez pas encore trouvé, sachez que 62 à la puissance 6 font $56\,800\,235\,584$.



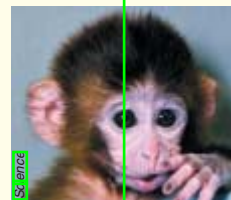
Les aires du cerveau (ici, vu du dessus) activées lors d'un calcul complexe sont différentes selon que vous êtes un calculateur normal ou un prodige du calcul mental comme R. Gamm. Dans le premier cas, ce sont les aires en vert qui sont activées ; elles correspondent aux aires de la mémoire de travail des informations visuelles et spatiales. Dans le second cas, vous utilisez aussi votre mémoire épisodique (à long terme) localisée dans les aires rouges.

Nathalie Tzourio-Mazoyer, Neurologie, CNRS

BRÈVES

Carnet rose

L'équipe de Gerald Schatten, de l'Université de Portland, est heureuse de vous annoncer la naissance, le 2 octobre 2000, d'Andi (pour ADNi, abréviation d'ADN inséré), le premier singe génétiquement modifié. Grâce à un virus non infectieux, le gène d'une protéine fluorescente a été inséré dans l'ovule d'un macaque Rhésus : grâce à cette propriété, on a vérifié que le gène inséré est bien présent dans tous les tissus d'Andi. Il est peut-être le précurseur de nouveaux modèles animaux des maladies humaines. Andi est très alerte et joue déjà avec les compagnons de son âge.



G. Schatten

Les multiples évolutions de la vie

Un grain de zircon vieux de 4,4 milliards d'années vient d'être découvert en Australie. Il aurait 130 millions d'années de plus que n'importe quel autre minéral et 100 millions d'années de moins que la Terre. On estimait que la vie était apparue 700 millions d'années après la formation de notre planète. Or, la roche où le cristal de zircon s'est développé s'est formée à basse température, au contact de l'eau, près de la surface de la Terre : notre planète était assez froide pour porter déjà de l'eau, des continents et... des conditions favorables à la vie. La plus ancienne preuve de vie sur Terre remonte à 3,85 milliards d'années, mais la découverte du grain de zircon montre qu'elle aurait pu évoluer et s'éteindre plusieurs fois dans l'histoire de la Terre.

Empêcher les thromboses

Chez certains malades, les plaquettes (des cellules sanguines qui participent à la coagulation) s'agglutinent inopinément et entraînent des accidents cardiovasculaires, nommés thromboses. Les plaquettes s'agglutinent sous l'influence de différents facteurs sanguins, notamment de l'adénosine diphosphate, qui se lie à des récepteurs spécifiques de la membrane de ces cellules. L'équipe d'Alan Nurden, de l'Université de Bordeaux, a déterminé la structure du récepteur plaquettaire à l'adénosine diphosphate. Connaissant ce récepteur, on pourra mettre au point des molécules qui empêcheront la fixation de l'adénosine et, par conséquent, l'agglutination des plaquettes ; ils remplaceront l'aspirine, utilisée, notamment, à cette fin.

Un nanohélicoptère

Le premier nanomoteur hybride vient d'être mis au point par l'équipe de Carlo Montemagno de l'Université de Cornell. Le moteur est constitué d'une molécule bioorganique, une enzyme ATPase, et alimenté par de l'ATP (adénosine triphosphate) qui apporte de l'énergie aux cellules vivantes. Ce moteur nanoscopique (80 nanomètres de largeur et 200 nanomètres de hauteur) fait tourner de minuscules pales métalliques en nickel : elles mesurent 750 nanomètres de longueur et 150 nanomètres de diamètre, soit la taille d'un gros virus. Les pales tournent pendant plus de deux heures et leur vitesse atteint huit tours par seconde... vitesse record, mais insuffisante pour faire décoller l'engin.

Les gènes du chêne

Des chercheurs de huit pays européens dont ceux de l'INRA, en France, viennent de réaliser une carte de la diversité génétique des chênes. L'étude est fondée sur l'ADN des chloroplastes du chêne, les cellules où s'effectue la photosynthèse. Dans quelque 2 600 forêts, des échantillons ont été prélevés tous les 40 à 50 kilomètres. C'est le premier inventaire génétique aussi poussé. Les agronomes ont comparé la nouvelle carte génétique des chênes à celle qui a été dressée à partir des restes fossiles. Il en ressort que depuis le réchauffement consécutif aux dernières glaciations, la chênaie européenne s'est reconstituée à partir de trois sites où ils avaient été épargnés : en Espagne, en Italie et dans les Balkans.



L'épaisseur des Andes

La plaque qui porte les Andes est bien plus épaisse que la plaque européenne et son épaisseur varie : de 70 kilomètres sous l'Altiplano, elle n'est plus que de 50 kilomètres sous le plateau de Puna, plus au Sud. Grâce à une nouvelle méthode de mesure, des sismologues de l'Université de Postdam ont suivi la plaque océanique du Pacifique qui s'enfonce sous le continent Sud-américain avant de se fondre dans les roches du manteau. Ils sont ainsi montrés que cette épaisseur variable résulte de la compression de la plaque brésilienne à laquelle s'ajoute une remontée de matériau profond.

La communication des muqueuses

Les allergies alimentaires favorisent les troubles de la respiration.

Vous éternuez ? Les cacahuètes ! Votre nez est bouché ? Les kiwis ! Si de tels diagnostics évoquent ceux que posaient les médecins de Molière, on vient pourtant de montrer que les aliments qui déclenchent des allergies chez certaines personnes favorisent les troubles respiratoires, c'est-à-dire qu'ils sensibilisent non seulement la muqueuse digestive, mais également la muqueuse respiratoire, comme l'ont montré Benoît Wallaert et ses collègues de l'Hôpital Calmette de Lille.

On estime que deux pour cent environ de la population présente des allergies alimentaires. Les allergènes alimentaires déclenchent de l'urticaire, des maux d'estomac ou des diarrhées. Les allergènes aériens, tels les acariens, les moisissures, les pollens, entraînent éternuements, rhinites, larmolements et sifflements dans les bronches. On savait déjà que les personnes asthmatiques ont, plus souvent que la moyenne de la population, des allergies alimentaires. L'inverse est-il vrai également ?

Pour le savoir, B. Wallaert et ses collègues ont sélectionné une quarantaine de personnes qui sont allergiques à certains fruits ou légumes, tels les pêches, les fraises, les kiwis, les bananes, les avocats, les carottes, les céleris ou encore les tomates. La moitié d'entre elles avaient un asthme, mais l'autre moitié n'avait aucun trouble respiratoire connu. Ils leur ont donné à manger de la compote de pommes contenant l'allergène, afin de confirmer que les personnes étudiées présentaient bien une allergie alimentaire. Quelques minutes après l'ingestion de la compote de pommes contenant l'allergène, les signes classiques sont apparus, troubles gastro-intestinaux, urticaire, voire œdème de la bouche et des voies respiratoires.

Puis, lorsque les manifestations de l'allergie avaient disparu, ils ont évalué leur capacité respiratoire à l'aide d'un spiromètre, toutes les 15 minutes durant la première heure, puis toutes les heures. Un test à la méthacholine, une substance qui déclenche la contraction des bronches, a également été réalisé : lorsque les bronches se contractent trop, c'est le signe d'une hyperréactivité bronchique anormale. Cette dernière ne se traduit pas nécessairement par des difficultés respi-

ratoires, mais elle indique que la personne a des risques de devenir asthmatique. L'équipe lilloise a constaté que parmi les personnes allergiques aux aliments et qui n'ont pas d'asthme, la moitié présente une hyperréactivité bronchique au test à la méthacholine, sans autres troubles respiratoires apparents. Chez les personnes ne présentant aucune allergie, la méthacholine ne perturbe pas la capacité respiratoire.

Ces résultats confirment que les muqueuses « communiquent ». En effet, le système immunitaire a deux principales composantes : le système sanguin et le système des muqueuses, lesquelles tapissent notamment les poumons et les intestins, formant une barrière entre l'intérieur et l'extérieur de l'organisme. On estime que 80 pour cent de toutes les cellules immunitaires appartiennent au système des muqueuses. Par ailleurs, on sait que des lymphocytes T spécifiques d'un antigène peuvent être transportés par le système lymphatique ou par le système sanguin et agir sur un site éloigné du ganglion lymphatique où ils ont subi leur maturation. Cette communication des muqueuses explique qu'un vaccin nasal puisse déclencher des réactions immunitaires dans les muqueuses uro-génitales, par exemple. Toutefois, l'intensité des réactions est généralement maximale à proximité du site où les lymphocytes T spécifiques d'un antigène ont été produits.

Les réactions d'hyperactivité bronchique déclenchées par un allergène alimentaire durent longtemps : un an après l'arrêt de l'ingestion de l'allergène, l'anomalie respiratoire persiste. Les réactions inflammatoires de la muqueuse intestinale continuent plusieurs mois après l'allergie elle-même, et il semble qu'il en soit de même pour l'inflammation des muqueuses respiratoires qui suivent cette allergie alimentaire. Les personnes ayant une allergie alimentaire doivent éviter toute prise de l'aliment incriminé non seulement pour ne pas avoir les troubles digestifs associés, mais aussi pour éviter les risques potentiels de maladie asthmatique.



La prothèse de la momie

On a retrouvé un orteil de bois sur une momie de 3 000 ans.

A quand remonte la première intervention chirurgicale ? La première prothèse ? On l'ignore, mais la découverte d'une momie égyptienne datant de plus de 1 000 ans avant notre ère et pourvue d'un gros orteil de bois montre qu'à cette époque, on pratiquait déjà l'art de la prothèse.

Dans divers papyrus figurent des descriptions d'interventions chirurgicales, mais aucune mention de prothèses. Au cours d'une campagne de fouilles dans la nécropole de Thèbes, Andreas Nerlich et ses collègues de l'Université de Munich ont découvert dans une chambre funéraire datant de quelque 3 500 ans, mais utili-

sée longtemps, divers vestiges et, notamment la momie bien conservée d'une femme d'une cinquantaine d'années. Un examen minutieux de la momie a révélé que le gros orteil du pied droit avait été amputé (peut-être en raison d'une gangrène) et remplacé par une prothèse de bois, peinte en marron. Elle est constituée d'un morceau de bois de 12 centimètres de longueur et de trois centimètres de largeur et d'épaisseur. Cet élément était attaché à deux plaquettes de bois latérales, elles-mêmes reliées par des cordelettes de cuir. Le prothésiste avait même poussé l'art du détail jusqu'à sculpter l'ongle. Un morceau de tissu fixé aux plaquettes latérales était enroulé autour du pied assurant une bonne cohésion de l'ensemble. Le gros orteil porte environ 40 pour cent du poids d'une personne au cours de la marche, et quand il est amputé, la marche devient périlleuse. Le doigt de pied



Prothèse de bois d'une momie égyptienne de quelque 3 000 ans.

amputé, a été remplacé par une prothèse fonctionnelle et qui semble avoir été utilisée, étant donné les traces d'usure que les archéologues ont retrouvées sur sa face inférieure.

En effet, nombre de prothèses que l'on retrouve sur des momies semblent avoir été placées après la mort, pour préparer la momie à sa vie posthume. C'est le cas de diverses prothèses de membres, de nez ou même de dents, ajoutées par les embaumeurs pour restituer leur intégrité physique aux momies : leur mode de fixation ou leur absence d'usure plaident en faveur d'une pose postérieure à la mort.

La coloration des vitraux

Avec des faisceaux d'ions, les chimistes choisissent l'intensité et la nuance d'un verre coloré.

D'où viennent les couleurs profondes des verres et des vitraux des cathédrales ? Pendant longtemps, cette question est restée sans réponse. Au XIX^e siècle, Michael Faraday a montré que les métaux ou les oxydes métalliques dissous dans le bain fondu du verre ne participent pas au squelette atomique du verre, mais forment des agrégats minuscules. Ces agrégats constituent moins de un pour cent de la matière, mais suffisent à colorer le verre. La couleur des vitraux fut longtemps le fruit, parfois aléatoire, du savoir-faire des alchimistes du verre. Grâce à une méthode mise au point par les équipes du Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse d'Orsay et du Laboratoire de minéralogie et de cristallographie de Paris, les chimistes maîtriseront mieux la couleur du verre.

Au début du XX^e siècle, le physicien allemand Gustav Mie a expliqué comment ces agrégats absorbent la lumière et donnent aux verres de belles couleurs. Les électrons de l'agrégat vibrent ensemble à une fréquence caractéristique. Quand la fréquence est située dans la gamme des longueurs d'onde visibles, l'agrégat absorbe une partie de ces rayon-

nements, et le verre apparaît de la couleur complémentaire à la fraction absorbée. Ainsi, la couleur du verre dépend de la nature des agrégats, de leur taille, tandis que leur densité détermine l'intensité de la couleur. Pour choisir les couleurs à leur guise, les verriers – artisans, artistes ou industriels – aimeraient, bien sûr, pouvoir contrôler parfaitement ces agrégats pour prévoir la couleur du verre quand il sortira du four.

La méthode des équipes d'Orsay et de Paris consiste à irradier un verre, où est dissous un oxyde de cuivre, avec des ions lourds – oxygène ou silicium, par exemple – de haute énergie (plusieurs millions d'électronvolt). Quand ils pénètrent dans le verre, les ions sont freinés et arrachent sur leur passage des électrons au réseau vitreux. Ces électrons rompent des liaisons entre atomes d'oxygène et de cuivre dans l'oxyde de cuivre. Quelques uns des atomes de cuivre métalliques libérés se regroupent pour former des agrégats de cuivre métallique. Le verre est ensuite recuit à basse température (environ 400 °C). Sous l'effet de la chaleur, les atomes de cuivre diffusent, les agrégats grossissent et le verre rougit. Comme la densité et la répartition des agrégats dépend de l'énergie du faisceau d'ions, et que leur diamètre varie en fonction de la température et de la durée du recuit, on maîtrise tous ces paramètres.

En fait, les chimistes se sont inspirés de la technique photographique, où les photons frappent le film photographique (une émulsion riche en sels métalliques d'argent) et y provoquent de

minuscules précipités métalliques, lesquels grossissent dans le révélateur, laissant l'image se dessiner point à point. Ici, les ions remplacent les photons et le «développement» s'effectue lors du recuit.

Cette nouvelle technique par faisceaux d'ions pourrait rencontrer des succès dans l'industrie optronique. Couplée à la lithographie couramment utilisée dans l'industrie de la microélectronique, elle faciliterait la fabrication de commutateurs optiques par exemple : on fabriquerait des fibres de silice contenant des oxydes métalliques et on activerait à l'aide d'un faisceau d'ions les agrégats métalliques dans une zone très précise en masquant le reste de la fibre. On pourrait ainsi obtenir des zones de motifs et de couleurs spécifiques qui laisseraient passer des longueurs d'ondes et en absorberaient d'autres. En quelque sorte des interrupteurs optiques sélectifs.



Un manuscrit mystérieux

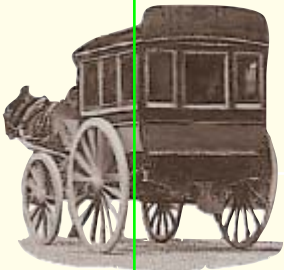
Probablement rédigé au XVI^e siècle, le manuscrit Voynich (du nom de l'Américain qui l'a découvert en 1912, en Italie, dans un collège de jésuites) est écrit dans un alphabet et en une langue inconnus. Le texte présente pourtant des particularités de répétition et de structures à différentes échelles, mais, comme la langue de l'île de Pâques, aucun cryptanalyste n'a pu en venir à bout. Les illustrations sont également mystérieuses. Le manuscrit est-il un canular génial, rédigé pour être vendu à prix d'or? L'empereur germanique Rodolphe II de Hasbourg (1552-1612) l'avait acheté pour 600 ducats d'or, une fortune à l'époque.

L'origine de l'homme moderne

Les récentes analyses d'ADN de l'homme de Mungo, découvert en 1974 dans l'Est de l'Australie, ont révélé qu'il a vécu il y a environ 60 000 ans et qu'il descendait d'un *Homo sapiens* chinois, baptisé *Gracile*, lequel venait lui-même d'un *Homo erectus* issu d'Afrique. Or des crânes de ces précurseurs d'*Homo sapiens* vieux de 250 000 à 100 000 ans ont été découverts dans diverses régions de Chine, ce qui relance le débat sur l'origine de l'homme moderne : selon Wu Xinzhi, de l'Institut de paléontologie des vertébrés de Beijing, l'évolution de l'*Homo erectus* vers l'*Homo sapiens* aurait eu lieu simultanément en Afrique, et dans le Sud-Ouest de la Chine, selon deux modes d'évolutions convergentes.

L'omnibus de Coutances

L'anecdote selon laquelle Poincaré a pensé, en mettant le pied sur l'omnibus de Coutances, à une éclairante analogie entre les nouvelles géométries hyperboliques et les fonctions thêtafuchsiennes (utilisées pour la résolution d'équations différentielles) est, pour les mathématiciens, l'image d'Épinal de la fulgurance de l'intuition. Restait à déterminer ce qu'était cet omnibus : un train ou une voiture à chevaux? Des recherches auprès des mathématiciens n'ayant donné aucun résultat, la mairie de Coutances, contactée, a livré la solution du problème : il s'agissait bien d'un omnibus à chevaux du plus pur style de la Belle Époque.

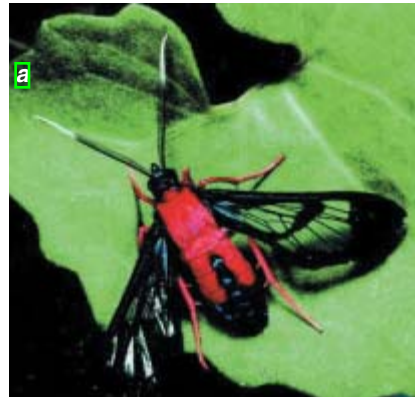


Dans les filets de Scarlet

Des papillons de nuit protègent des prédateurs les femelles et les œufs.

La galanterie et la prévenance envers les dames ne sont pas l'apanage des êtres humains. Dans le monde animal, d'autres mâles entourent leurs femelles de délicates attentions. C'est le cas des Scarlets, une sorte de papillon de nuit rouge, de deux centimètres de longueur, qui vit dans les prairies de Floride. Pendant l'accouplement, les mâles recouvrent les femelles d'un filet empoisonné qui les protégera des prédateurs, telles les araignées ou les chauves-souris.

L'équipe de William Conner, de l'Université de Caroline du Nord, a étudié le comportement de ce papillon. La nuit, les mâles adultes se nourrissent des sécrétions de certaines plantes : parmi elles, une plante de la même famille que les chrysanthèmes, les asteracées, sécrète deux alcaloïdes puissants, l'intermédine et la lycopsamine. Plutôt que de les éli-

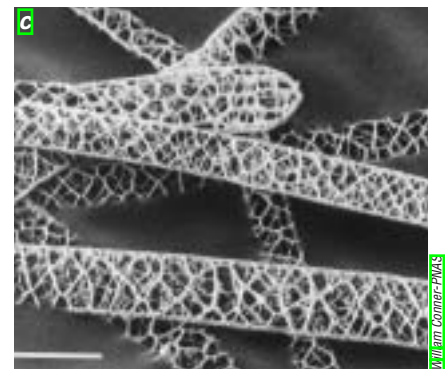


miner, le mâle assimile ces alcaloïdes, puis il les oxyde : insensible à ces substances toxiques (la morphine ou la strychnine sont des alcaloïdes), il est protégé de son plus redoutable prédateur, l'araignée *Nephila clavipes*, qui, elle, ne supporte pas ces alcaloïdes.

Quand vient la saison des amours, la femelle émet des phéromones qui attirent un mâle. Ce dernier ne se pose pas immédiatement, mais reste quelques instants en vol stationnaire au-dessus de la femelle, puis libère un nuage floconneux qui entoure peu à peu la femelle comme un banc de brouillard. Ce nuage est constitué de filaments légers, souples et résistants, que le mâle libère de son abdomen par une pression musculaire. Ils sont composés d'acides gras et... des deux toxines. La structure des filaments confère au nuage une surface maximale pour une quantité minimale de matière. Les deux insectes ne s'accouplent que lorsque la femelle est «enveloppée».

Pour tester le rôle protecteur de ces alcaloïdes, les entomologistes ont offert en pâture à des araignées différents types d'insectes : des femelles fécondées ou enveloppées par des mâles, dont certains n'avaient pas été en contact avec les alcaloïdes. La conclusion est sans équivoque : les insectes protégés par les alcaloïdes sont dédaignés ; les autres sont impitoyablement dévorés.

Outre la protection physique du nuage de filaments, qui résiste mal au vent, la femelle reçoit des alcaloïdes par le liquide séminal du mâle lors de l'accouplement. De cette façon, elle n'est plus la seule à être protégée : ses œufs fraîchement fécondés le sont aussi. La quantité d'alcaloïdes qu'ils contiennent suffira, quand ils seront pondus, à écarter leurs prédatrices : les fourmis et les coccinelles. La protection nuptiale telle que la pratiquent les Scarlets est un cas unique de galanterie.



Les mâles Scarlets (a), des papillons de nuit, protègent leurs femelles avant de s'accoupler en les enveloppant dans un nuage (b) de filaments fins, résistants (c) et riches en alcaloïdes toxiques, issus des plantes dont les mâles se nourrissent. Les alcaloïdes sont également présents dans le liquide séminal : ils protégeront aussi les œufs.



Le froid qui accélère

Des réactions chimiques en phase gazeuse s'accroissent quand la température baisse!

Les marmottes hibernent lorsqu'il fait froid. Les espèces chimiques aussi. C'est du moins ce que laisse penser la loi d'Arrhénius, selon laquelle la vitesse des réactions chimiques décroît avec la température. Cette loi, vérifiée pour la majorité des réactions, est mise en défaut pour certaines réactions en phase gazeuse entre des espèces neutres à très basses températures, comme viennent de le montrer expérimentalement Bertrand Rowe, André Canosa et leurs collègues du Laboratoire d'astrochimie expérimentale de l'Université de Rennes, en collaboration avec le groupe dirigé par Ian Smith, de l'Université de Birmingham. Cette découverte bouleverse la chimie des milieux interstellaires, car les températures qui règnent dans certaines régions de l'espace sont très basses. Elle a aussi valu à ses inventeurs le Prix Descartes, qui récompense chaque année des découvertes issues d'une collaboration européenne.

Avec le froid, les molécules ralentissent et les vitesses des réactions chimiques diminuent. Pourtant, paradoxalement, au-dessous de 20 kelvins, certaines réactions s'accroissent. Ce résultat était prédit par la théorie, mais la démonstration expérimentale tardait. En effet, dans une enceinte d'expérimentation refroidie à dix kelvins, les gaz se condensent sur les parois refroidies, à l'exception d'un très petit nombre d'espèces, notamment l'hydrogène et l'hélium. Collées contre les parois, les espèces ne peuvent plus réagir. Une autre technique permet de refroidir le gaz : il suffit de le détendre à très grande vitesse. On le comprime d'abord dans un réservoir, puis on le laisse s'échapper par un minuscule orifice vers une chambre maintenue sous vide. Le gaz s'écoule à une vitesse supérieure à la vitesse du son et se refroidit à moins de 20 kelvins par une brusque détente. Les

espèces gazeuses sont libres de réagir. Toutefois, cet écoulement gazeux présente des gradients thermiques trop élevés pour que l'on puisse y mesurer des vitesses de réaction.

B. Rowe a créé des écoulements supersoniques uniformes en température, grâce à une technique inspirée des essais de maquettes aéronautiques en soufflerie. Il a placé sur l'orifice un embout, qui fait converger, puis diverger le gaz. En adaptant la forme de la tuyère à chaque gaz, il obtient des écoulements supersoniques uniformes en température sur une longueur de dix centimètres à un mètre. Pour créer les radicaux que l'on souhaite étudier, un laser à impulsions, dirigé sur l'axe de l'écoulement du gaz, casse les molécules précurseurs de ces espèces. Un second laser les excite à intervalles de temps réguliers et des photomètres mesurent la fluorescence, c'est-à-dire l'émission de photons quand le radical se désexcite. Le nombre de photons renseigne directement sur le nombre de radicaux présents. S'ils se réagissent pas, alors le nombre de photons ne varie pas. Sinon, le nombre de photons diminue. Il est proportionnel au nombre de radicaux qui n'ont pas réagi et sert d'indicateur de la cinétique de réaction.

D'après des dizaines d'expériences menées avec différents radicaux, la vitesse de réaction augmente souvent quand la température décroît! Comment l'expliquer? Les vitesses étant plus lentes, les espèces restent plus longtemps à proximité l'une de l'autre, ce qui favoriserait la formation de complexes intermédiaires et des molécules finales.

Ce résultat bouleverse l'astrochimie des milieux interstellaires. Ces milieux sont hétérogènes. Les régions les plus chaudes atteignent une température de près d'un million de degrés Celsius. Elles sont presque désertes. En revanche, dans les régions froides, la température ne dépasse pas 10 kelvins. Ces régions contiennent des nuages denses, qui sont les lieux de naissance des étoiles. Les astronomes y ont répertorié plus de 100 types de molécules. L'hydrogène et l'hélium constituent 99,9 pour cent de la composition, mais des molécules plus complexes, combinant 13 atomes, ont aussi été détectées. Jusqu'à présent, les astronomes pensaient que la chimie interstellaire reposait surtout sur des réactions entre des molécules et des ions provenant de l'ionisation des molécules par les rayons cosmiques. Les expériences menées par les équipes de Rennes et de Birmingham, montrent que de nombreuses réactions entre molécules neutres se produisent. Les expériences se poursuivent, l'enjeu restant de comprendre la formation des molécules de plus en plus complexes.

L'ADN en direct

Première observation du repliement d'une molécule d'ADN en temps réel.

Chez tous les organismes vivants, à l'exception des virus et des bactéries, le matériel génétique est localisé dans le noyau des cellules sous forme de chromatine, une structure complexe qui ressemble à un collier de perles. L'organisation de la chromatine change selon les besoins des cellules : au moment de la division cellulaire, elle se condense sous la forme de chromosomes. À l'inverse, lorsqu'un gène doit être exprimé ou réparé, la chromatine se déplie localement pour faciliter l'accès des protéines chargées d'effectuer ces opérations. Afin de percer les secrets de l'organisation de la chromatine, l'équipe de Jean-Louis Viovy, en collaboration avec celle de Geneviève Almouzni, toutes deux à l'Institut Curie, ont élaboré un dispositif expérimental qui permet de visualiser en temps réel le repliement d'une molécule d'ADN sous forme de chromatine.

Déployée, la molécule d'ADN contenue dans chaque chromosome humain serait capable d'encercler plusieurs milliers de fois le noyau d'une cellule (l'ADN d'un chromosome humain mesure un mètre de longueur). Chaque perle de la structure en collier de la chromatine est nommée nucléosome. Elle est constituée d'une région de l'ADN génomique, enroulée autour d'un cœur formé de huit protéines, les histones. Dans notre système, nous greffons de courts fragments d'ADN (16 micromètres de longueur) par une de leurs extrémités sur une lamelle de microscope. La lamelle sert de base à une petite cuve transparente où l'on



La molécule d'ADN, attachée ici par son extrémité droite, est entraînée par le flux de liquide qui s'écoule de droite à gauche (1). On ajoute alors au liquide des protéines concentrées. L'extrémité libre de la molécule commence à se replier (2) et, au bout de 60 secondes, l'ADN est complètement replié en une pelote compacte de chromatine (3).

peut observer les fragments d'ADN au microscope.

Ces fragments sont préalablement marqués par une molécule fluorescente, qui se fixe sur toute leur longueur. Lorsque les molécules d'ADN évoluent librement, elles sont brassées par un mouvement d'agitation aléatoire (le mouvement brownien) et se replient en une pelote lâche autour de leur point d'ancrage. Lorsqu'on crée un flux de liquide dans la cuve, les molécules d'ADN se déplient et sont étirées dans le sens de l'écoulement. Pour étudier le mécanisme d'assemblage de l'ADN en chromatine, nous avons ajouté dans la cuve des extraits riches en protéines, qui contiennent notamment les histones et les facteurs d'assemblage nécessaires à l'organisation de l'ADN en chromatine.

En présence de ces extraits protéiques, et malgré la force de cisaillement, les molécules d'ADN commencent rapidement à s'enrouler, par leur bout libre, jusqu'à l'extrémité liée à la lamelle. À l'aide d'un microscope à force atomique, qui permet d'explorer des surfaces à l'échelle de l'atome, nous avons étudié la structure de l'ADN en fin de condensation : elle ressemble beaucoup à la structure de la chromatine que l'on extrait directement des cellules. Nous avons ainsi modélisé la formation des nucléosomes et mesuré les constantes cinétiques des réactions chimiques associées : d'après notre modèle, l'ADN ne s'enroule autour des histones, qui constitueront le cœur du nucléosome, que lorsque ces histones sont déjà parfaitement assemblés.

L'organisation de l'ADN en chromatine joue un rôle important dans la régulation de l'expression des gènes. Il est donc primordial pour les cellules que cette structure soit conservée au cours des différents événements où l'ADN est concerné : la division cellulaire, la synthèse des protéines, ou la réparation de l'ADN. Ainsi, la dynamique d'assemblage et de désassemblage de la chromatine est la clé du maintien de l'intégrité fonctionnelle du génome. Notre méthode permettra d'étudier les différentes molécules qui participent à ces mécanismes. On espère établir un catalogue des agents nécessaires au maintien de l'intégrité du génome ; étudier l'organisation de l'ADN lorsque celui-ci subit des lésions, par exemple celles que l'on observe dans les maladies génétiques ou dans les cancers ; enfin, préciser les mécanismes de diverses maladies liées à l'instabilité chromosomique, telle la maladie de Fanconi, rare, mais responsable de malformations multiples.

Benoît LADOUX, Physico-chimie et séparation de l'ADN, Institut Curie-CNRS

L'intérieur de la neige

La microstructure de la neige a été photographiée aux rayons X.

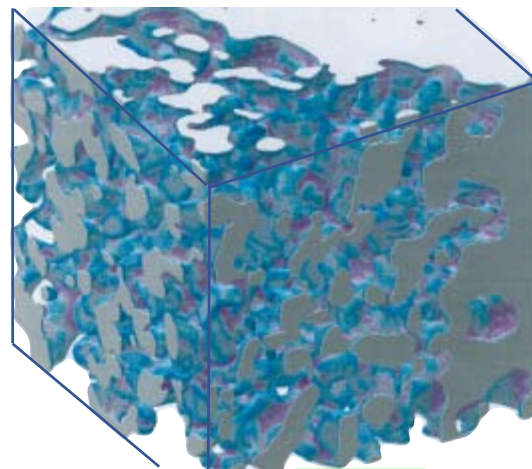
La neige ressemble-t-elle plus à un tas de billes ou à une éponge ? À l'un et à l'autre, répondent les physiciens du Centre d'études de la neige de Météo-France, à Grenoble, d'après des images de la microstructure de la neige obtenues au synchrotron de Grenoble. La neige fraîche est un enchevêtrement des cristaux de glace. Sa structure évolue en fonction de la température et de l'humidité. Les particules de glace grossissent, soit par diffusion de la vapeur d'eau dans la neige sèche (quand la température est négative), soit par échange de molécules d'eau à l'état liquide ou à l'état de glace dans la neige humide (quand la température est proche de 0 °C). La forme, l'arrangement des grains et leurs liaisons déterminent les propriétés mécaniques des couches de neige. Or une couche fragile, ou mal ancrée aux couches déjà déposées, constitue un maillon faible dans le manteau neigeux. Elle risque de se détacher et de déclencher une avalanche. L'étude de la microstructure de la neige est déterminante pour que l'on puisse expliquer les avalanches et, peut-être, les prévoir.

Pourquoi utilise-t-on un rayonnement synchrotron pour étudier quelques centimètres cube de neige ? Jusqu'à présent, les techniques utilisées ne fournissaient, sur la structure de la neige, que des valeurs moyennes sur des volumes importants : on perdait toute information sur la structure fine. Au contraire, le synchrotron fournit des images très précises de la structure des différents grains qui constituent une couche neigeuse. Dans un synchrotron, des électrons sont accélérés et déviés, et cette déviation s'accompagne de l'émission d'un rayonnement X qui sert à l'observation des échantillons. Ce rayonnement chauffe les échantillons, mais la taille de la zone chauffée ne dépasse pas un micromètre. Pour éviter la fusion des zones proches de la zone chaude, on maintient la neige à -50 °C pendant l'expérience.

Les rayons qui traversent la neige sans être absorbés sont détectés et à partir des images du cœur de l'échantillon enregistrées sous différentes incidences, un logiciel reconstruit l'objet en relief et fournit des images dont la résolution est proche de dix micromètres. Pour la première fois, on a observé la microstructure de différentes neiges (plus ou moins sèches ou humides) : on a cartographié le « relief » interne d'un échantillon de glace. On a constaté que le rayon

de courbure local de la structure interne de la neige change (la courbure est positive pour une surface arrondie, comme une bille, et négative pour une surface en creux, tels les pores d'une éponge). Plus la courbure est élevée, plus l'eau s'évapore : les métamorphoses de la neige dépendent de cette courbure locale. Par exemple, dans le cas d'une couche de neige sèche, à faible gradient thermique (la température est homogène dans la couche), la neige s'organise en un enchevêtrement de grains et de pores, une configuration intermédiaire entre une éponge (courbures négatives presque partout) et un tas de billes (courbures positives presque partout).

Les physiciens ont évalué la courbure de la glace en tout point de l'échantillon analysé, à partir des images obtenues avec le synchrotron. Les valeurs des courbures calculées varient d'un point à l'autre, ce qui montre bien que les aspérités (billes) jouxtent les creux (éponge) dans la neige. L'analyse a été réalisée sur un échantillon à un moment précis. L'enjeu est de prévoir l'évolution d'une telle couche dans le temps. Maintenant qu'ils ont découvert la structure intime de la neige, les physiciens vont établir des modèles d'évolution d'une couche de neige en fonction des paramètres extérieurs (les variations de température et d'humidité) ; ils vont modéliser la diffusion de vapeur au sein de la neige, les transferts thermiques, les métamorphoses des différentes microstructures neigeuses. Ils espèrent en déduire comment une couche de neige se transforme et, par conséquent, comment ses liens avec les couches sous-jacentes changent. Peut-être saura-t-on alors prévoir le moment où une couche superficielle instable se détachera de son support.



Cet échantillon de neige observé aux rayons X révèle des courbures locales positives en forme de billes (en bleu) et des courbures locales négatives (en rose) en creux. La répartition des courbures locales influe sur le comportement global d'une couche de neige.

Centre Météo-France
Grenoble

Les forêts, pièges à dioxyde de carbone ?

Les arbres absorbent du dioxyde de carbone, mais n'empêcheront pas le réchauffement global.

En 1997, à Kyoto, près de 180 pays se sont engagés à réduire leurs émissions de dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre. On a admis qu'ils pourraient retirer le dioxyde de carbone adsorbé par leurs forêts (plantées après 1990) de celui qu'ils émettent en brûlant des combustibles fossiles. Cet arrangement est-il justifié ? C'est la question qu'ont soulevée les négociations sur

la mise en œuvre de l'accord de Kyoto, visant à prévenir un réchauffement climatique global de notre planète.

Les forêts absorberaient 30 pour cent du dioxyde de carbone émis par les activités humaines, ce qui semble justifier qu'elles interviennent dans le calcul des émissions de chaque pays. Cependant, les modalités de ce calcul restent à définir. Dans la plupart des modèles climatiques, on suppose qu'un excès de dioxyde de carbone dans l'atmosphère accélérerait la croissance des arbres : le gaz jouerait le rôle d'engrais. Toutefois, l'effet n'a pas été démontré. Si cette fertilisation n'existe pas, les forêts ne seront des puits de carbone que pendant une durée limitée. D'après la modélisation du climat global de la planète réalisée par Peter Cox et ses collègues, du Centre

Hadley de prédiction du climat, en Grande-Bretagne, dans 50 ans, les continents seront des sources de carbone et non des puits : la hausse de température provoquera la prolifération des micro-organismes du sol. En digérant les feuilles des arbres tombées à terre, ces derniers produiront plus de dioxyde de carbone que les arbres n'en absorberont. Le modèle prévoit qu'en 2100, l'atmosphère se sera enrichie de six millions de tonnes de dioxyde de carbone supplémentaires. Aujourd'hui, l'idée de créditer chaque pays pour ses forêts est remise en cause. Les discussions reprendront au printemps, mais le temps presse si nous voulons atteindre, en 2012, les premiers objectifs fixés par le protocole de Kyoto, c'est-à-dire sept pour cent de réduction des émissions par rapport à celles de 1990.

Tête chercheuse en ADN

Une méthode plus efficace pour modifier le génome

Les maladies génétiques résultent de mutations, héréditaires ou acquises, d'un ou de plusieurs gènes. Pour découvrir les mécanismes d'une maladie ou pour tester des traitements potentiels, on utilise souvent des animaux qui présentent une maladie proche de celle qui atteint l'homme. Pour certaines pathologies, on ne dispose pas de modèle animal et les biologistes doivent en « créer » en modifiant leurs gènes. Grâce à ces animaux génétiquement modifiés, on détermine les fonctions cellulaires perturbées par diverses mutations et l'on met au point des thérapies « géniques » : on remplace le gène muté par sa version normale. Dans ces expériences, les généticiens sont confrontés à une difficulté notable : les modifications génétiques doivent être introduites en des endroits précis du génome. Afin de résoudre cette difficulté, nous proposons d'utiliser une molécule qui devrait augmenter l'efficacité de cette introduction : elle guide une copie modifiée du gène vers le gène qui est naturellement présent dans la cellule.

Les cellules disposent de mécanismes qui garantissent leur intégrité, notamment des mécanismes de contrôle et de réparation des gènes, et de mécanismes qui assurent la diversité par brassage des gènes maternels et paternels au fil des générations. La recombinaison génétique homologue, qui échange des gènes

entre différentes régions d'une même molécule d'ADN, ou entre deux molécules d'ADN, est la base de ces mécanismes. On peut utiliser cette propriété de recombinaison homologue pour modifier le code génétique des cellules : quand on introduit dans une cellule un court fragment d'ADN, la machinerie moléculaire de la recombinaison échange ce fragment avec une région du génome pratiquement identique. Ainsi, le chromosome cible porte, après recombinaison, le fragment d'ADN étranger.

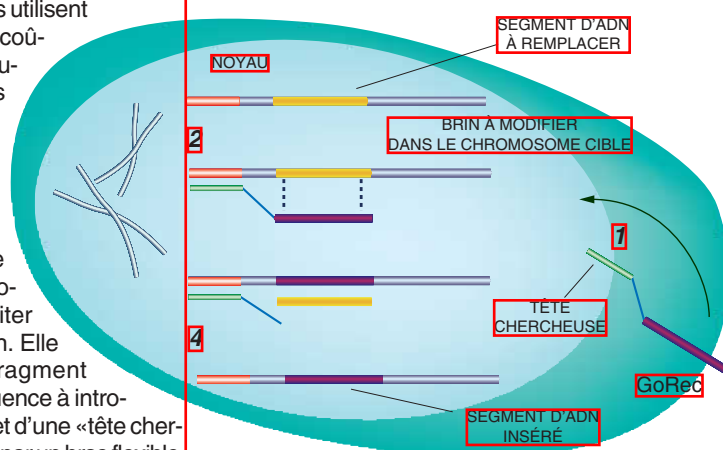
Hélas, la recombinaison homologue est peu efficace dans les cellules de mammifères : seule une cellule sur 100 000 intègre correctement le fragment d'ADN. Pour sélectionner cette cellule parmi ses voisines, les biologistes utilisent des procédés longs et coûteux qui introduisent souvent des modifications supplémentaires dans le génome cible. La molécule, nommée GoRec, dont nous espérons qu'elle augmentera l'efficacité de la recombinaison homologue, permettra d'éviter ces étapes de sélection. Elle est composée d'un fragment d'ADN qui porte la séquence à introduire dans le génome et d'une « tête chercheuse », qui sont reliés par un bras flexible.

Une molécule d'ADN est constituée de deux chaînes qui forment une double hélice. Notre tête chercheuse se fixe à l'ADN avec une très forte affinité, dans une région proche de celle à modifier en formant, localement, une triple hélice.

Lorsque la molécule GoRec est introduite dans une cellule, la tête chercheuse

trouve sa cible ; elle s'accroche au chromosome et stabilise l'interaction entre le fragment d'ADN à introduire et la région avec laquelle il doit s'échanger. Cette stabilisation augmente l'efficacité de la recombinaison. Une fois la réaction terminée, la tête chercheuse se détache du fragment d'ADN et est éliminée de la cellule. Cette méthode ne laisse aucune « trace » dans le génome cible hormis le fragment d'ADN introduit ; elle fonctionne *in vitro*. Nous la testons actuellement *in vivo*, dans des cellules souches d'embryons de souris, afin de déterminer l'efficacité de divers types de têtes chercheuses.

Élodie BIET, Institut Curie/CNRS-UMR 2027



La molécule GoRec portant le fragment à insérer (en violet) est introduite dans une cellule (1). La tête chercheuse (en vert) s'accroche au chromosome cible (2). Cette stabilisation augmente l'efficacité de la réaction de recombinaison (3), c'est-à-dire d'échange du fragment initial et du fragment étranger que l'on introduit. La tête chercheuse est éliminée, et la cellule contient le gène (en violet) introduit (4).

L'extinction des mamouths

Une chasse excessive aurait fait disparaître la faune géante qui peuplait l'Amérique du Nord.

Il y a 11 000 ans, la faune géante qui vivait en Amérique du Nord a disparu. Plus de 70 espèces se sont éteintes, notamment des mamouths, des chameaux, des paresseux géants, des castors aussi gros que des ours... John Alroy, de l'Université de Santa Barbara, a montré que la chasse pratiquée par l'homme aurait été fatale aux mamouths et aux autres grands animaux.

L'époque de leur disparition correspond à une période de refroidissement et à l'arrivée de l'homme sur le continent américain. Trois théories de ces extinctions ont été proposées. Selon la première, le refroidissement climatique aurait provoqué la disparition d'une partie de l'habitat des espèces géantes. À mesure que leur territoire se réduisait, elles auraient eu plus de difficultés à trouver leur nourriture, leur zone de chasse n'ayant plus une surface suffisante. En outre, elles vivaient probablement en communautés qui

auraient été contraintes de se séparer en petits groupes, plus vulnérables. Après avoir survécu pendant tout le Pléistocène, la faune géante aurait fini par disparaître.

Selon une deuxième théorie, les nouveaux immigrants humains auraient introduit des maladies peut-être véhiculées par les animaux domestiques ou par des parasites. Elles se seraient répandues dans les populations animales du continent américain qui, n'ayant jamais été exposées à ces agents pathogènes, n'étaient pas immunisées. Les épidémies répétées auraient rapidement abouti à leur extinction. Ces deux théories pourraient expliquer la disparition des grands mammifères. Toutefois, des épidémies fulgurantes n'ont vraisemblablement pas laissé de traces sur les os, et l'on ne pourra prouver leur rôle potentiel qu'en analysant l'ADN des derniers mamouths : il pourrait révéler la présence de matériel génétique d'origine virale, par exemple.

Dans les années 1960, Paul Martin, de l'Université d'Arizona, formula une troisième hypothèse, celle de la surchasse. Toutefois, les premiers américains chassaient-ils suffisamment pour entraîner l'extinction d'espèces dont le territoire s'étendait du Nord du Canada jusqu'à Mexico ? On ne dispose que d'une dizaine d'ossements de mamouth qui portent des traces de pointes de flèches ou de lances. Or, J. Alroy a simulé l'évolution des populations de mamouths.

Il a choisi une population humaine de 100 personnes, qui augmentait de deux pour cent par an ; il a considéré qu'un groupe de 50 personnes tuait 15 à 20 grands animaux par an. Selon ce modèle, les grands animaux auraient pu disparaître au bout de 1 000 ans de chasse, même peu intensive. Ce résultat n'est guère surprenant, car les grands animaux sont d'autant plus fragiles que leur période de gestation est plus longue et que les jeunes n'acquiescent qu'une autonomie tardive. Ainsi, d'après ce modèle, ce sont bien les activités humaines qui auraient provoqué l'extinction de la faune géante d'Amérique du Nord, il y a 11 000 ans... déjà !



Un paresseux géant des Amériques.

Des bus chaotiques

Les bus d'une ville mexicaine se comportent comme un système chaotique... bien organisé.

Dans le froid et le vent, combien de fois avez-vous maugréé contre ce bus qui tardait tant ? Combien de fois avez-vous critiqué la compagnie de transport quand, après une longue attente, trois bus arrivaient au même moment ? Les habitants de Cuernavaca, à 50 kilomètres au Sud-Ouest de Mexico, ne connaissent pas ces déboires : les bus locaux sont réguliers et arrivent à intervalles de temps réguliers.



Milan Krbalek et Petr Seba, mathématiciens à l'Université de Hradec Králové, en République Tchèque, ont montré qu'un tel service résulte de l'organisation des transports : les bus obéissent aux mêmes lois statistiques que les systèmes chaotiques. On peut décrire leur comportement par des matrices aléatoires, un outil mathématique appliqué à la physique par Eugène Wigner, dans les années 1950, pour décrire les atomes de grande taille, quand on ignore les interactions de leurs composants.

Les matrices aléatoires sont des tableaux carrés à n colonnes et à n lignes dont les termes sont choisis au hasard. Les valeurs propres (des nombres caractéristiques) des matrices aléatoires symétriques par rapport à leur diagonale se répartissent selon une loi de distribution : outre celle des différents états d'énergie des atomes, cette loi est aussi celle de la fréquence des bus de Cuernavaca.

Dans cette ville, aucune compagnie ne chapeaute l'organisation des transports et chaque chauffeur est propriétaire de son bus. Pour rentabiliser son véhicule, il cherche à transporter le maximum de passagers. Il en résulte une compétition entre les chauffeurs. Toutefois, dans

ces conditions, les temps d'attente entre deux bus consécutifs dépendraient de la circulation : ils suivraient alors une loi dite de Poisson. Dans ce modèle, le remplissage des bus ne dépendrait que des arrivées aléatoires des passagers aux arrêts. De plus, la probabilité que deux bus arrivent à un arrêt au même moment serait élevée, ce que les chauffeurs veulent éviter.

Chaque chauffeur emploie donc des indicateurs qui, postés à quelques arrêts, marquent le temps qui les sépare de leur prédécesseur. Ainsi informé, le chauffeur choisit de ralentir pour laisser le temps aux prochains voyageurs d'arriver aux arrêts suivants, ou, à l'inverse, d'accélérer, pour prendre les voyageurs avant qu'un concurrent ne le double. Chaque bus ajuste son parcours à celui des autres.

Pendant 27 jours, les deux mathématiciens ont enregistré 3 500 heures d'arrivée, puis étudié la distribution des différents intervalles de temps entre deux bus consécutifs. Les résultats obtenus sont en accord avec le modèle des matrices aléatoires. La Régie autonome des transports parisiens pourrait peut-être étudier cet outil mathématique... et vendre ses bus à des chauffeurs privés.



Satellites par dizaines

Découverte de 22 satellites autour de Saturne et de Jupiter.

Plusieurs équipes internationales ont découvert 12 nouvelles lunes autour de Saturne, la planète aux anneaux, et 10 nouveaux satellites à Jupiter. Ces deux planètes prennent ainsi la tête du classement des planètes ayant le plus grand nombre de satellites connus : 36 pour Saturne et 30 pour Jupiter, devant Uranus qui en compte 21.

En août 2000, Brett Gladman, de l'Observatoire de la Côte d'Azur, décèle, à l'aide du télescope de 2,2 mètres de diamètre de La Silla, au Chili, deux points de faible luminosité se déplaçant autour de Saturne. Un mois plus tard, avec un collègue, l'astronome confirme la présence de ces deux objets et découvre deux autres candidats satellites grâce au télescope franco-canadien de 3,6 mètres de diamètre d'Hawaï. Huit autres lunes sont observées par la même équipe en novembre et en décembre 2000.

Comment savoir si ce sont bien des satellites ? Il pourrait s'agir d'astéroïdes qui, par coïncidence, se trouvent dans la même direction du ciel que Saturne ; ou encore, de comètes capturées temporairement par l'attraction saturnienne. Les calculs des orbites récuse l'hypothèse des astéroïdes, mais ne permettent pas encore d'infirmer celle des comètes.

Ces dix satellites supposés sont irréguliers : ce sont des petits corps (leur

diamètre, estimé d'après leur luminosité, est compris entre 10 et 50 kilomètres) en orbite à plus de 150 millions de kilomètres de leur planète. On ne connaissait qu'un satellite irrégulier à Saturne, Phoebe, découvert voici un siècle par l'Américain W.H. Pickering. Neptune en compte deux et Uranus cinq. Tous ont des orbites très allongées, souvent très inclinées et rétrogrades (dans le sens inverse de la rotation de la planète sur elle-même), contrairement aux satellites réguliers dont les trajectoires sont quasi circulaires, dans le plan équatorial de la planète et progrades (dans le même sens que la rotation de la planète sur elle-même).

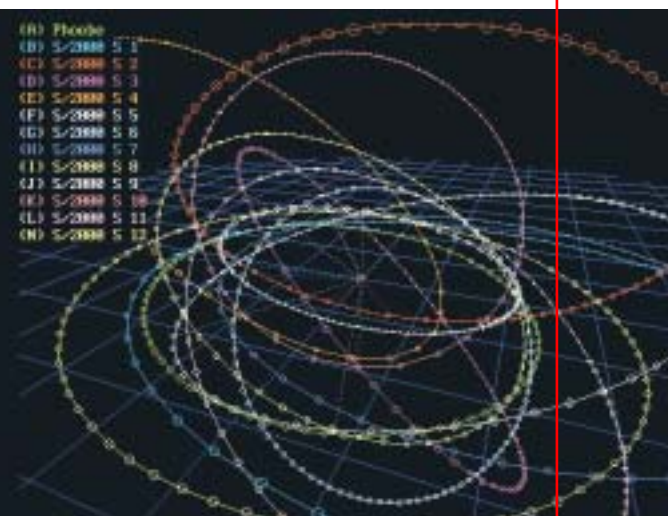
Les dix nouveaux satellites de Jupiter, découverts par Scott Sheppard, à l'Université d'Hawaï, ont une taille de l'ordre de cinq kilomètres. Ils sont tous sur des orbites modérément allongées, inclinées de 15 à 30 degrés par rapport au plan équatorial de la planète. Neuf de ces objets sont sur des orbites rétrogrades, mais le dixième occupe une orbite prograde.

D'où viennent ces satellites ? Lors de la formation d'une planète géante, une enveloppe de gaz et de poussière s'isole de la nébuleuse primitive pour devenir un système presque indépendant. En se condensant, cette « sous-nébuleuse » fournit la quasi totalité de la masse de la planète et des satellites réguliers, formés en même temps.

En revanche, les satellites irréguliers sont des petits corps qui passent au voisinage de la planète, qui les capture. Leur capture suppose que ce corps perde de l'énergie soit par collision avec un satellite régulier de la planète soit par freinage progressif sur le gaz qui environne les planètes en formation, à la fin de la période d'accrétion. Les frottements (dus aux marées) ne semblent pas capables de dissiper suffisamment d'énergie, mais ils modifieraient l'orbite du corps capturé. Selon les modèles, la capture sur une orbite rétrograde est plus aisée que sur une orbite prograde, ce que corroborent les observations du sens de rotation des objets.

D'autres surveillances des environs des planètes géantes à l'aide de grands télescopes et l'analyse des données déjà collectées permettront d'affiner les calculs des orbites de ces astres, informations primordiales pour la compréhension des mécanismes dynamiques mis en œuvre lors de la formation de ces planètes.

David WILGENBUS



Orbite des 12 nouveaux satellites découverts autour de Saturne et du satellite Phoebe. Les orbites sont allongées et inclinées par rapport au plan équatorial de la planète (quadrillage bleu).

Les maîtres des océans jurassiques

RYOSUKE MOTANI

Pendant que les dinosaures étaient les maîtres des continents, les ichthyosaures, des reptiles aux allures de poissons, régnaient sur les océans. Les paléontologues viennent de reconstituer l'histoire de leur évolution et de leur remarquable adaptation.

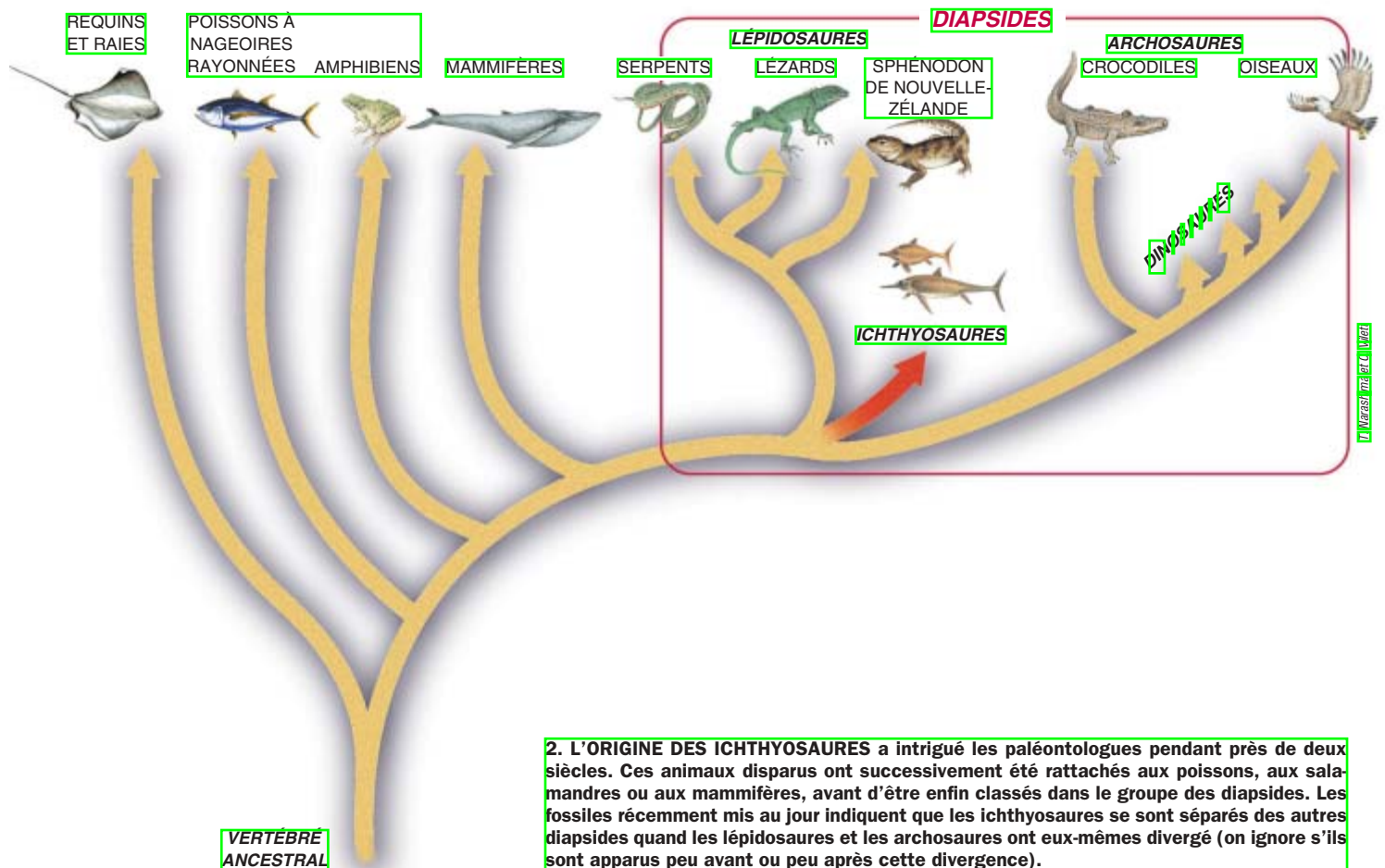




Il y a 160 millions d'années, au Jurassique, les dinosaures régnaient sur le monde. Un soir d'automne, les rayons du soleil couchant traversent à peine la surface miroitante de l'océan, où une ombre furtive apparaît, entre les falaises d'une faille volcanique sous-marine. Un animal remonte à la surface pour reprendre sa respiration. Long de près de quatre mètres, il ressemble à une petite baleine, mais l'apparence est trompeuse, car les baleines n'apparaîtront que 100 millions d'années plus tard. Soudain, avec son long rostre armé de dents, il s'attaque à un banc de calamars.

Cet animal est un *Ophthalmosaurus*, l'une des 80 espèces d'ichthyosaures que nous connaissons, des monstres marins dont le nom signifie «reptiles-poissons». Le plus petit de ces animaux mesurait moins d'un mètre, tandis que le plus grand dépassait les 15 mètres de longueur. De taille moyenne, *Ophthalmosaurus* n'était pas le plus agressif de tous. Sa compagnie devait certainement être moins déplaisante que celle du féroce *Temnodontosaurus*, le «lézard aux dents tranchantes», qui se repaissait de grands vertébrés.

1. LES ICHTHYOSAURES ont été les maîtres des océans pendant 155 millions d'années.



2. L'ORIGINE DES ICHTHYOSAURES a intrigué les paléontologues pendant près de deux siècles. Ces animaux disparus ont successivement été rattachés aux poissons, aux salamandres ou aux mammifères, avant d'être enfin classés dans le groupe des diapsides. Les fossiles récemment mis au jour indiquent que les ichthyosaures se sont séparés des autres diapsides quand les lépidosaures et les archosaures ont eux-mêmes divergé (on ignore s'ils sont apparus peu avant ou peu après cette divergence).

Lorsque les paléontologues ont découvert les premiers fossiles d'ichthyosaures, au début du XIX^e siècle, ils n'en croyaient pas leurs yeux ! Les dinosaures étaient encore inconnus. Aussi, les ichthyosaures semblaient-ils d'autant plus mystérieux et fascinants. L'étude de ces fossiles a révélé que les ichthyosaures ne descendaient pas des poissons, mais d'animaux terrestres (qui descendaient eux-mêmes d'un poisson ancestral). Comment les ichthyosaures s'étaient-ils adaptés à la vie aquatique ? À quels animaux étaient-ils apparentés ? Pourquoi avaient-ils des vertèbres en forme de palets, qui semblaient empilées les unes sur les autres pour former la colonne vertébrale, et des yeux aussi gros que des boules de bowling ?

Aujourd'hui, près de deux siècles plus tard, nous venons seulement de comprendre les transformations qu'ont subies ces reptiles côtiers pour devenir des créatures de haute mer. Dans

les années 1830, la découverte de dinosaures, tel l'*Iguanodon*, fit sensation et accapara toute l'attention des paléontologues. L'intérêt pour les reptiles-poissons s'est estompé jusqu'à ces dernières années, lorsque de nouveaux fossiles ont été mis au jour au Japon et en Chine.

Des origines obscures

Bien que les ichthyosaures soient tombés dans l'oubli peu après 1800, quelques paléontologues ont continué à s'y intéresser. Dès le début, ils avaient remarqué qu'ils s'étaient très bien adaptés à la vie marine. Les ichthyosaures ont commencé à hanter les océans il y a 245 millions d'années et se sont éteints il y a 90 millions d'années environ. Leur règne a duré presque aussi longtemps que celui des dinosaures. Les fossiles d'ichthyosaures proviennent du monde entier, ce qui témoigne de leurs

grandes capacités migratoires, à l'instar des baleines actuelles. Malgré leur aspect de poisson, les ichthyosaures étaient des reptiles à respiration aérienne, dépourvus de branchies : leurs crânes et leurs mâchoires présentent des caractères typiquement reptiliens. En outre, ils avaient quatre membres (les poissons en sont dépourvus), ce qui indique que leurs ancêtres vivaient sur la terre ferme.

Les paléontologues ont tiré ces conclusions de l'étude des squelettes d'ichthyosaures tardifs, aux allures de poisson. Les premiers ossements d'ichthyosaures plus primitifs n'ont été découverts qu'en 1927. Au cours de leur évolution, ces animaux sont devenus pisciformes : les membres trapus se sont transformés en nageoires, un aileron est apparu sur le dos et un autre sur le lobe dorsal de la queue. Ils s'étaient si bien adaptés à la vie en haute mer, qu'ils avaient perdu les caractères, tels l'os du



Le plus petit ichthyosaure était plus court qu'un bras humain,

poignet ou de la cheville, grâce auxquels on aurait pu identifier leurs lointains cousins, restés vivre sur la terre ferme. Tant qu'ils n'avaient pas reconstitué de squelettes complets des premiers ichthyosaures, les paléontologues savaient seulement qu'ils ressemblaient à des lézards dotés de nageoires.

Manquant d'informations sur leurs origines, les paléontologues ont successivement rattaché les ichthyosaures à tous les groupes de vertébrés : les reptiles, les amphibiens et les mammifères. Au XX^e siècle, les relations entre espèces animales se sont éclaircies. Les paléontologues ont alors classé les ichthyosaures dans les reptiles du groupe des diapsides qui comprend les serpents, les lézards, les crocodiles et les dinosaures. La date où ils se sont différenciés des autres membres du groupe est restée un sujet de controverses, jusqu'à ce que l'on découvre les plus anciens ichthyosaures du monde.

La première découverte importante a eu lieu sur la côte Nord-Est de Honshu, la plus grande île du Japon, dans les gisements d'ardoise de la plage.

Dans cette roche noire, les Japonais taillent des encriers dont ils se servent en calligraphie. Ces gisements renfermaient des ossements du plus ancien ichthyosaure, un *Utatsusaurus*. En 1982, un groupe de géologues d'Hokkaido a découvert deux squelettes quasiment complets. Nachio Minoura et ses collègues ont passé près de 15 ans à les extraire de leur gangue d'ardoise : les os étaient si fragiles qu'ils ont dû procéder avec une précaution extrême, à l'aiguille et à la loupe.

En 1995, alors que la mise au jour touchait à sa fin, N. Minoura, qui connaissait mon intérêt pour ces reptiles disparus, m'a invité à rejoindre son équipe. Dès que j'ai vu le squelette d'*Utatsusaurus*, j'ai compris qu'il s'agissait d'un ichthyosaure primitif, car il ressemblait à un lézard pourvu de nageoires. La même année, You Hailu, de l'Institut de paléontologie des vertébrés et de paléoanthropologie de Beijing, m'a montré un second spécimen qu'il venait de découvrir : un *Chaohusaurus*, un autre ichthyosaure primitif dont on avait déjà retrouvé des fragments, mais dont le squelette était cette fois-ci beaucoup

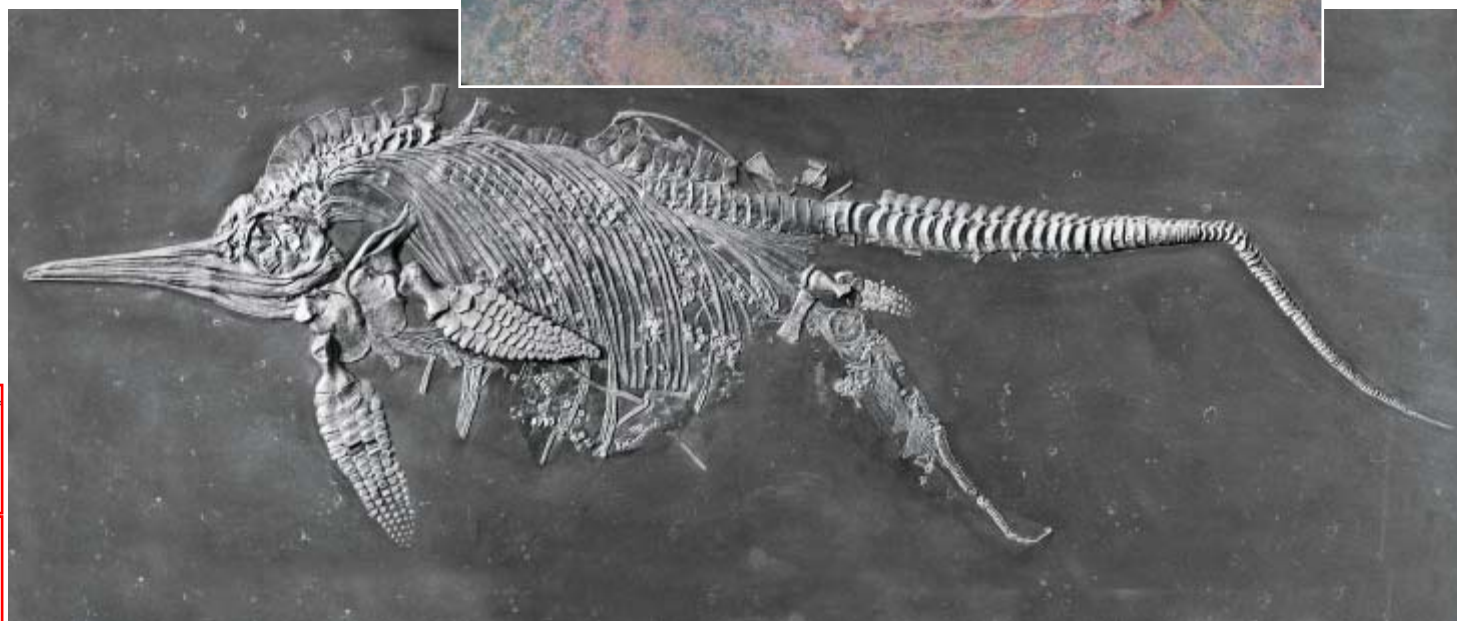
plus complet. Mis au jour dans des sédiments du même âge que ceux qui avaient livré les restes d'*Utatsusaurus*, ce spécimen avait un corps mince, ressemblant à celui d'un lézard.

Grâce à *Utatsusaurus* et *Chaohusaurus*, qui avaient encore quelques caractères de leurs ancêtres terrestres, on a placé les ichthyosaures sur l'arbre phylogénique des vertébrés : d'après la forme du crâne et des membres, les ichthyosaures se seraient séparés des autres diapsides en même temps que divergeaient les deux grands groupes de reptiles actuels, les lépidosaures (les serpents et les lézards) et les archosaures (les crocodiles et les oiseaux). Toutefois, leur évolution demeurait mystérieuse.

Des pattes aux nageoires

En étudiant les deux ichthyosaures découverts en Asie, les paléontologues ont compris comment leurs descendants s'étaient adaptés à la vie en haute mer. La transformation la plus évidente est celle des pattes, qui sont devenues des nageoires. Chez la plupart des animaux à quatre

3. LES FOSSILES d'ichthyosaures primitifs, tel *Chaohusaurus* (à droite) ont révélé comment ces animaux aux allures de lézard ont évolué en créatures marines de haute mer, tel *Stenopterygius* (ci-dessous, en train de donner naissance à un petit).



le plus grand était plus long qu'un bus de ville

CHAOHUSAURUS GEISHANESIS
de 0,5 à 0,7 mètre de longueur ;
vivait il y a 245 millions d'années (au Trias inférieur)

MIXOSAURUS CORNALIANUS
de 0,5 à 1 mètre de longueur ;
vivait il y a 235 millions d'années (au Trias moyen)

OPHTHALMOSAURUS ICENICUS
de 3 à 4 mètres de longueur ;
vivait il y a 165 à 150 millions d'années (au Jurassique moyen et supérieur)

AILERON DORSAL

NAGEOIRE CAUDALE

Une colonne vertébrale bâtie pour la nage

Les nouveaux fossiles aux allures de lézard expliquent la structure vertébrale de leurs descendants pisciformes. Les vertèbres des ichthyosaures évolués sont des sortes de palets. Les paléontologues pensaient que cette forme, rare chez les diapsides, était typique des ichthyosaures. Cependant, les nouveaux spécimens asiatiques ont une colonne vertébrale étroite, constituée de vertèbres cylindriques. Au cours de l'évolution des ichthyosaures, le diamètre des vertèbres semble avoir augmenté notablement, tandis que leur hauteur diminuait.

Avec mes collègues, nous nous sommes demandé pourquoi et nous avons trouvé la réponse en observant la nage des requins d'aujourd'hui. À l'instar des ichthyosaures, les requins ont des tailles et des formes variées. Semblable aux ichthyosaures primitifs, la roussette est mince et sa nageoire caudale n'est pas bilobée. En revanche, le grand requin blanc a un corps massif et une nageoire caudale en croissant, comme les ichthyosaures les plus évolués. Les grands requins blancs nagent en ne remuant que la queue, tandis que tout le corps des roussettes ondule. La nage ondulante requiert un corps flexible. Les roussettes en sont dotées, parce qu'elles ont près de 40 vertèbres dans la partie antérieure du corps. Les ichthyosaures primitifs *Utatsusaurus* et *Chaohusaurus* en ont autant (les reptiles et les mammifères actuels n'en ont qu'une vingtaine).

La nage ondulante de la roussette est adaptée aux eaux relativement peu profondes du plateau continental. Les lézards actuels ondulent aussi pour nager, mais avec moins d'efficacité que les animaux aquatiques. Les premiers ichthyosaures, qui ressemblaient à des roussettes et qui descendaient d'un ancêtre aux allures de lézard, devaient nager de la même façon et vivre sur le plateau continental.

Les prédateurs qui utilisent ce type de nage prospèrent près du rivage, où la nourriture abonde, mais ne peuvent pas parcourir de longues distances pour trouver leurs proies. Les prédateurs de haute mer, où la nourriture est moins concentrée, ont un type de nage

4. L'ÉTUDE DES SQUELETTES a révélé que le corps mince et comparable à celui d'un lézard des premiers ichthyosaures (en haut) s'est progressivement épaissi pour prendre la forme d'un poisson (en bas). Un aileron dorsal et une nageoire caudale sont apparus.

pattes, les os des membres antérieurs sont allongés et on distingue facilement ceux du poignet (irrégulièrement arrondis) de ceux de la paume (allongés et cylindriques). En revanche, chez les ichthyosaures pisciformes, les os du membre antérieur sont plus larges que longs et ont tous la même forme. Ils sont très proches les uns des autres, car aucune peau ne les sépare : la réunion de tous les doigts dans une même enveloppe de tissus mous devait augmenter la rigidité des nageoires, comme on l'observe aujourd'hui chez les baleines, les dauphins ou les tortues marines ; cet arrangement devait aussi améliorer leur hydrodynamisme (le profilé serait impossible à maintenir si les doigts étaient séparés).

L'étude des fossiles intermédiaires entre les ichthyosaures en forme de

lézard et leurs descendants en forme de poisson a révélé que l'évolution de la patte vers la nageoire ne s'est pas limitée à une simple transformation des cinq doigts. Au contraire, des doigts ont disparu, d'autres sont apparus et certains se sont divisés. Par exemple, le pouce présent chez les formes ancestrales disparaît chez les ichthyosaures plus évolués. L'ordre dans lequel les doigts s'ossifient au cours de la croissance d'un *Stenopterygius* (nous en possédons de nombreux spécimens à différents stades de croissance) révèle qu'au cours de l'évolution de cet ichthyosaure, des doigts supplémentaires sont apparus de part et d'autre de ceux qui existaient déjà. Certains occupaient la position du pouce disparu. L'évolution n'a donc pas suivi une ligne directe et continue d'un caractère à un autre.

Les ichthyosaures sont les seuls reptiles dont le corps



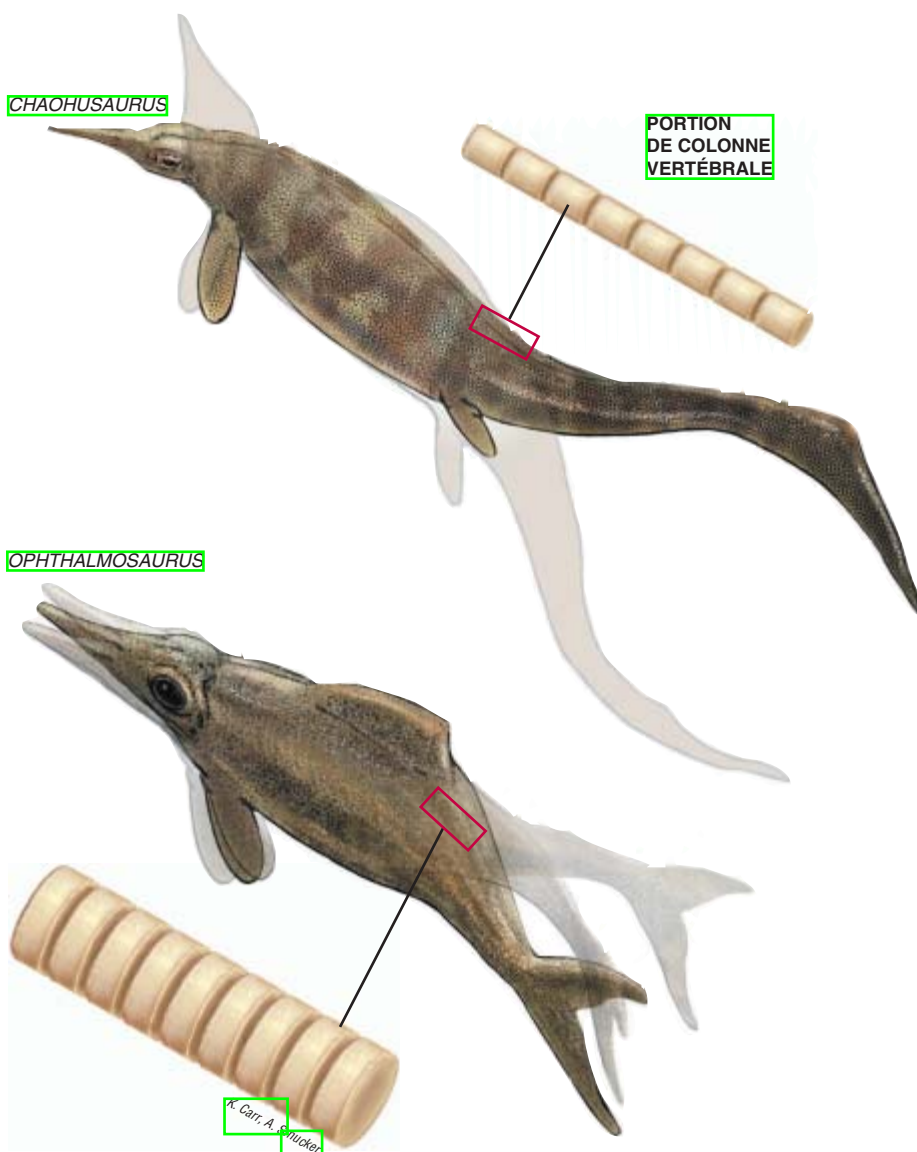
5. LA NAGE (*ci-contre*) et l'habitat (*ci-dessus*) des ichthyosaures se sont modifiés en même temps que la forme de leurs vertèbres. Les ichthyosaures primitifs, tel *chao-husaurus*, avaient une colonne vertébrale étroite et ils ondulaient comme des anguilles. Leur agilité leur permettait de chasser dans les eaux peu profondes. En revanche, chez les ichthyosaures ultérieurs, tel *Ophtalinosaurus*, la colonne vertébrale s'est épaissie : les vertèbres se sont raccourcies et le corps s'est raidi. Pendant la nage, seule la queue oscillait latéralement. Cette rigidité du corps a réduit la dépense énergétique lors de la nage, donc la consommation d'oxygène : les ichthyosaures ont commencé à plonger pour chasser en haute mer.

plus économique. Les grands requins blancs, dont le corps rigide n'ondule pas, se propulsent uniquement en faisant osciller leur nageoire caudale en forme de croissant. Les ichthyosaures évolués avaient ce type de nageoire caudale, et ils devaient nager comme les grands requins blancs, étant donné l'allure trapue de leur corps.

L'appel des profondeurs

L'étude de nombreuses espèces de requins a montré que plus le corps s'épaissit, plus le diamètre des vertèbres augmente. Les requins (et les ichthyosaures primitifs) doivent leur souplesse à leur grand nombre de vertèbres. À mesure que le corps des ichthyosaures devenait plus massif, le nombre de vertèbres restait stable, mais leur diamètre augmentait de près de 50 pour cent (elles prenaient l'apparence de palets) : les ichthyosaures perdaient de leur souplesse.

Lorsque les ichthyosaures ont gagné la haute mer, leur zone de chasse en surface s'est agrandie et ils ont commencé à explorer les profondeurs. L'étude du contenu stomacal fossilisé de certains ichthyosaures pisciformes a montré qu'ils se nourrissaient prin-



cipalement de céphalopodes (les pieuvres, les calmars, les seiches). Les cachalots chassent entre 100 et 1 000 mètres de profondeur, atteignant parfois 3 000 mètres. L'étendue de cette zone de chasse n'est pas surprenante, car les ressources nutritives sont rares

au-dessous de 200 mètres. Pour chasser en profondeur, les baleines et autres animaux aquatiques qui respirent à l'air libre doivent plonger et remonter à la surface avec une seule prise d'air. La consommation d'énergie pendant la nage est minimisée pour économiser

a pris une forme de poisson, au cours de leur évolution



marins flottent, une telle enveloppe est inutile. Des os lourds (qui ne stockent quasiment pas d'oxygène) empêcheraient les animaux plongeurs de remonter à la surface. Armand de Ricqlès et ses collègues du Laboratoire d'anatomie comparée de l'Université Paris VII ont montré que chez les mammifères actuels adaptés à la plongée, tel le dauphin, l'os est spongieux et moins dense. Les os des ichthyosaures pisciformes ont le même type d'enveloppe spongieuse : pour eux aussi, un squelette plus léger constituait un avantage.

La meilleure preuve de l'adaptation à la plongée profonde des derniers ichthyosaures est la taille de leurs yeux : 23 centimètres de diamètre pour *Ophthalmosaurus*. Par rapport à la taille du corps, cet ichthyosaure avait les yeux les plus gros de tous les animaux, actuels ou disparus.

On déduit de la taille des yeux que la vue des ichthyosaures s'est améliorée au cours de leur évolution. L'anneau sclérotique, un os qui soutenait l'œil, évitait que ce dernier ne se déforme sous l'effet de la pression de l'eau, lors de la nage ou de la plongée (l'homme et ces ancêtres mammaliens ont perdu l'anneau sclérotique, mais la plupart des autres vertébrés en ont un). D'après le diamètre de cet anneau, nous avons calculé la focale de l'œil, un nombre utilisé en photographie (le rapport de la distance focale et du diamètre de la lentille) pour définir la luminosité d'un objectif. Plus ce nombre est petit, plus l'image est lumineuse et plus le temps d'exposition est réduit. Les objectifs médiocres ont une focale de 3,5 ou plus, tandis que les meilleurs ont une focale de 1. La focale de l'œil humain est de 2,1 et celle de l'œil du chat est de 0,9 : cet animal pourrait voir à 500 mètres de profondeur sous l'eau. *Ophthalmosaurus* avait aussi une focale de 0,9, mais ses yeux étaient beaucoup plus gros, de sorte que sa vision devait être encore meilleure que celle du chat.

Disparus à jamais

De nombreuses caractéristiques des ichthyosaures (la forme du corps et des vertèbres, la taille des yeux, les capacités respiratoires, le régime alimentaire et l'habitat) se sont modifiées au cours de leur évolution. Bien qu'il soit difficile de distinguer les causes des conséquences, ces transformations ne semblent pas s'être produites indépendamment les unes des autres. Grâce



7. CETTE PETITE ILE au Nord-Est du Japon abritait deux squelettes presque complets d'*Utatsusaurus*, le plus ancien des ichthyosaures.

à elles, les ichthyosaures ont régné sur les mers pendant 155 millions d'années. Les nouveaux fossiles d'ichthyosaures «primitifs» ont fait progresser notre compréhension de leur remarquable adaptation à la vie marine, mais les causes de leur extinction restent mystérieuses.

Les ichthyosaures primitifs, limités à la vie près du rivage par leur nage ondulante peu efficace, ont peut-être disparu en même temps que leur habitat : une baisse générale du niveau des océans aurait éliminé leurs niches écologiques peu profondes. De nombreux animaux ont disparu de

cette façon. En revanche, les ichthyosaures évolués adaptés à la haute mer auraient survécu. Leur habitat n'ayant pas changé, d'autres facteurs ont concouru à leur disparition, peut-être l'apparition des premiers requins évolués. Cependant, on a pas encore trouvé d'indice d'une compétition entre ces deux groupes.

Les paléontologues n'expliqueront peut-être jamais pourquoi les ichthyosaures ont disparu, mais ils continuent néanmoins de reconstituer l'histoire de leur évolution et de la vie sur terre.

Ryosuke MOTANI est paléontologue au Musée royal de l'Ontario, au Canada.

C. MCGOWAN, *Dinosaurs, Spitfires, and Sea Dragons*, Harvard University Press, 1991.

R. MOTANI, Y. HAILU et C. MCGOWAN, *Eel-Like Swimming in the Earliest Ichthyosaurs*, in *Nature*, vol. 382, pp. 347-348, 25 juillet 1996.

R. MOTANI, N. MINOURA et T. ANDO, *Ichthyosaurian Relationships Illuminated*

by *New Primitive Skeletons from Japan*, in *Nature*, vol. 393, pp. 255-257, 21 mai 1998.

R. L. CAROLL, *Vertebrate Paleontology and Evolution*, Freeman, San Francisco, 1987.

R. MOTANI, B. ROTHSCCHILD et W. WAHL, *Large Eyeballs in Diving Ichthyosaurs*, in *Nature*, vol. 402, p. 747, 16 décembre 1999.

Site Internet de Ryosuke Motani : www.ucmp.berkeley.edu/people/motani/ichtyo/

La maladie d'Alzheimer

PETER SAINT-GEORGE-HYSLOP

On commence à élucider les mécanismes biochimiques complexes responsables de cette maladie qui détruit inexorablement les capacités intellectuelles et la vie elle-même.

Des pertes de mémoire apparemment sans gravité ; des questions répétées deux ou trois fois ; des difficultés à participer aux discussions ; une incapacité à terminer une activité soutenue. D'abord, la famille ne prête guère attention à ces troubles mineurs qu'elle attribue à l'âge ou à la fatigue. Puis, les difficultés de la grand-mère augmentent : elle ne retrouve plus son domicile alors qu'elle est au bas de sa rue, elle reconnaît de moins en moins les visages de ses proches. Finalement, elle a besoin d'une aide pour tous les actes de la vie quotidienne, pour se laver, s'habiller, se servir à manger et aller en promenade.

Cette succession de symptômes caractérise les démences, c'est-à-dire, selon l'Organisation mondiale de la santé, l'altération progressive de la mémoire, du raisonnement et des émotions. Elles résultent souvent de la dégénérescence de certaines régions du cerveau. Les démences, déjà mentionnées dans les textes grecs et dans la littérature, sont plus fréquentes avec l'âge. Aussi, dans les pays industrialisés, où l'espérance de vie a notablement augmenté, ces maladies posent un grave problème de santé publique. Environ 15 pour cent des personnes de plus de 65 ans auront une forme de démence, et plus de 35 pour cent des personnes de plus de 85 ans.

La maladie d'Alzheimer, du nom du médecin Aloïs Alzheimer qui l'a décrite pour la première fois en 1907, est la plus fréquente de toutes les démences. En France, 300 000 personnes en souffrent, et les experts estiment qu'en 2025, elles seront

22 millions de par le monde. Faute de connaissances, les traitements préventifs ou curatifs font encore défaut, mais les découvertes récentes en épidémiologie, en génétique ainsi qu'en biologie moléculaire et cellulaire ont en partie révélé les causes de cette maladie et des mécanismes pathogènes.

La maladie d'Alzheimer résulte du fonctionnement anormal de certaines protéines dont des fragments toxiques s'accumulent dans certains neurones et dans les espaces intercellulaires. Plusieurs autres maladies où les neurones dégèrent, notamment la démence frontotemporale (qui résulte d'une atrophie cérébrale localisée dans les aires frontales et temporales), la maladie de Parkinson et la maladie de Creutzfeldt-Jakob, résultent également d'un dysfonctionnement de certaines protéines. Les découvertes de divers mécanismes responsables des démences ouvrent la voie à de nouveaux traitements et, par exemple, à des vaccins, dont l'un commencera à être testé en France, au début de 2001 ; ils aideront l'organisme à éliminer ces fragments protéiques toxiques.

Innée ou acquise ?

Depuis la description de la maladie, les épidémiologistes ont voulu comprendre comment elle se transmet, en cherchant notamment s'il existe des familles plus touchées que d'autres. Qui de la génétique ou de l'environnement a une influence prépondérante ? Dans les années 1980, des études ont montré que les membres de cer-

taines familles sont davantage touchés par ce type de démence. Parfois, la maladie se transmet à la moitié des enfants, aussi bien les garçons que les filles. Ainsi, il existe une vulnérabilité héréditaire liée à un gène anormal situé sur un chromosome autosomal, c'est-à-dire non sexuel, puisque les deux sexes sont atteints ; de plus, le gène muté est dominant par rapport au gène normal hérité du parent non malade.

Les épidémiologistes ont également étudié la fréquence de la maladie d'Alzheimer hors des familles à risques. Ils ont établi que l'hérédité est un facteur important. Cependant, des facteurs de risques environnementaux ont aussi été identifiés : ils agissent en synergie avec les facteurs génétiques. Les facteurs identifiés sont un faible niveau d'éducation au cours de la petite enfance, un grave traumatisme à la tête et – peut-être – la présence d'aluminium dans l'eau de boisson. Toutefois, ces facteurs sont sans doute eux-mêmes à relier à d'autres agents ou à d'autres événements causals. Par exemple, en diminuant le nombre de neurones, une blessure à la tête entraîne peut-être une apparition plus précoce des symptômes de la maladie d'Alzheimer.

Néanmoins, la découverte de facteurs génétiques montre que toute avancée dans ce domaine aura des répercussions sur tous les cas de maladie d'Alzheimer, car les anomalies cliniques, neuropathologiques et biochimiques sont identiques pour tous ces malades, que l'origine soit génétique ou non.

La formation des plaques amyloïdes

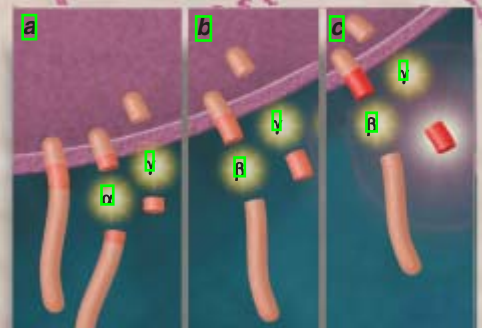
En observant au microscope le cerveau de malades décédés, les neurobiologistes ont constaté que les neurones de certaines zones du cerveau, tels l'hippocampe, un centre de la mémoire, et les aires du cortex cérébral dédiées au raisonnement, à la mémoire, au langage et aux mécanismes de la pensée, étaient détruits. Dans les années 1970, les biologistes ont découvert que certains des neurones détruits sont des neurones cholinergiques, c'est-à-dire qu'ils communiquent par l'intermédiaire d'un neurotransmetteur nommé acétylcholine : cette molécule est libérée dans la synapse, l'espace qui sépare deux neurones, par le neurone «amont», puis captée par des récepteurs situés sur le neurone «aval» avant d'être finalement dégradée par une enzyme, l'acétylcholinestérase. Des médicaments, tels l'Exelon™ et l'Aricept™, qui sont apparus dans les années 1990, inhibent l'action de l'acétylcholinestérase : en augmentant la durée d'action de l'acétylcholine, ces composés ralentissent le développement des dysfonctionnements, lorsque la maladie n'est pas encore trop avancée. Hélas, ces médicaments sont inutiles lorsque les neurones cholinergiques sont déjà détruits.

Outre la destruction de certains neurones, l'autre anomalie directement observable de la maladie d'Alzheimer se traduit par la présence d'agrégats de protéines dans le cerveau soit à l'intérieur des neurones, soit entre eux. À l'extérieur, on observe des plaques amyloïdes et à l'intérieur des neurones, des amas neurofibrillaires.

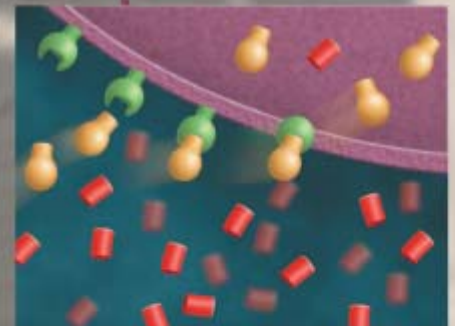
Un peptide encombrant

Les plaques amyloïdes s'accumulent dans les espaces intercellulaires et sont entourées de cellules inflammatoires actives, les cellules microgliales. Ces dernières font partie du système immunitaire du cerveau et tentent sans doute d'éliminer les plaques amyloïdes elles-mêmes ou les neurones voisins endommagés (ceux-ci ont souvent un aspect enflé et déformé). On ignore si les neurones enfouis dans les plaques ou situés à proximité fonctionnent normalement, car la densité des plaques semble indépendante de la gravité des démences. En outre, de telles plaques sont présentes chez la plupart des personnes âgées. Néanmoins, elles abondent dans l'hippocampe et dans le

Les plaques amyloïdes se forment à partir de la protéine précurseur bêta-amyloïde. Celle-ci est dégradée selon plusieurs voies : dans la première, les enzymes alpha- et gamma-sécrétases la découpent et donnent ainsi naissance au peptide inoffensif p3 (a). Lorsque les secrétases bêta et gamma coupent la protéine bêta-amyloïde, elles libèrent soit un peptide bêta-amyloïde inoffensif de 40 acides aminés (b), soit un peptide toxique de 42 acides aminés (c).



Les peptides toxiques, nommés peptides bêta-amyloïdes, s'accumulent dans les espaces intercellulaires, notamment parce que c'est la forme epsilon 4 de l'apolipoprotéine E (une protéine qui transporte le cholestérol dans le sang et participe à la régénération cellulaire) qui est éliminée de ces espaces à la place du peptide bêta-amyloïde.

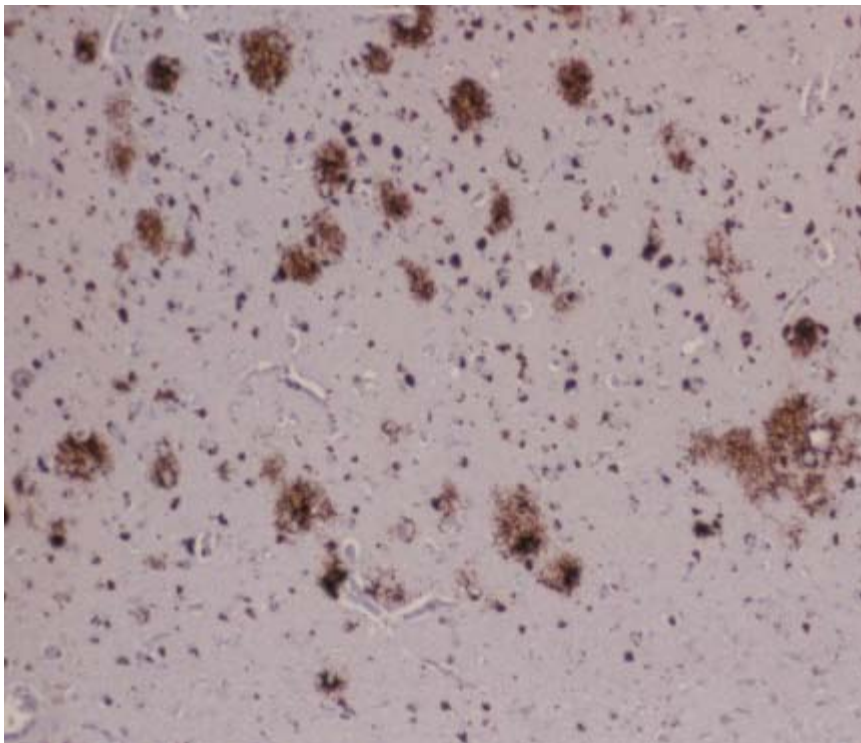


Les peptides bêta-amyloïdes forment des plaques amyloïdes qui perturbent la régulation du calcium dans les neurones glutamatergiques, favorisent la formation de radicaux libres qui détruisent les protéines, les lipides et l'ADN des neurones, et enfin attirent des cellules immunitaires inflammatoires, telles les cellules microgliales et les astrocytes, qui exacerbent les lésions initiales.



2 K68

1. LA MALADIE D'ALZHEIMER atteint des millions de personnes dans le monde. Cette maladie est l'une des démences neurodégénératives dont les ravages augmentent à mesure que la population vieillit.



1 S 60000-115000

2. LES PLAQUES AMYLOIDES (les *amas sombres*), ici vues au microscope optique, sont l'un des premiers signes de la maladie d'Alzheimer, bien qu'elles ne soient pas directement liées à la gravité de la démence.

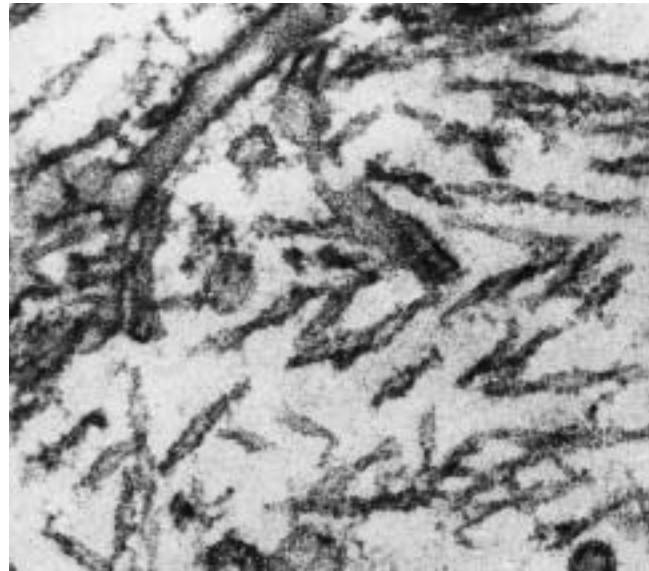
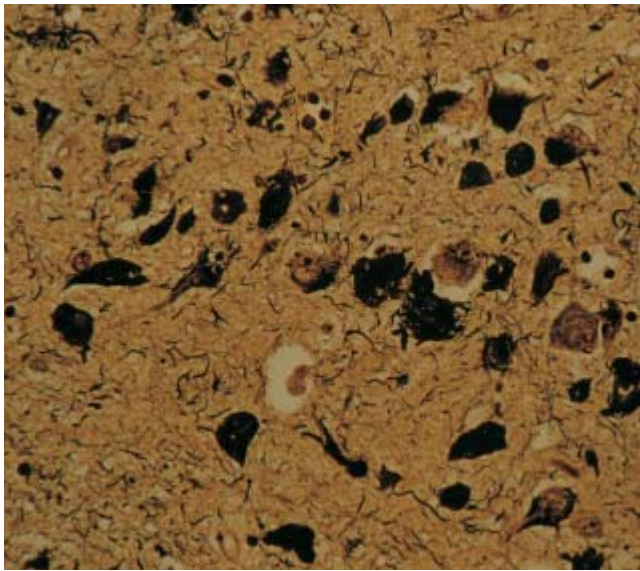
cortex cérébral quand les malades sont atteints de la maladie d'Alzheimer ; leur apparition précède celle des amas neurofibrillaires.

Étant donné le nombre de plaques et leur apparition précoce au cours de la maladie, les biologistes savaient qu'en décodant les mécanismes biochimiques de leur formation, ils comprendraient mieux l'origine de la maladie d'Alzheimer. En 1984, George Glenner, de l'Université de Californie, a découvert que le composant principal des plaques amyloïdes est un peptide, c'est-à-dire un court fragment de protéine, constitué de 40 à 42 acides aminés (les éléments constitutifs des protéines). L'identification de ce peptide, nommé peptide bêta-amyloïde, a été rapidement suivie du séquençage du gène, du chromosome 21, qui code la protéine plus longue dont il est issu : la protéine précurseur bêta-amyloïde.

Bien que l'on ignore encore le rôle de cette protéine précurseur, on sait aujourd'hui qu'un grand nombre de cellules, dans des tissus différents, la synthétisent. Cette protéine, qui comporte entre 695 et 770 acides aminés, traverse la membrane cellulaire externe : un petit morceau fait saillie dans la cellule et un grand morceau dépasse dans l'espace extracellulaire. Le peptide bêta-amyloïde provient de la portion de la protéine précurseur enchâssée partiellement dans la membrane cellulaire.

La protéine précurseur peut être découpée selon deux mécanismes. Dans le premier, elle serait d'abord découpée par une enzyme, l'alpha-sécrétase, mais cette enzyme n'a pas encore été isolée. Elle serait ensuite découpée par une autre enzyme, la gamma-sécrétase. Après ces deux clivages, un peptide « inoffensif », nommé p3, est libéré (voir l'illustration page 35).

Une autre voie de fragmentation de la protéine précurseur bêta-amyloïde a lieu aussi en deux étapes. Tout d'abord, l'enzyme bêta-sécrétase découpe la protéine bêta-amyloïde : l'un des fragments est alors dégradé par l'enzyme gamma-sécrétase ; l'un des peptides libérés est le peptide bêta-amyloïde. Dans des conditions normales, la plupart des peptides bêta-amyloïdes contiennent 40 acides aminés. Cependant un petit nombre d'entre eux (moins de dix pour cent), ont deux acides aminés supplémentaires : cette forme plus longue est celle



3. DES AMAS DE PROTEINES TAU apparaissent lorsque la maladie est déjà avancée et leur présence indique une démence grave. Ils apparaissent sous la forme de triangles noirs au microscope optique (à gauche) et de paires de filaments hélicoïdaux au microscope électronique (à droite).

qui donne naissance aux plaques amyloïdes qui perturbent les neurones.

Comment ce peptide de 42 acides aminés endommage-t-il les cellules nerveuses ? Il semble désorganiser la régulation du calcium : celui-ci pénétrerait par les membranes transpercées par le peptide bêta-amyloïde, ou bien, certains neurones qui dégénèrent entraîneraient la libération exacerbée de calcium dans les neurones cibles. Par ailleurs, il perturberait le fonctionnement des mitochondries (des éléments cellulaires qui produisent de l'énergie), qui libéreraient des radicaux oxygène, lesquels détérioreraient alors les protéines, les lipides et l'ADN. Enfin, ce peptide de 42 acides aminés libère des composés cellulaires, qui attirent des cellules immunitaires : la réaction inflammatoire locale endommage le tissu et renforce les méfaits du peptide. Malheureusement, les mécanismes restent partiels et n'expliquent pas encore toutes les étapes qui aboutissent à une démence.

Les protéines tau

À la différence des plaques amyloïdes, les amas neurofibrillaires s'accumulent à l'intérieur des neurones. En 1963, à l'aide d'un microscope électronique, H. Kidd a montré que les amas sont des paires de filaments enroulés en hélice. Des analyses effectuées dans les années 1980 ont révélé que ces filaments sont constitués d'une protéine, la protéine tau. Elle se lie à une autre protéine, la tubuline, laquelle consti-

tue les microtubules. Ces structures tubulaires confèrent leur architecture aux cellules et participent au transport intracellulaire de diverses molécules et de constituants cellulaires, telles des vésicules et des mitochondries. Les microtubules se désagrègent rapidement en l'absence de la protéine tau.

L'association des protéines tau et de la tubuline est régulée par la phosphorylation des premières : plus elles portent de groupes phosphate, moins elles se lient aux microtubules. Dans la maladie d'Alzheimer, ces filaments anormalement phosphorylés ne remplissent plus leur rôle et s'accumulent dans le corps cellulaire et dans les ramifications des neurones, tandis que le fonctionnement des microtubules est perturbé jusqu'à entraîner la mort des cellules (voir l'illustration page 39).

Les amas anormaux de filaments ont longtemps été considérés comme une conséquence sans importance des mécanismes pathogènes. Toutefois, l'étude récente de la démence frontotemporale a remis en question cette idée reçue. Le cerveau de certains malades contient des dépôts de protéines tau. Comme dans la maladie d'Alzheimer, certaines formes de démence frontotemporale sont d'origine génétique. En 1998, Gerard Schellenberg, de l'Université de Washington, a identifié une mutation sur le gène *tau*, situé sur le chromosome 17. La présence d'une telle mutation atteste que la démence résulte parfois directement d'un fonctionnement anormal et d'une accumulation de protéines tau.

Ainsi, les amas neurofibrillaires font sans doute partie intégrante de la maladie d'Alzheimer, et ne sont pas un effet secondaire. Cette hypothèse est confirmée par le fait que plus les filaments anormaux sont nombreux, plus la démence est grave. Les mutations sur le gène *tau* modifieraient peut-être l'association des protéines tau avec la tubuline ou perturberaient les quantités de protéines tau synthétisées.

Des protéines tau s'accumuleraient, les microtubules cesseraient de fonctionner correctement et les mécanismes de transport cellulaire seraient perturbés. Les neurones ne transmettraient plus correctement les signaux électriques, ni les éléments nutritifs indispensables aux cellules. Les anomalies de la protéine bêta-amyloïde et du peptide déclenchent une série de réactions qui endommagent la protéine tau, laquelle lèse les neurones jusqu'à la démence.

Des gènes et des mutations

La découverte de la composition des plaques et des amas, combinée aux indices génétiques, a fait notablement progresser la recherche dans ce domaine. Au moment où le gène codant la protéine bêta-amyloïde était localisé sur le chromosome 21, des études confirmaient que, dans certaines familles à risques, le chromosome 21 porte parfois une anomalie. Par ailleurs, les personnes atteintes du syndrome de Down (elles ont trois copies du chromosome 21 au lieu de

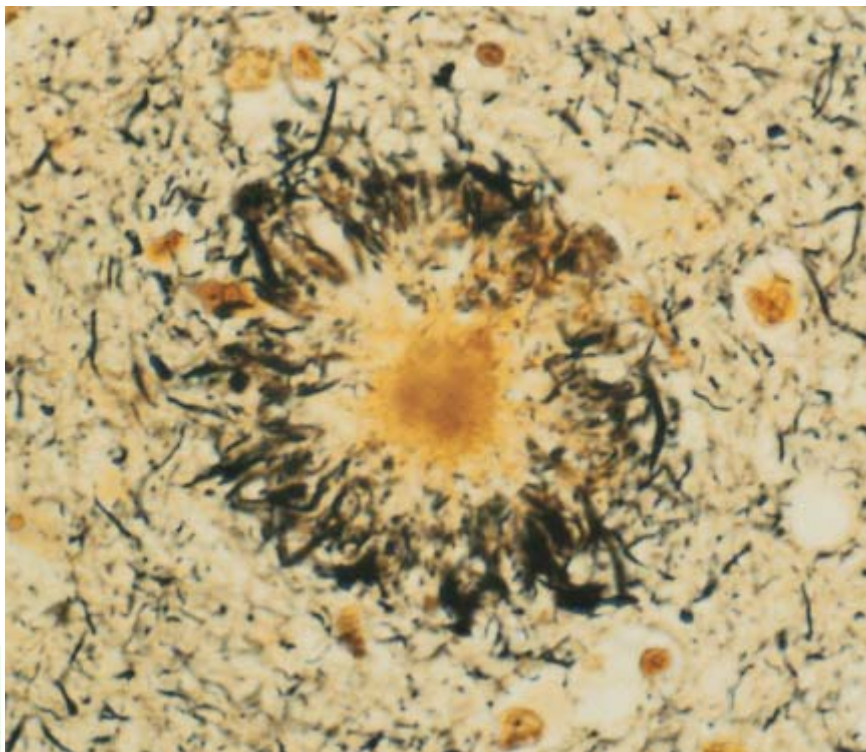
deux) présentent presque toujours des symptômes de la maladie d'Alzheimer vers l'âge de 40 ans.

Ces observations, confirmées au début des années 1990, indiquent que des mutations du gène de la protéine bêta-amyloïde seraient à l'origine de certains cas de maladie

d'Alzheimer. Les gènes portent des instructions pour la synthèse des protéines : aussi, la protéine codée par un gène muté sera différente de celle d'un gène normal. Comme un engrenage défectueux dans un moteur, la protéine anormale «enraye» le bon fonctionnement des cellules.

À mesure que les biologistes moléculaires élucidaient ces fonctions de la protéine bêta-amyloïde et du peptide bêta-amyloïde qui en est issu, les généticiens identifiaient plusieurs mutations à l'origine de substitutions d'acides aminés dans la protéine bêta-amyloïde, aux endroits où les enzymes alpha-, bêta- et gamma-sécrétases interviennent. Ces mutations augmentent la quantité des deux types de peptides bêta-amyloïdes ou seulement celle de la version longue, toxique. Le gène de la protéine bêta-amyloïde est-il le seul responsable des mécanismes pathogènes dans la maladie d'Alzheimer?

En 1995, nous avons identifié deux gènes, nommés *préséniline 1* et *préséniline 2*, situés respectivement sur les chromosomes 14 et 1, dont les mutations entraînent une forme fulgurante et précoce de maladie d'Alzheimer. Ces formes précoces s'observent chez 10 à 60 pour cent des malades atteints d'une maladie d'Alzheimer familiale. Les protéines présénilines 1 et 2 traversent la membrane plusieurs fois, comme un fil qui relie deux pièces de tissu. Ces protéines subissent un long processus de maturation où elles sont découpées en deux fragments par des enzymes présénilinasés et caspases, puis phosphorylées par des enzymes kinases. Les deux fragments résultants sont incorporés dans un complexe protéique qui, à son tour, découpe d'autres protéines fixées à la membrane, notamment la protéine



4. PLAQUES AMYLOIDES ET AMAS DE PROTÉINES TAU s'agencent en fin de maladie d'Alzheimer : le peptide bêta-amyloïde forme le cœur de la plaque (*en orange*) ; il est entouré d'un halo de terminaisons nerveuses qui contiennent des filaments de protéines tau (*en noir*). Autour de cet ensemble, les cellules microgliales et les astrocytes (*en marron*) traduisent une inflammation.



5. L'ATROPHIE DU CERVEAU d'un malade atteint de la maladie d'Alzheimer (*à gauche*) comparée à un cerveau sain (*à droite*) illustre les dommages dus à cette maladie (les deux personnes ayant le

même âge). Certaines régions cérébrales, tels l'hippocampe et le cortex, perdent des neurones, et les sillons s'élargissent, tandis que les circonvolutions s'atrophient.

bêta-amyloïde et la protéine Notch (qui participe au développement embryonnaire).

Environ 50 mutations ont été découvertes sur le gène *préséniline 1* : chacune d'elles est à l'origine d'une maladie précoce d'Alzheimer, survenant entre 30 et 60 ans. Diverses études indiquent que certaines mutations des gènes *préséniline* interrompent l'activité de ces complexes protéiques, qui ne traitent plus correctement les protéines sur lesquelles ils agissent. En 1999, chez la souris, on a découvert que la *préséniline 1* était probablement l'enzyme gamma-sécrétase qui découpe la protéine bêta-amyloïde dans la région transmembranaire. Ainsi, lorsque le gène est muté chez la souris, la gamma-sécrétase est inactive et les souris ne produisent pas de peptides bêta-amyloïdes. Chez ces souris, d'autres protéines membranaires ne sont pas découpées correctement, notamment la protéine Notch.

Les mutations sur les gènes *préséniline 1* et 2 observées chez des personnes ayant une prédisposition familiale à la maladie d'Alzheimer ont l'effet opposé : la gamma-sécrétase est suractivée et dégrade davantage les protéines ; le peptide bêta-amyloïde, et notamment sa version longue destructrice, abonde.

Toutefois, les mutations des gènes *bêta-amyloïde* ou *préséniline* ne sont à l'origine que de 50 pour cent environ des cas de maladie d'Alzheimer familiale précoce, c'est-à-dire de cinq pour cent de tous les cas répertoriés. Quel autre gène est responsable des 95 pour cent qui restent ?

En 1993, Allen Roses, de l'Université Duke, et Jonathan Haines, de l'Université Vanderbilt, ont identifié un gène du chromosome 19, qui est associé à la forme la plus courante de la maladie d'Alzheimer, qui apparaît à un âge avancé. Il s'agit du gène de l'apolipoprotéine E, la protéine qui assure le transport du cholestérol dans le sang et participe à la réparation et à la régénération des cellules.

On connaît trois formes, ou allèles, du gène de l'apolipoprotéine E et leurs fréquences varient en fonction des populations : le variant epsilon 3 apparaît chez 40 à 90 pour cent de la population ; les variants epsilon 2 et epsilon 4, plus rares, sont présents chez respectivement deux pour cent et entre 6 et 37 pour cent de la population. Or,

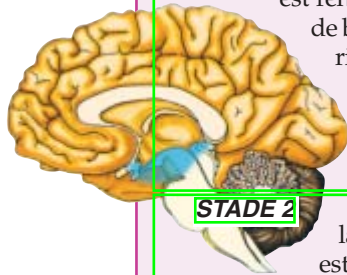
Les amas neurofibrillaires

Les protéines tau saines s'associent aux microtubules, constitués de tubuline, qu'elles stabilisent. Dans une cellule, ces microtubules sont les armatures et les voies de transport des éléments nutritifs et des messages neuronaux.

Lors de la maladie d'Alzheimer, la quantité et la qualité de protéines tau sont anormales et leur association avec la tubuline, la protéine des microtubules, est perturbée. Les protéines tau appariées s'accumulent en torsades qui déforment les microtubules et perturbent leur fonctionnement. À cause de ces amas, les neurones et leurs prolongements sont « boursoufflés ».

Les lectures de la maladie d'Alzheimer

La maladie d'Alzheimer est une maladie hétérogène, tant du point de vue clinique, neuropathologique que moléculaire et génétique. Elle se développe sur plusieurs décennies et affecte un organe complexe et inaccessible : le cerveau. Aussi, les descriptions et les interprétations de la maladie sont-elles nombreuses : elles constituent autant de « lectures » différentes de la maladie, dont le diagnostic est rendu difficile. De plus, il n'y a pas encore de bons modèles expérimentaux, et les souris transgéniques dont les gènes *préséniline* et *bêta-amyloïde* sont mutés ne reproduisent bien qu'une des deux lésions caractéristiques : les plaques amyloïdes.



STADE 2

La lecture est simple quand on décrit la maladie d'Alzheimer à travers ce qui est admis par tous : un phénomène neuro-dégénératif avec deux lésions caractéristiques ; les plaques amyloïdes et les amas neurofibrillaires. Notons que les protéines tau et les amas neurofibrillaires qu'elles forment ne sont reconnus officiellement en tant que lésions caractéristiques de la maladie d'Alzheimer que depuis 1999.

Le diagnostic certain de la maladie d'Alzheimer nécessite un examen neuropathologique – *post-mortem* – et l'identification des deux types de lésions dans différentes régions corticales.

Le diagnostic génétique, à partir d'une simple prise de sang, ne concerne que les formes familiales, soit, en France, 1 cas sur 300. Le grand nombre de mutations observées sur les gènes *préséniline* et *bêta-amyloïde* écarte tout tentative d'examen systématique.

Le diagnostic biologique est également fondé sur les deux lésions de la maladie d'Alzheimer : il s'agit alors de détecter, dans le liquide céphalo-rachidien, une diminution de la quantité de peptide bêta-amyloïde et une augmentation de celle des protéines tau. Un diagnostic fondé sur l'observation des modifications du peptide bêta-amyloïde ou des produits de dégradation des protéines bêta-amyloïdes dans le sang est en cours d'élaboration.

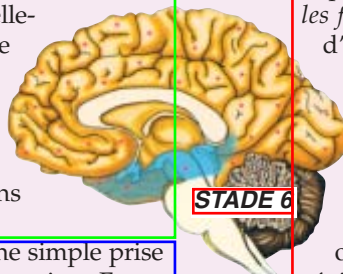
Une autre lecture repose sur les approches thérapeutiques : aujourd'hui, les traitements sont symptomatiques et fondés sur l'inhibition de l'acétylcholinestérase, une enzyme qui dégrade un neuromédiateur, l'acétylcholine. Les effets de ces médicaments varient selon les patients, sans que l'on sache pourquoi. Sous peu, un quatrième médicament de cette catégorie sera en vente, ainsi qu'un nouveau médicament, la mémantine. Ce dernier inhibe l'action du glutamate, un autre neuromédiateur, qui est libéré en excès pendant la maladie d'Alzheimer.

Les nouveaux traitements sont essentiellement fondés sur l'inhibition du peptide bêta-amyloïde toxique. Le vaccin destiné à activer le système immunitaire contre le peptide bêta-amyloïde constitue une avancée remarquable : en 1999 et en 2000, on a montré qu'il entraînait la destruction des plaques bêta-amyloïdes dans le cerveau de souris transgéniques ; ces souris récupèrent des capaci-

tés d'apprentissage qui avaient disparu avec l'installation des plaques bêta-amyloïdes. En 2001, les essais thérapeutiques de phase II commenceront aux États-Unis et en Europe, notamment dans six centres hospitaliers en France. Cependant, personne ne peut prédire si ce vaccin efficace sur les souris le sera aussi sur l'homme.

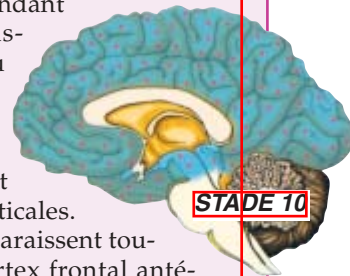
Enfin, la lecture de la maladie d'Alzheimer peut être globale. Il faut alors à la fois comprendre ce qui se passe dans les différents compartiments cellulaires (la mauvaise coupure de la protéine bêta-amyloïde a probablement lieu dans le réticulum endoplasmique), connaître le rôle de chaque type cellulaire (quelles cellules produisent le peptide bêta-amyloïde), et connaître l'évolution de la dégénérescence dans les différentes aires cérébrales. En d'autres termes, il faut une vision panoramique, comme le dit Saint-George Hyslop, mais au moins en deux dimensions : dans le temps – la durée de la maladie – et dans l'espace des différentes régions cérébrales atteintes.

La protéine bêta-amyloïde (les points rouges sur les figures) est certes centrale dans la maladie d'Alzheimer, mais l'observation des cas non familiaux, qui représentent plus de 95 pour cent des cas, indique que les protéines tau (en bleu) sont également un phénomène dégénératif incontournable. Ces protéines apparaissent dans les régions cérébrales selon un scénario invariable : dix stades ont été définis, qui correspondent aux dix régions cérébrales touchées successivement par



STADE 6

les protéines tau. Le vieillissement normal du cerveau se limite au stade 2. Pendant une phase asymptomatique, jusqu'au stade 6, les protéines tau envahissent l'hippocampe et le cortex temporal antérieur, inférieur et moyen tandis que les protéines bêta-amyloïdes apparaissent dans l'ensemble des régions corticales. Les manifestations cliniques apparaissent toujours à partir du stade 7 : le cortex frontal antérieur, puis le cortex pariétal et le cortex temporal supérieur sont successivement atteints.



STADE 10

Ce seuil qui sépare la maladie asymptomatique de la maladie déclarée est fluctuant et modulé par de nombreux autres facteurs, telles des pathologies associées (par exemple, l'hypertension, un traumatisme crânien, un dysfonctionnement immunitaire) et des facteurs environnementaux et génétiques qui commandent le bon fonctionnement cérébral, la vulnérabilité neuronale et le bon développement des réseaux neuronaux. Ces facteurs abaissent ou relèvent le seuil des manifestations cliniques.

La co-évolution et la synergie des dégénérescences dues aux protéines tau et bêta-amyloïdes expliquent l'hétérogénéité apparente de la maladie d'Alzheimer. La compréhension de ce développement spatio-temporel des deux mécanismes dégénératifs est indispensable.

André DELACOURTE, INSERM U422

l'allèle epsilon 4 est présent chez environ 40 pour cent des malades atteints de la maladie d'Alzheimer.

L'allèle epsilon 4 accroît le risque de la maladie de différentes façons. Selon la première hypothèse, une même protéine transporte la forme epsilon 4 de la protéine et le peptide bêta-amyloïde, mais son affinité pour epsilon 4 est supérieure. Par conséquent, epsilon 4 est éliminé rapidement des espaces intercellulaires, tandis que le peptide bêta-amyloïde s'y accumule. Cette hypothèse est étayée par l'excès d'amas de peptide bêta-amyloïde chez les malades qui ont l'allèle epsilon 4 du gène de l'apolipoprotéine E. De surcroît, les malades qui ont à la fois une mutation du gène de la protéine bêta-amyloïde et l'allèle epsilon 4 développent une maladie d'Alzheimer beaucoup plus tôt que les personnes qui portent la même mutation du gène de la protéine bêta-amyloïde, mais ont un autre allèle du gène de l'apolipoprotéine E.

Les preuves accumulées démontrent que l'un des événements à l'origine de la maladie d'Alzheimer est une anomalie intervenant au cours de l'élaboration de la protéine bêta-amyloïde et du peptide bêta-amyloïde. Les anomalies résultant du clivage de la protéine bêta-amyloïde et de l'accumulation du peptide bêta-amyloïde commencent au tout début de la maladie, mais que se passe-t-il après ? Pourquoi la densité des plaques amyloïdes ne reflète-t-elle pas la gravité de la démence ? Les amas de peptide bêta-amyloïde sont-ils effectivement à l'origine de la démence ? Cette dernière question est au cœur des débats et des recherches depuis des années. Pour ma part, je pense que les anomalies de la protéine bêta-amyloïde et du peptide qui en est issu sont les mécanismes déclenchants, et que la série de réactions qui s'ensuit lèse les neurones, puis les détruit, ce qui aboutit à la démence. Un des derniers événements délétères serait l'apparition des amas neurofibrillaires.

De nouveaux traitements

Les découvertes biochimiques, moléculaires, génétiques, épidémiologiques et cliniques des dix dernières années ont amélioré notre compréhension de la maladie et ouvert la voie à de nouveaux traitements. Certains d'entre eux seront probablement issus des découvertes récentes sur les protéines tau, tandis que des substances agissant sur la protéine bêta-amyloïde et sur le peptide toxique sont déjà utilisées pour la recherche de traitements.

Par exemple, certains biochimistes mettent au point des composés qui bloqueraient la bêta ou la gamma-sécrétase et inhiberaient ainsi la formation du peptide bêta-amyloïde destructeur. D'autres visent à diminuer les effets nocifs du peptide créé. Les propriétés antioxydantes de la vitamine E ou des médicaments anti-inflammatoires non stéroïdiens, tel l'ibuprofène, diminueraient les effets toxiques du peptide bêta-amyloïde.

D'autres encore s'efforcent de réduire l'accumulation du peptide grâce à des colorants, par exemple le rouge Congo, qui s'insèrent dans les plaques amyloïdes, les brisant de l'intérieur.

L'équipe de Dale Schenk, de la Société *Elan Pharmaceuticals*, a découvert que chez des souris atteintes d'une forme de maladie d'Alzheimer (elles présentent des plaques amyloïdes, mais pas d'enchevêtrements de protéines tau), un vaccin qui utilise le peptide bêta-amyloïde réduit le nombre de plaques. En d'autres termes, les défenses immunitaires s'activent pour attaquer les amas de peptide bêta-amyloïde et s'en débarrasser.

Quel que soit l'avenir de ces traitements, l'existence de plusieurs voies de recherche est réconfortante. Les informations capitales recueillies sur les étapes de la maladie et sur les différents acteurs biochimiques offrent aux biologistes une vue «panoramique» de la maladie.

Peter SAINT-GEORGE-HYSLOP dirige le Centre de recherches sur les maladies neurodégénératives de l'Université de Toronto.

P. ST-GEORGE-HYSLOP, G. YU et al. *Nicotin Modulates Presenilin-Mediated Notch/glp-1 Signal Transduction and β APP*

Processing, in *Nature*, vol. 407, pp. 48-54, 7 septembre 2000.

W. MARKESBURY, *Neuropathology of Dementing Disorder*, Arnold, 1998.

R. TERRY, R. KATZMAN, K. BICK et S. SISODIA, *Alzheimer Disease*, seconde édition, Lipincott, Williams et Wilkins, 1999.



Congrès général de la Société Française de Physique
Strasbourg - 9/13 juillet 2001

Conférences plénières :
J.-P. BOUCHAUD, P. CHOMAZ,
E. CLEMENT, Y. COUDER,
G. GERBER, C. GIRARD,
J.T. HYNES, F. IACHELLO,
B. RAVEAU,
V. RUHLMANN-KLEIDE

Une séance plénière sera consacrée à l'enseignement de la physique.

Thèmes des mini-colloques

Traitement quantique de l'information.
Biophysique à l'échelle de la molécule unique.

Orientations futures pour les sources de lumière.

Nanoélectronique.

Nanomatériaux, nanostructures, nanotechniques.

Matériaux aux conditions extrêmes.

Physique à l'échelle de la cellule.

Physique appliquée en médecine.

Dynamique et écoulement des fluides particuliers : dispersion, émulsions, mousses, granulaires secs ou humides.

Friction et tribologie : de la physico-chimie de la surface à la mécanique.

Structure nucléaire et structure nucléaire : du noyau au plasma quark-gluon.

LEP, SUSY et nouvelle dimension de l'espace.

Accélérateurs à forte intensité et sources multiapplications.

Astrophysique.

Matériaux bifonctionnels.

Séance ouverte d'affiches.

Le formulaire d'inscription, disponible sur la toile à l'adresse donnée ci-dessous, est à renvoyer à :

Congrès Louis Pasteur, SFP 2001
19, rue du Maréchal Lefebvre
67100 Strasbourg
Mail : Congres@adm-ulp.u.strasbg.fr

La date limite d'envoi des inscriptions et résumés, pour les communications ou affiches, est le 15 mars 2001.

Informations complémentaires :
<http://www-sfp2001.c-strasbourg.fr>

La perception subliminale

LUDOVIC FERRAND • JUAN SEGUI

La perception non consciente d'images ou de sons modifie notre comportement. Toutefois, qu'on se rassure, les manipulations mentales à des fins commerciales ou électorales par messages subliminaux sont impossibles.

En mai 1988, la France s'émeut. Alors que la campagne présidentielle bat son plein, une polémique éclate : le générique du journal télévisé d'Antenne 2 laisse apparaître pendant quelques dixièmes de secondes une image de François Mitterrand, parmi d'autres photos. L'opposition crie à la manipulation subliminale. La Commission nationale de la communication et de la liberté, ancêtre du Conseil supérieur de l'audiovisuel, demande le retrait du générique.

Plus récemment, pendant la dernière campagne électorale américaine, les partisans de Al Gore accusent les républicains d'avoir introduit un message subliminal dans une publicité télévisée qui vantait les mérites de Georges Bush. Un démocrate a levé le lièvre, après avoir analysé plan après plan la publicité, par curiosité. Elle contenait une image imperceptible, où le mot *rats* apparaissait en grand sur l'écran, au moment où Georges Bush taxait les démocrates de bureaucrates.

De telles polémiques surgissent régulièrement depuis qu'une controverse éclata en 1958 et fit grand bruit. Un publicitaire affirma alors que la présentation subliminale des slogans *Mangez du pop-corn* et *Buvez du Coca-Cola* pendant les projections d'un film dans un cinéma augmentait considérablement l'achat de ces produits. Des psychologues reproduisirent l'expérience, mais toujours sans succès. En 1962, le publicitaire avoua la supercherie, menée à des fins commerciales. Malgré la confession de la fraude, cette

histoire a marqué beaucoup d'esprits, qui associent, à tort, perception inconsciente et manipulation.

Jusqu'aux années 1950-1960, pour beaucoup, tout était encore simple : les notions de perception et de conscience étaient intrinsèquement liées. Autrement dit, toute perception, visuelle ou auditive, était nécessairement consciente. Le psychologue Norman Dixon, de l'Université de Londres, formulait ainsi cette opinion très répandue : « Quand les lumières ou les bruits deviennent trop faibles, je cesse d'être conscient de leur existence. Pour moi, ils n'existent pas. S'ils n'existent pas, ils ne peuvent pas m'influencer. » Ces affirmations ont été remises en cause quand, dans les

le cerveau peut percevoir, et même être influencé par des événements qui, pour l'esprit, restent non conscients. Au volant d'une voiture par exemple, vous percevez une multitude d'informations dont vous n'avez pas conscience, mais qui sont cruciales pour la conduite. Vous ne faites pas attention au piéton sur le trottoir, tandis que s'il ébauchait un pas pour traverser la route, vous freineriez aussitôt.

Les grands-pères du non conscient

L'idée selon laquelle nous pouvons être influencés par des événements dont nous ne sommes pas conscients a émergé en 400 avant notre ère, avec Démocrite, Platon et Aristote ; puis Montaigne l'a aussi évoquée 20 siècles plus tard. De tous les philosophes qui ont fait allusion à la perception non consciente, aucun n'a été plus explicite que Gottfried Leibniz qui, en 1704, écrit dans son *Essai sur l'entendement humain*, que « des centaines d'indications nous permettent de conclure qu'à chaque moment existe en nous une infinité de perceptions, non accompagnées par la conscience [...] ».

L'hypothèse d'une vie mentale non consciente a une histoire bien antérieure aux théories de Sigmund Freud. Le physiologiste allemand Hermann Helmholtz a, en 1867, défendu l'idée que la perception est déterminée en grande partie par des déductions non conscientes qui reposent sur la connaissance du monde et sur la mémoire des expériences passées. Par exemple, dans



années 1950-1960, la communauté scientifique a commencé à s'intéresser aux mécanismes du langage, de la mémoire, des émotions et de la perception, qui étaient jusque-là jugés hors du champ de leurs recherches. En outre, les méthodes expérimentales ne cessaient de progresser et aujourd'hui, on sait que

un zoo, il suffit d'entrevoir le bout d'une trompe pour reconnaître un éléphant. Dans les années 1950, Jerome Bruner, psychologue de l'Université de New York, et ses contemporains, ont élaboré la théorie *New Look* et trouvé des arguments en faveur de la perception subliminale. Ils ont montré, par exemple, que ce que nous voyons dépend non seulement de ce qui existe réellement, mais aussi d'autres facteurs personnels, tels les motivations et les attentes. Dans une de leurs expériences, ils ont présenté des mots ou des objets très rapidement par une technique de masquage (voir la figure 2). Le sujet est placé devant un écran d'ordinateur, qui affiche une image composée de lignes entremêlées : c'est un masque. Puis, l'écran présente une autre image très rapidement, le stimulus, puis réapparaît le même masque qu'au début de l'expérience. Si l'image-stimulus est affichée suffisamment rapidement, le sujet ne la détecte pas. Il n'a même pas conscience qu'une autre image que le masque lui a été présentée. À mesure que la durée d'affichage à l'écran augmente, le sujet devient capable de détecter l'image, puis de la reconnaître. En mesurant la durée minimum d'exposition d'un stimulus pour qu'il soit reconnu, ou le temps de réponse

du sujet, Jerome Bruner et ses collègues ont découvert que les mots tabous sont plus difficiles à percevoir que les mots neutres, car l'anxiété provoquée par le mot tabou entraîne la mise en place d'un mécanisme de défense qui interfère avec la perception consciente du mot tabou.

Les mesures des durées expérimentales gagnent en précision depuis les années 1960. Avec l'encéphalogramme, les neurophysiologistes enregistrent aussi l'activité électrique du cerveau des sujets pendant les expériences. Aujourd'hui, ils disposent d'appareils encore plus élaborés, comme l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. La perception subliminale a gagné en crédit grâce à ces progrès. C'est une perception non consciente, où le sujet dit ne pas avoir conscience de l'existence de stimulus, qui, pourtant, modifie son comportement. On ne peut détecter la perception subliminale, par définition non consciente, qu'en observant ses conséquences sur le comportement.

De nombreux psychologues ou biologistes n'acceptent guère que l'homme puisse être influencé par des signaux qu'il ne perçoit pas consciemment. Cet acharnement n'est pas

sans rappeler le scepticisme des théoriciens qui défendaient l'idée que la Terre était plate face aux tenants d'une Terre ronde ! De nombreuses expériences montrent pourtant sans ambiguïté l'existence de la perception subliminale. L'une des plus frappantes a été menée par Lawrence Weiskrantz, de l'Université d'Oxford, en 1997. Il a étudié des personnes, qui, à la suite d'un accident vasculaire cérébral, sont incapables de voir dans une zone déterminée de leur champ visuel ; du moins n'ont-ils pas conscience d'y percevoir quoi que ce soit. Pourtant, ces personnes répondent, dans certaines conditions, à des stimulus présentés dans la partie aveugle de leur champ visuel. Par exemple, on leur demande de pointer du doigt l'emplacement d'un stimulus lumineux qui apparaît n'importe où devant eux. À chaque fois que le point lumineux s'allume, ils le montrent du doigt... et ils y parviennent même quand le point est situé dans la partie aveugle.

1. POLEMIQUES : Cette image, *RATS* (même signification qu'en français), a fait scandale aux États-Unis lors de la dernière campagne présidentielle. Elle est extraite d'une publicité en faveur de George Bush, où elle apparaissait juste au moment où il évoquait les démocrates et si rapidement qu'elle était imperceptible pour les téléspectateurs... Tentative de manipulation mentale ? Ce scandale a eu un précédent en France. En mai 1988, en pleine campagne présidentielle, l'opposition a dénoncé la présence d'une image subliminale de François Mitterrand dans un générique sur une chaîne publique (*dans le «2» de «a2»*). Durant les campagnes électorales, la tentation de manipuler les foules est grande. La suspicion est au moins aussi forte. Pourtant, les psychologues sont catégoriques : ces images peuvent exercer un effet subliminal, mais d'une durée inférieure à 200 millisecondes. Pas le temps de se rendre aux urnes !



L'apport de la psychologie expérimentale

La méthode la plus utilisée pour montrer qu'un mot, un objet ou un nombre, non détecté ou non identifié, a une influence sur notre comportement est la méthode de dissociation, utilisée en psychologie expérimentale. Elle se déroule en deux temps. D'abord, on montre que le stimulus, présenté par la technique de masquage classique, est impossible à détecter : à la question «Avez-vous vu quelque chose?», les sujets répondent oui ou non au hasard ; ou encore, à la question «Nous vous avons montré quelque chose, de quoi s'agit-il?», presque personne n'identifie correctement l'objet. Dans un second temps, on montre que ces stimulus influent sur les performances, c'est-à-dire sur les temps de lecture ou de reconnaissance d'un objet, par exemple. On sait qu'il y a perception subliminale quand le sujet dit ne pas avoir détecté ou identifié le stimulus, mais que ce même stimulus modifie son comportement.

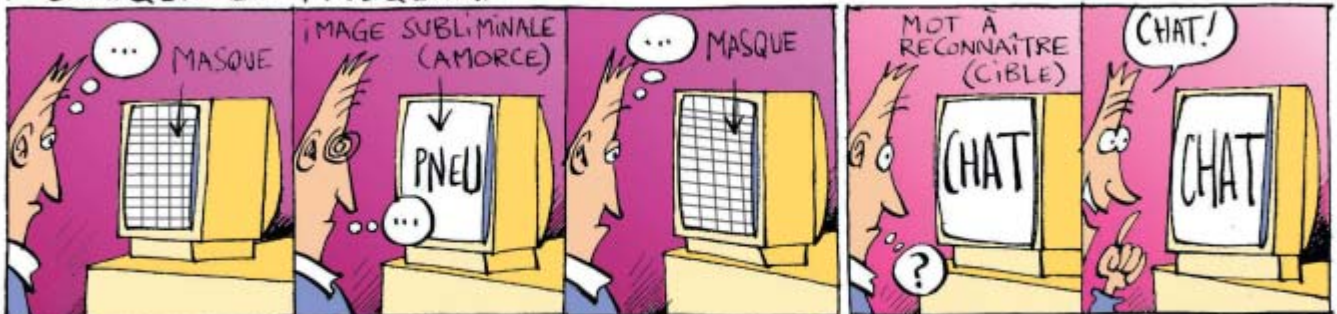
Comment s'assurer d'abord que le stimulus est invisible? Elliott Hirshman et Richard Durante, de l'Université de Caroline du Nord, ont demandé à des sujets, en 1992, d'identifier un stimulus, en l'occurrence un mot, affiché sur un écran pendant un temps très court par la technique de masquage. Les durées d'affichage du mot à identifier

variaient : 33, 50, 66, 83, 110, 116 et 500 millisecondes. Pour les durées supérieures ou égales à 116 millisecondes, la proportion d'identification correcte atteint 100 pour cent : le mot est détecté et identifié par tous, et la perception n'est pas subliminale. Le pourcentage d'identification correcte décroît avec la durée d'affichage. Ainsi, pour la durée la plus courte (33 millisecondes), le pourcentage d'identification correct est très faible : on obtient seulement six pour cent de bonnes réponses, qui attestent que la perception est toujours consciente pour certains. Ainsi, il existe un seuil, propre à chacun, au-dessus duquel le sujet perçoit consciemment les signaux et au-dessous duquel il n'est plus capable de détecter ou d'identifier un stimulus. Par exemple, quand on affiche une image moins de 33 millisecondes, après un masque resté longtemps à l'écran (0,5 seconde), il est quasiment impossible de la détecter. En revanche, en l'absence de masque, une image affichée sur un écran blanc pendant seulement 10 millisecondes peut être détectée et identifiée consciemment. Le seuil dépend de la méthode utilisée, par exemple de la durée d'affichage du masque qui précède le stimulus. Par ailleurs, quand on réduit la luminosité ou le contraste de l'image, on trouve aussi qu'en deçà d'un seuil de visibilité, l'identification d'une image devient impossible.

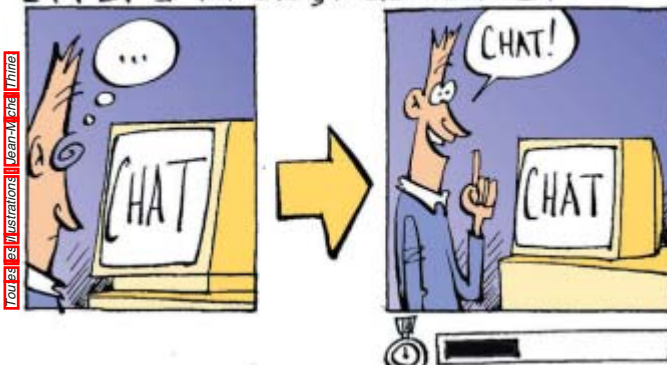
Que voyons-nous lorsqu'une image est présentée très rapidement? Quelles informations pouvons-nous extraire? Dans le cas où le stimulus présenté est un mot, les informations activées peuvent être de nature visuelle (le mot est long ou court, les lettres qui le composent sont hautes et ressemblent à des l, des t, plutôt qu'à des p et g, par exemple) ; orthographique (le mot se compose de telle et telle lettres) ; phonologique (le mot se rapporte à tel son) ; morphologique (le mot appartient à telle famille) ou encore sémantique (le mot a tel sens). Les informations visuelles sont de nature sensorielle, tandis que toutes les autres, orthographiques, phonologiques, etc., sont de nature linguistique, c'est-à-dire qu'elles sont traitées à des niveaux supérieurs, où sont analysées les propriétés abstraites.

E. Hirshman et R. Durante ont analysé les 94 pour cent de mauvaises réponses de l'expérience décrite précédemment pour déterminer la quantité d'informations que nous pouvons extraire d'un mot affiché 33 millisecondes. Dans 86 pour cent des cas, les sujets ne donnent aucune réponse, ou alors au hasard ; dans 13 pour cent des cas, les sujets trouvent quelques lettres correctes du mot, mais se trompent sur les autres ; et dans un pour cent des cas, le sujet donne une caractéristique correcte du mot, c'est-à-dire qu'il décrit

TECHNIQUE DE MASQUAGE



EFFET D'AMORÇAGE DIRECT



2. LA TECHNIQUE D'AMORÇAGE AVEC MASQUAGE est utilisée pour étudier la perception subliminale. Un sujet est placé devant un écran qui affiche une image, où des lignes s'entremêlent. Cette image est nommée le masque et reste à l'écran 0,5 seconde. Une autre image, un mot tel *PNEU* par exemple, y est intercalée très rapidement. Quand sa durée d'affichage est très brève (inférieure à 30 millisecondes), le sujet ne l'identifie pas, il ne la détecte même pas. Plus sa durée d'affichage s'allonge, plus le sujet a des chances d'identifier le mot : sa perception devient consciente. Quand le sujet ne détecte pas ou n'identifie pas le mot, il le perçoit cependant parfois de façon non consciente. Cette perception subliminale influe sur son comportement. Pour le montrer, les expérimentateurs soumettent au sujet, d'abord un masque, puis un mot (nommé amorçe) présenté si brièvement que le sujet ne le détecte

sa taille, ou la forme des lettres, etc., sans erreur. Même quand le sujet n'identifie pas le mot, il est toutefois capable, dans certains cas, d'en extraire quelques informations. Ces informations sont limitées, et portent exclusivement sur les propriétés, dites de surface, de ce mot : quelques lettres ou des caractéristiques, telle sa forme ou sa longueur.

Quelles sont en revanche les informations qu'il est capable d'extraire de manière non consciente? Pour déterminer la nature des informations activées par un stimulus subliminal, il est nécessaire d'utiliser une procédure indirecte de mesure, fondée sur la méthode de dissociation. On étudie l'impact d'une image subliminale sur le temps de reconnaissance d'un objet présenté à la suite de cette image subliminale. En pratique, on place le sujet devant un écran où l'on affiche un masque, puis très rapidement, de façon subliminale, un objet dit «amorce», puis, de nouveau, le masque, et, enfin, un second objet, la cible, présenté assez longtemps pour qu'il soit perçu consciemment. On demande au sujet d'appuyer sur un bouton-poussoir, aussitôt qu'il a reconnu l'objet. On mesure avec précision les temps de réponse, obtenus pour différentes amorces. Certaines amorces appartiennent au même registre orthographique que la cible, d'autres au même registre phonologique, etc. Une amorce-contrôle, qui

n'a rien en commun avec la cible à reconnaître, fournit la durée de référence. On étudie ainsi l'impact d'une amorce subliminale : on détermine si elle facilite la reconnaissance de la cible en rendant sa représentation plus accessible. Si c'est le cas, l'amorce et la cible partagent une propriété que le cerveau peut extraire d'une perception subliminale. Par exemple, afin de mettre en évidence l'effet d'amorçage subliminal, on compare le temps que met le sujet à reconnaître *CHAT* quand l'amorce a été *char* (cas de mots similaires du point de vue orthographique) par rapport au cas où *CHAT* est précédé par un item contrôle avec lequel il ne partage aucune propriété, par exemple, *pneu*. Nous avons ainsi montré qu'il existe un effet d'amorçage pour des propriétés orthographiques, par exemple (*aveu-AVEC*), phonologiques, comme (*camp-QUAND*) et aussi morphologiques (*mural-MURET*).

Des effets d'amorçage sont également obtenus quand l'amorce subliminale est un mot et la cible à reconnaître un dessin. Par exemple, l'amorce subliminale du nom *roue* facilite la dénomination ultérieure du dessin d'une roue, qui est alors la cible. De même, quand le mot-amorce (par exemple *roux*), se prononce de la même façon que l'objet-cible (une roue), il facilite la dénomination du dessin. Le processus de dénomination

est accéléré quand la forme phonologique correspond au nom de l'objet à identifier.

Influence négative

Une méthode indirecte a été proposée par Philip Merikle et ses collègues de l'Université de Waterloo, en 1995. Ils ont demandé aux sujets de ne pas utiliser l'information issue du premier stimulus-amorce pour formuler leur réponse. Dans leurs expériences, un premier mot, par exemple *cage*, est affiché avec des durées variables de sorte qu'on le reconnaît plus ou moins bien. Ce premier mot est suivi par une séquence de lettres à compléter, par exemple, la séquence *ca_ _* ; elle peut donner lieu aux mots *café, case, cape, cale*, etc. La seule contrainte imposée aux sujets est de ne pas reproduire le mot-amorce présenté initialement. Ainsi, une réponse telle que *cape* ou *cale* est une bonne réponse, tandis que la réponse *cage* est une mauvaise réponse. Les résultats montrent que lorsque le premier mot, *cage*, est présenté pendant une durée relativement longue, par exemple 200 millisecondes, les sujets respectent bien cette consigne et donnent uniquement les bonnes réponses. Leur perception reste consciente. En revanche, lorsque *cage* est affiché beaucoup plus brièvement (entre 43 millisecondes et 57 millisecondes), les sujets ont tendance à compléter le fragment

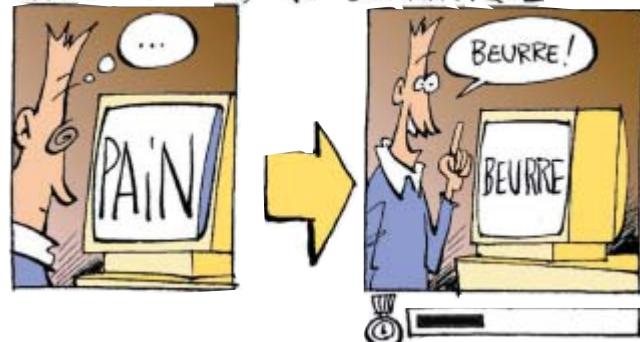
EFFET D'AMORÇAGE ORTHOGRAPHIQUE



EFFET D'AMORÇAGE MORPHOLOGIQUE



EFFET D'AMORÇAGE SÉMANTIQUE



pas, puis de nouveau le masque, puis un mot nommé cible, ici *CHAT*. Le sujet appuie sur un bouton dès qu'il identifie le mot cible et les expérimentateurs mesurent le temps qu'il a mis à le reconnaître. Quand le mot amorce affiché très brièvement est identique au mot cible, ici *CHAT*, la durée de reconnaissance diminue. Cela signifie que le sujet a perçu subliminalement le mot amorce et que cela l'a aidé à reconnaître le mot cible plus rapidement. L'amorce subliminale exerce un effet dit d'amorçage direct. Même quand le mot amorce est différent du mot cible, il exerce une influence et raccourcit le délai d'identification. Cela se produit quand les deux mots partagent une propriété susceptible d'être perçue subliminalement : orthographique, le mot *AVEU* facilite la reconnaissance de *AVEC* ; morphologique, tels *MURAL* et *MURET*, ou même sémantique : quand l'amorce est *PAIN*, le sujet identifie plus vite le mot *BEURRE*!

en reproduisant ce premier mot, *cage*, et donc à transgresser la consigne : ils donnent une réponse incorrecte. Ils ont été influencés négativement par la présentation préalable du premier mot *cage*. Ce mot n'est pas perçu consciemment, donc les sujets ne peuvent pas le rayer de leur liste des mots possibles. De surcroît, il sert d'amorce, de sorte que les sujets transgressent davantage la consigne. Ces sujets se trompent plus que d'autres, à qui l'on a demandé de compléter le fragment *ca_ _*, sans que l'amorce subliminale *cage* ait été initialement présentée (condition contrôle). Cette étude met en évidence l'influence non consciente des images subliminales.

Manipulation subliminale

Les influences subliminales que nous venons de décrire sont de très courte durée. En effet, prenons une situation très simple, celle de la répétition, c'est-à-dire quand l'amorce subliminale est constituée par un mot en lettres minuscules, et la cible par le même mot, en lettres majuscules et de taille supérieure (par exemple, *table*-*TABLE*). Quand la cible est affichée trop longtemps après l'amorce, l'effet d'amorçage s'estompe très rapidement. Dès que cet intervalle est supérieur à 150 millisecondes, l'effet disparaît, et ce, même si l'amorce a été affichée plusieurs fois auparavant. Voilà qui tord le cou aux polémiques sur l'influence de la publicité subliminale.

Le consommateur, ou l'électeur, devrait se précipiter en moins de 150 millisecondes devant des rayonnages, ou dans un isoloir, pour que l'effet d'un message subliminal puisse agir. Les manipulations mentales par des messages subliminaux sont, en pratique, impossibles.

Les activations subliminales que nous avons décrites font intervenir des similitudes orthographiques, phonologiques ou morphologiques des mots, mais dans quelle mesure est-il possible de mettre en évidence une activation des propriétés sémantiques? Autrement dit, est-ce que l'information sémantique d'un mot peut être récupérée dans des conditions subliminales? Peut-elle modifier nos performances de traitement sans que nous soyons conscients de la présence même de cette information?

La réponse est oui. En 1983, Tony Marcel, de l'Université de Cambridge en Grande-Bretagne, a obtenu un effet d'amorçage sémantique non conscient. Tout d'abord, afin de mesurer la visibilité de l'amorce, il a demandé aux sujets de juger de la présence ou de l'absence d'une amorce. Il a déterminé, pour chaque sujet, la durée de présentation de l'amorce pour laquelle ils étaient incapables de décider de la présence ou de l'absence de l'amorce (détermination du seuil de chacun des sujets). Il a ensuite choisi des durées telles que les sujets répondent un peu mieux qu'au hasard (60 pour cent de leurs réponses étaient correctes, au lieu de 50 pour cent s'ils avaient répondu au hasard) ; cette durée

variait de 20 à 110 millisecondes selon les sujets. Pendant l'expérience, il présentait différents mots d'amorçage aux sujets, et mesurait le temps de reconnaissance du mot cible, par exemple, le mot *BEURRE*. Le temps est plus court pour des paires associées sémantiquement - *pain*-*BEURRE* - que pour des paires qui ne le sont pas - *infirmière*-*BEURRE*. Cette expérience a mis en évidence un effet d'amorçage sémantique. Les sujets ne pouvant pas détecter la présence ou l'absence d'une amorce, cet effet d'amorçage suggère fortement une activation sémantique subliminale.

D'autres expériences ont confirmé l'activation sémantique subliminale. Par exemple, dans une expérience de E. Hirshman et R. Durante en 1992, la tâche des sujets est de décider le plus rapidement possible, et sans se tromper, si la cible est le mot *LION* ou non. Les sujets fixent le centre d'un écran et voient la séquence suivante : une suite de signes +++++ affichés pendant 1,5 seconde, puis une amorce présentée pendant 33 millisecondes ou 500 millisecondes, puis un masque composé de XXXXX, et enfin, la cible qui reste affichée à l'écran jusqu'à ce que le sujet réponde. La durée de présentation de l'amorce de 500 millisecondes constitue une condition contrôle (non subliminale), pour laquelle 100 pour cent des amorces sont identifiées correctement. Les amorces subliminales sont reliées sémantiquement aux mots cibles -*tigre*-*LION* -, ou non -*table*-*LION*. Le temps d'identification de *LION* diminue lorsque l'amorce est *tigre* par rapport à l'amorce *table*. Dans aucun des cas, les sujets n'identifient consciemment l'amorce. Ces résultats montrent sans équivoque un effet d'amorçage sémantique subliminal, dont la durée de vie est aussi extrêmement courte : cet effet s'efface au bout d'environ 100 millisecondes.

D'autres travaux ont également montré l'activation sémantique subliminale dans la perception des objets. En particulier, Roberto Dell'Acqua, de l'Université de Padoue, et Jonathan Grainger, de l'Université d'Aix-en-Provence, ont présenté aux sujets, dans une de leurs expériences, des cibles qui sont des dessins d'objets, précédés par un dessin amorce subliminal qui représente le même objet que la cible, par exemple, *lion*-*LION*, ou qui appartient à la même catégorie

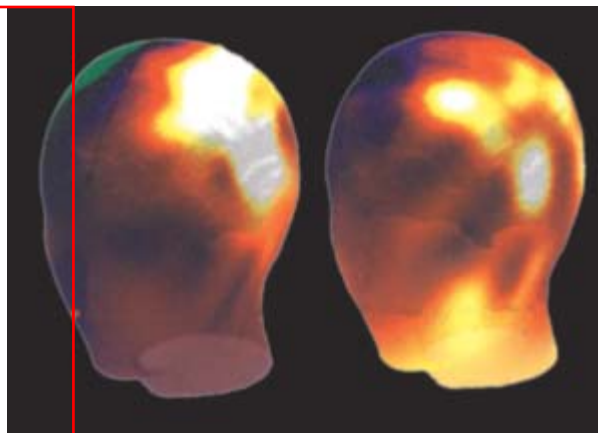


sémantique, par exemple *éléphant-LION*, ou encore à une catégorie sémantique différente, telle *vélo-LION*. La tâche des sujets est, soit de dénommer les objets représentés par le dessin cible, soit de les classer dans deux catégories : vivant ou manufacturé. Lorsque le dessin amorce appartient à la même catégorie sémantique que le dessin cible (*éléphant-LION*), les réponses sont plus rapides que lorsque le dessin amorce n'appartient pas à la même catégorie sémantique (*vélo-LION*). Par ailleurs, les performances sont identiques, quand l'amorce appartient à la même catégorie sémantique (*éléphant-LION*) ou quand elle est identique à la cible (*lion-LION*).

Cela suggère que l'activation sémantique subliminale ne considère pas les détails. Après cette expérience, les expérimentateurs ont demandé aux mêmes sujets de classer, cette fois, les amorces subliminales (vivant ou manufacturé) et ils ont vérifié que les sujets répondent au hasard ; autrement dit, ils sont incapables d'identifier de façon consciente les amorces, alors qu'elles influent sur leurs performances.

Imagerie cérébrale

Dans une expérience récente, Stanislas Dehaene du Service hospitalier Frédéric Joliot du CEA à Orsay et ses collègues ont abordé le problème de la perception subliminale en utilisant une tâche de comparaison de nombres. Dans cette expérience, on présente des chiffres à des sujets, qui doivent décider, le plus rapidement possible, si le nombre-cible présenté est plus grand ou plus petit que 5. S'il est plus petit, ils doivent appuyer sur un bouton situé à gauche de l'écran, et s'il est plus grand, sur un autre, à droite. Avant la présentation de ce nombre, et sans que le sujet n'en soit averti, on présente une amorce subliminale. Par exemple, la cible 7 peut être précédée par l'amorce 9 (l'essai est dit congruent, car 9 et 7 sont tous les deux plus grands que 5), ou encore par l'amorce 3 (l'essai est dit non-congruent, car, contrairement à 7, 3 est plus petit que 5). Les temps de réponse sont plus courts pour les essais congruents que pour les essais non-congruents.



3. LES ZONES DU CERVEAU impliquées dans le traitement de l'information subliminale (à gauche) sont liées aux processus sensoriels, mais le cortex moteur, responsable de la commande des mouvements, intervient aussi (zone blanche à gauche), comme le montrent ces clichés d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, obtenus par S. Dehaene du Service hospitalier Frédéric Joliot du CEA à Orsay et ses collègues. Les zones activées sont comparables à celles impliquées lors du traitement de l'information consciente (à droite).

L'analyse de l'activité cérébrale par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, sensible aux variations de débit sanguin cérébral dues à une action mentale, indique, par ailleurs, que la présentation du stimulus non perçu consciemment suscite une activation de la région qui commande la main donnant la réponse (voir la figure 3). Ainsi, si le nombre présenté est 3, la commande de la main gauche est activée, puisqu'elle est associée à la réponse «plus petit». Un tel résultat indique que l'amorce elle-même a été classée comme étant supérieure ou inférieure à 5. On conçoit que les temps de réponse soient supérieurs dans les cas des essais non-congruents : l'amorce est, par exemple, inférieure à 5 de sorte que la main gauche est «pré-

activée». Puis vient une signal contradictoire puisque la cible est supérieure à 5. La préactivation doit être inhibée et la main droite activée. Dans ces conditions de conflit entre l'amorce et la cible, les temps de réaction s'allongent.

Les résultats sont identiques que les stimulus soient des nombres ou des mots, par exemple, neuf et ensuite sept, ou une combinaison telle que neuf et ensuite 7. Le cerveau classe les chiffres selon leur valeur, soit selon leur «signification» en quelque sorte. L'effet observé constitue donc une démonstration de perception subliminale de nature sémantique.

Ces travaux expérimentaux sont destinés à mettre à l'épreuve l'hypothèse de la perception subliminale. Ils portent sur le traitement des propriétés formelles (visuelles, orthographiques, phonologiques...) et sémantiques des stimulus (mots, objets, nombres). La convergence des résultats obtenus à l'aide de nombreuses procédures expérimentales étaye le phénomène de la perception subliminale. Ces découvertes ont été rendues possibles grâce à l'amélioration de la méthodologie en psychologie cognitive, mais les interprétations théoriques restent à élaborer. La multiplicité des recherches actuelles, conduites aussi bien en Europe qu'aux États-Unis, montre combien psychologues et neurobiologistes veulent élucider les mécanismes cérébraux de ce phénomène étonnant.

Ludovic FERRAND mène des recherches au Laboratoire de Psychologie Expérimentale (UMR 8581), CNRS et Université René Descartes, dirigé par Juan SEGUI.

BAARS B. (1997). *In the theater of consciousness: The workspace of the mind*. New York : Oxford University Press.

CHANNOUF A. (2000). *Les images subliminales*, Paris : Presses Universitaires de France.

DEHAENE S. et al. (1998). *Imaging unconscious semantic priming*, *Nature*, 385 (8 octobre), 597-600.

DIXON N. (1981). *Preconscious processing*, New York : Wiley.

DELL'ACQUA R., & GRAINGER J. (1999).

Unconscious semantic priming from pictures, *Cognition*, 73, B1-B15.

FERRAND L., Grainger J., & Segui J. (1994). *A study of masked form priming in picture and word naming*, *Memory & Cognition*, 22, 421-441.

KIHLSTROM J. (1987). *The cognitive unconscious*. *Science*, 237 (septembre), 1445-1452.

MERIKLE P., JOORDENS S., & STOLZ, J. (1995). *Measuring the relative magnitude of unconscious influences*, *Consciousness and Cognition*, 4, 422-439.

WEISKRANTZ L. (1997). *Consciousness lost and found : A neuropsychological exploration*, Oxford, UK : Oxford University Press.

Les secrets des poussières d'étoiles

J. MAYO GREENBERG

De minuscules grains de poussière flottent dans l'espace interstellaire : ils ont eu une influence notable sur l'évolution de la Galaxie.

Anglo-Australian Observatory / Royal Observatory, Edinburgh



1. LA NEBULEUSE DE LA TETE DE CHEVAL (*à droite*) est un immense nuage de poussières et de gaz situé dans la constellation d'Orion, à environ 1 000 années-lumière de la Terre. L'étoile brillante (*à gauche*) est Zêta Orionis, l'étoile la plus orientale de la ceinture d'Orion.

Regardez le ciel par une nuit claire et observez la Voie Lactée, ce voile laiteux formé des milliards d'étoiles de notre Galaxie : dans certaines zones, vous verrez des taches sombres. Selon William Herschel, astronome anglais du XVIII^e siècle, ces taches étaient des «trous» dans le ciel, c'est-à-dire des zones vides. Puis, au début du XX^e siècle, les astronomes ont découvert que ces taches obscures étaient d'énormes nuages de poussières qui interceptent la lumière des étoiles situées derrière eux. Les particules de cette poussière cosmique sont minuscules : leur diamètre est de l'ordre du centième de celui des particules qui s'accumulent sur les meubles. Pourtant, cette poussière a eu une influence notable sur l'évolution de la Galaxie et sur la formation des étoiles dans l'Univers.

Jusque vers 1950, de nombreux astronomes ne voyaient dans cette poussière qu'un obstacle à l'observation des étoiles lointaines. Au contraire, depuis quelques années, ces grains de matière interstellaire sont étudiés assidûment à l'aide de télescopes terrestres ou spatiaux : grâce aux données ainsi recueillies, les astronomes ont décrit l'évolution de cette poussière d'étoiles. Comment est-elle apparue ? De quoi est-elle formée ? Comment évolue-t-elle ? Avec Aigen Li, aujourd'hui à l'Université de Princeton, nous avons élaboré une théorie, nommée modèle unifié de la poussière, qui, même si elle n'est pas encore validée, explique les récentes observations.



VOIE LACTÉE : OBSERVATION SPATIALE

Dans la Voie Lactée, les nuages de poussières sont concentrés dans le plan de la Galaxie, surtout le long des bords internes de ses bras spiraux. Dans ces zones hétérogènes, les étoiles forment des amas denses dispersés parmi des nuages de poussières. Ces derniers absorbent davantage les longueurs d'ondes bleues et ultraviolettes de la lumière stellaire que les rouges et les infrarouges. Aussi, quand les astronomes observent des étoiles à travers la poussière, elles apparaissent plus rouges qu'elles ne le sont en réalité. De même, le Soleil est plus rouge quand il est proche de l'horizon, car les poussières et le gaz de l'atmosphère terrestre dispersent sa lumière.

Rencontre des trois types

On a étudié comment l'intensité lumineuse diminue en fonction de la longueur d'onde et des substances traversées et l'on en a déduit qu'il existe trois types de grains de poussière. Les plus gros sont allongés, ils ont un diamètre de l'ordre de 0,2 micromètre et une longueur double, c'est-à-dire qu'ils sont de la taille des particules de la fumée de cigarette. Ces particules, qui arrêtent la lumière visible, représentent environ 80 pour cent de la masse totale des poussières interstellaires. Chaque grain comporte un noyau «rocheux», entouré d'un manteau de matériau organique et de glace (voir la figure 3).

Sur la courbe d'extinction, on observe un pic d'absorption dans l'ultraviolet, qui correspond à la présence de grains plus petits. Ils ont un diamètre de l'ordre de 0,005 micromètre et constituent 10 pour cent de la masse totale des poussières. Ces grains sont sans doute constitués de carbone amorphe et d'hydrogène, mais sont vraisemblablement dépourvus d'azote et d'oxygène.

Enfin, les particules du troisième type, qui composent encore 10 pour cent de la masse des poussières cosmiques, sont encore plus petites (0,002 micromètre de diamètre) : elles interceptent l'ultraviolet lointain. Ces grains seraient constitués de molécules proches des

2. LES NUAGES DE POUSSIÈRES, tels ceux de la nébuleuse de la Rosette sont des pouponnières d'étoiles. Les grains de poussière qu'ils contiennent empêchent le rayonnement d'y pénétrer et facilitent ainsi l'effondrement gravitationnel de ces nuages qui formeront les étoiles. Lors d'un tel effondrement, l'essentiel des poussières est éjecté vers des régions vides de l'espace.

hydrocarbures polycycliques aromatiques, présents dans les gaz d'échappement des automobiles.

Très éloignés des étoiles, ces grains de poussière sont extrêmement froids : leur température ne dépasse parfois pas cinq degrés au-dessus du zéro absolu, soit -268 °C. Dès les années 1940, l'astronome hollandais Henk van de Hulst a proposé une théorie, aujourd'hui surnommée le modèle de la glace sale, selon laquelle une partie des atomes présents dans l'espace interstellaire (l'hydrogène, l'oxygène, le carbone et l'azote) adhérerait à la surface froide des grains et formeraient des couches de glace d'eau, de méthane et d'ammoniaque.

Toutefois, ce n'est qu'au début des années 1970 que ce modèle a été confirmé. En étudiant les spectres infrarouges de la lumière stellaire traversant les nuages de poussière, les astrophysiciens ont détecté les raies d'absorption caractéristiques des silicates (constitués de silicium, de magnésium et de fer), qui composent le cœur des grains de poussière du premier type. À la même époque, ils ont également observé la raie d'absorption de l'eau gelée dans le spectre infrarouge. Ultérieurement, on a montré que ces grains contenaient du monoxyde et du dioxyde de carbone, du formaldéhyde et d'autres composés. Ces substances sont volatiles : elles gèlent au contact des grains de poussière froids, mais elles s'évaporent lorsque la poussière se réchauffe. À l'inverse, les substances qui constituent les noyaux des grains de poussière sont réfractaires : elles restent solides même aux températures élevées.

... poussière tu redeviendras

Les poussières interstellaires constituent environ un millième de la masse de la Voie Lactée, soit des centaines de fois la masse totale de toutes les planètes de la Galaxie ! Cependant, la densité de ces poussières est faible : en moyenne, on trouve un grain de poussière par million de mètres cube d'espace. Toutefois, même si la densité des poussières est faible, la lumière stellaire qui les traverse sur des milliers d'années-lumière finit par être partiellement absorbée. Pourquoi notre Galaxie est-elle si poussiéreuse ?

Au début de l'Univers, il y a environ 15 milliards d'années, la poussière n'existait pas. Comme toutes les autres galaxies, la Voie Lactée n'était qu'un mélange d'hydrogène, d'hélium et de

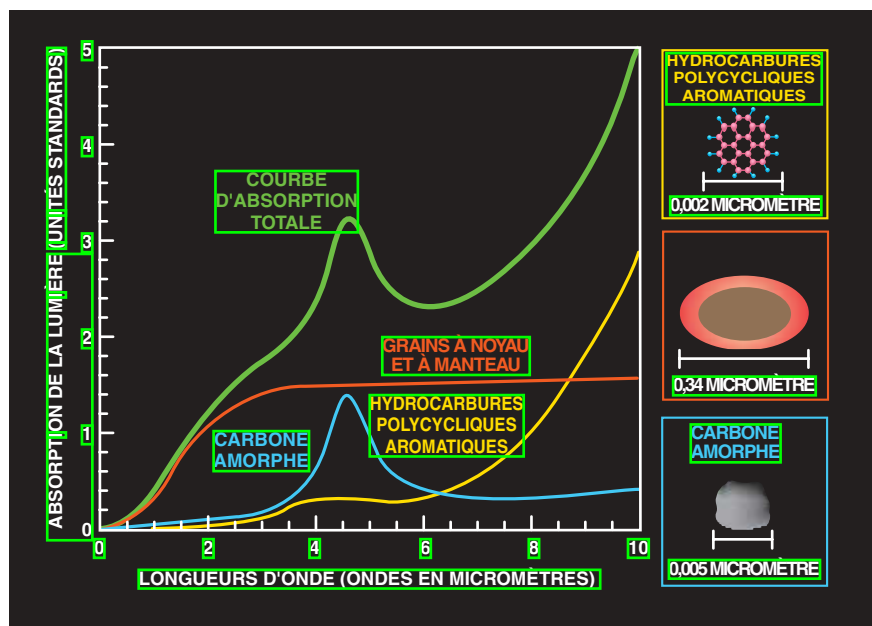
quelques éléments légers créés lors du Big Bang. Seuls les nuages d'hydrogène et d'hélium les plus massifs se contractaient pour former des étoiles, car les forces de gravitation devaient vaincre la pression liée à l'agitation des gaz. Ainsi, notre Galaxie était dominée par des étoiles géantes de types O et B, qui explosaient quelques millions d'années seulement après leur naissance, et se transformaient en supernovae.

En observant les galaxies primordiales à l'aide de télescopes dont les détecteurs sont sensibles aux longueurs d'onde inférieures à un millimètre, les astronomes ont montré que ces supernovae sont à l'origine des premières poussières. Cependant, la durée de vie de ces poussières dans le milieu interstellaire était très courte, car elles étaient rapidement détruites par les ondes de choc des supernovae ultérieures.

Au bout de quelque cinq milliards d'années, la tempête de supernovae se calma, et les étoiles un peu moins massives devinrent des géantes rouges. Tandis que ces étoiles refroidissaient et grossissaient, des particules de silicates se formèrent dans l'atmosphère de ces étoiles, puis furent expulsées dans l'espace interstellaire. Certaines de ces particules de silicates pénétrèrent dans les nuages de gaz moléculaire de ces étoiles : la température qui y régnait était très basse, et chaque atome ou molécule du gaz gela instantanément à la surface des grains de silicates, comme lorsque les gouttes de vapeur d'eau gèlent sur une vitre glacée ; un manteau de glace enveloppa ainsi chaque noyau de silicate.

A mesure que la poussière se concentrait dans les nuages moléculaires, la densité des grains augmentait jusqu'à atteindre des dizaines de milliers de fois celle qui régnait à l'extérieur des nuages. Épaisse, la couche de poussières empêcha le rayonnement de pénétrer dans les nuages : la température du gaz (et par conséquent sa pression) diminua encore, et la masse requise pour vaincre la pression du gaz fut moindre. Les nuages de gaz les plus petits se contractèrent donc et donnèrent naissance à de « petites » étoiles, tel notre Soleil. En réduisant les contraintes qu'impose la formation des étoiles, les poussières ont notablement modifié l'évolution de la Voie Lactée.

En outre, les poussières de notre Galaxie sont constamment recyclées. Quand un nuage dense de gaz et de



3. L'ABSORPTION DE LA LUMIÈRE provenant d'étoiles situées derrière les nuages de poussières peu denses montre qu'il existe trois types de particules : de gros grains qui ont un noyau recouvert d'un manteau de glace (en rouge), des particules contenant du carbone amorphe (en bleu), et des molécules qui ressemblent aux hydrocarbures polycycliques aromatiques (en vert).

poussières se contracte en une étoile, les grains de poussière les plus proches de la région de formation stellaire s'évaporent : tandis qu'une petite partie de ces grains de poussière est engloutie par l'étoile, ou se condense en planètes rocheuses et en astéroïdes, l'immense majorité est expulsée et forme des nuages moins denses. Dans cet environnement plus hostile, les manteaux glacés des grains de poussière cessent de s'épaissir et sont détruits ou érodés par le rayonnement ultraviolet, par les collisions de particules et par les fronts d'onde de choc des supernovae. Toutefois, le manteau n'est pas totalement retiré : sous la couche externe de glace se trouve un manteau sous-jacent, composé de matériaux organiques complexes qui recouvre le noyau de silicates.

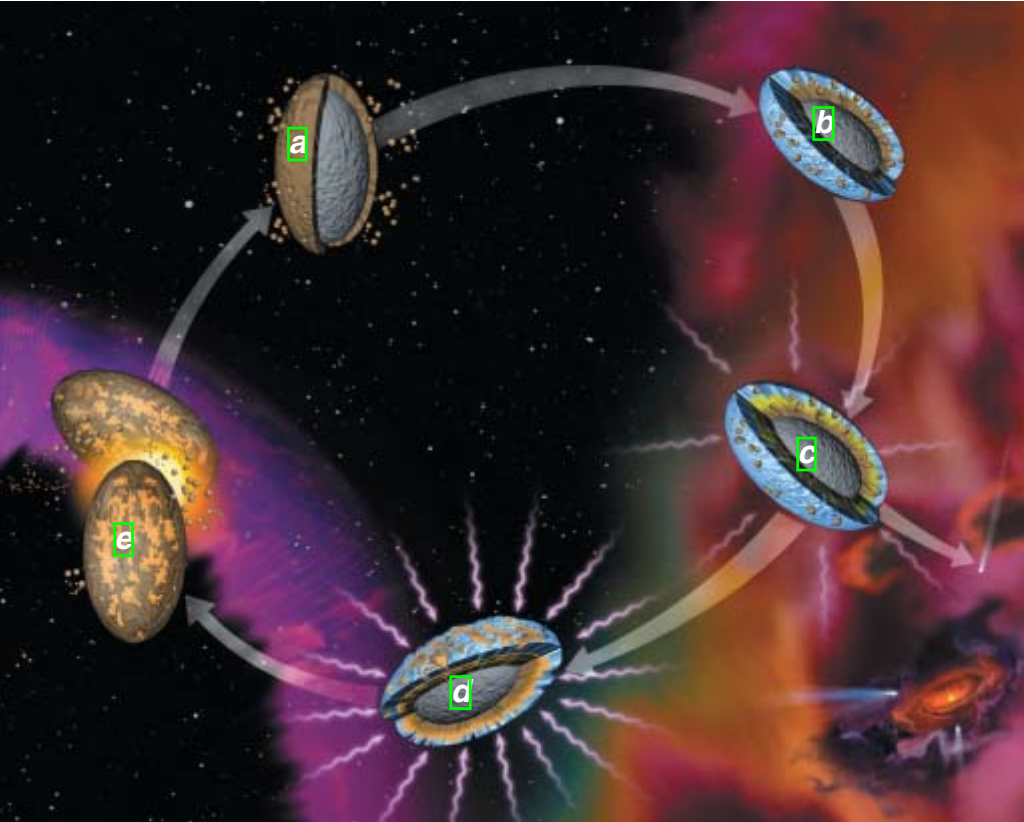
Il y a environ 30 ans, j'ai proposé l'existence de ce manteau organique pour justifier l'importance de l'atténuation de la luminosité par les poussières des nuages diffus, que les seuls silicates ne suffisaient pas à expliquer. J'ai postulé que la couche de matériau riche en carbone, à la surface des grains de poussière, résulte de réactions chimiques au sein du manteau de glace, qui commenceraient alors que le grain est encore dans le nuage dense de gaz moléculaires. Quand des photons ultraviolets énergétiques heurtent le manteau de glace, ils cassent les molécules

d'eau, de méthane et d'ammoniaque et libèrent des radicaux libres : ces derniers se recombinaient en molécules organiques tel le formaldéhyde. Une irradiation persistante par un rayonnement ultraviolet crée des composés plus complexes nommés composés organiques de première génération. Ceux-ci restent sur le noyau de silicate lorsque les grains de poussière quittent le nuage moléculaire et même lorsque le manteau de glace a été détruit. Le manteau de molécules organiques protège le noyau de silicates contre l'onde de choc des supernovae jusqu'à ce que les grains soient à nouveau à l'abri au sein d'un autre nuage de gaz dense.

Substance jaune, substance brune

Afin de tester cette hypothèse, nous avons soumis divers manteaux de glace (à -263°C) à un rayonnement ultraviolet, puis nous avons chauffé les mélanges. Nous avons obtenu une substance jaune qui contenait du glycérol, du glycéramide, plusieurs acides aminés, telles la glycine, la sérine et l'alanine, ainsi que de nombreuses autres molécules complexes.

Au même moment, les astrophysiciens ont détecté la présence de composés organiques complexes dans les poussières des nuages diffus alors qu'ils mesuraient l'absorption de la



4. LES GRAINS DE POUSSIÈRE INTERSTELLAIRE survivent à environ 50 cycles de 100 millions d'années, avant d'être détruits. Dans les nuages diffus, où le gaz est rare, les poussières sont soit de gros grains à noyau et à manteau, des particules carbonées amorphes ou des molécules d'hydrocarbures polycycliques aromatiques (a). Quand ces particules pénètrent dans un nuage de gaz dense, les atomes et les molécules de ce gaz adhèrent aux gros grains et forment un manteau extérieur de glace où se figent aussi des particules carbonées et des hydrocarbures polycycliques aromatiques de glace (b). Le rayonnement ultraviolet transforme le matériau au sein du manteau de glace (c), et crée une couche de composés organiques complexes, la « substance jaune ». Alors que le nuage se contracte et forme une étoile, certains des gros grains s'assemblent et constituent des noyaux de comète (à droite) ; la grande majorité des poussières est dispersée. À nouveau dans un nuage diffus, les gros grains sont exposés à un rayonnement ultraviolet plus intense qui entraîne l'évaporation du manteau de glace et des réactions entre molécules organiques ; la substance jaune brunit (d). Sous l'effet des ondes de choc libérées par les supernovae, les grains sont accélérés et se heurtent violemment (e), de sorte que les manteaux organiques se désagrègent. Les débris deviennent les particules carbonées et les hydrocarbures polycycliques aromatiques présents dans les nuages diffus.

lumière stellaire qui les traverse. Toutefois, nos résultats ne reproduisaient pas exactement les raies d'absorption dans le domaine infrarouge ! Cette différence n'était pas une surprise : dans les nuages diffus, les grains de poussière sont exposés à un rayonnement ultraviolet 10 000 fois plus intense que dans les nuages denses. Ce rayonnement transforme la matière des manteaux internes en composés organiques de seconde génération. Comment pouvait-on reproduire les effets de ce rayonnement en laboratoire ?

À la fin des années 1980, Gerda Horneck, de l'Agence spatiale allemande, nous a proposé d'utiliser un satellite destiné à exposer pendant longtemps des échantillons biologiques aux ultraviolets. Le dispositif était bien adapté à l'étude de notre « substance jaune », que nous avons envoyée en orbite grâce à la navette spatiale en 1992.

Nous avons récupéré nos échantillons après quatre mois d'exposition

aux ultraviolets : ce qui était parti jaune est revenu brun. Le changement de couleur indique un enrichissement en carbone. Au spectromètre infrarouge, nous avons trouvé que la substance brune a les mêmes raies d'absorption que celles enregistrées lors de nos observations des poussières interstellaires. Bien qu'exposé à un rayonnement dix fois moins intense qu'au sein des nuages diffus, notre échantillon avait toutes les caractéristiques des matériaux réfractaires organiques des poussières cosmiques.

Nous avons alors mis au point un modèle où les gros grains soumis au rayonnement ultraviolet donnent la quasi-totalité des petites particules carbonées amorphes et des hydrocarbures polycycliques aromatiques présents dans la poussière interstellaire.

Grâce à un spectromètre de masse, Seb Gillette, de l'Université de Stanford, a confirmé que cette substance brune est riche en hydrocarbures polycycliques aromatiques. Dans les nuages

de gaz diffus, les petites particules se détacheraient des manteaux organiques à chaque fois qu'une onde de choc de supernova fracasse les gros grains de poussière (voir la figure 4) : chacun d'eux libérerait des centaines de milliers de minuscules grains.

Enfin, la totalité des poussières est capturée par un nuage moléculaire dense à l'intérieur duquel les collisions entre les particules de poussière et les atomes et les molécules du gaz sont fréquentes : un million d'années plus tard, les plus gros des grains de poussière s'entourent d'un manteau d'eau et de monoxyde de carbone gelés. Les observations des poussières dans les nuages très denses qui entourent des étoiles ont indiqué la présence de ces composés, ainsi que de quantités plus faibles de dioxyde de carbone, de formaldéhyde et d'ammoniaque. Bien que personne n'ait jamais observé directement ce qu'il advient des particules carbonées ni des hydrocarbures polycycliques aromatiques dans un nuage moléculaire, il est vraisemblable qu'ils se fixent sur les grains de poussière les plus gros et qu'ils sont engloutis dans leurs manteaux de glace. Les molécules organiques sont alors à nouveau transformées par le rayonnement ultraviolet, et le cycle recommence.

D'autres astrophysiciens expliquent l'absorption de la lumière par les poussières interstellaires sans recourir aux manteaux organiques qui recouvrent les gros grains de poussière. Par exemple, selon John Mathis, de l'Université du Wisconsin, les gros grains de poussière sont des agrégats poreux de petites particules de graphite et de silicates. Cependant, ces modèles expliquent mal la polarisation de la lumière qui traverse les nuages, c'est-à-dire l'orientation des ondes électromagnétiques dans une direction donnée.

Pour un tel phénomène, trois conditions sont nécessaires : les gros grains de poussière sont cylindriques ou sphériques ; ils tournent autour de leur axe le plus court ; enfin leurs axes de rotation sont parallèles et orientés dans la même direction. Ce sont peut-être les champs magnétiques qui, dans le nuage de poussière, alignent ces axes de rotation. En postulant l'existence de particules pourvues d'un noyau et d'un manteau, notre modèle explique que la lumière qui traverse les nuages est polarisée quelles que soient les longueurs d'onde.

De la poussière aux comètes

Les comètes sont les reliques les plus intactes de la nébuleuse protosolaire, le nuage de gaz qui a donné naissance à notre système solaire. Chaque nouvelle découverte sur la composition chimique des comètes et de la poussière interstellaire confirme l'idée selon laquelle les comètes se sont formées à partir d'agrégats de poussière. Ainsi, l'observation des comètes est une source d'informations sur les poussières cosmiques.

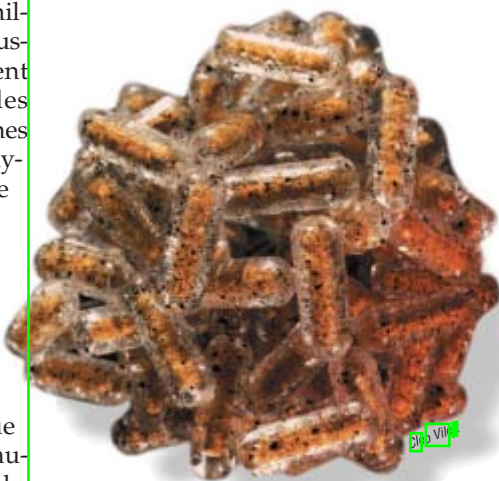
Quand le Soleil, les planètes et les comètes sont nés, il y a environ 4,6 milliards d'années, les gros grains de poussière du nuage protosolaire avaient sans doute déjà absorbé toutes les petites particules carbonées amorphes et les molécules d'hydrocarbures polycycliques aromatiques, ainsi que le monoxyde de carbone et les autres composés volatils. Seul l'hydrogène et l'hélium restaient libres. Les grains de poussière se heurtaient souvent et s'assemblaient en gros agrégats floconneux. Ces amas auraient ensuite évolué pour former le noyau des comètes. Chaque noyau serait poreux, contenant beaucoup d'espace vide. Dans mon modèle, le noyau d'une comète contient 100 grains de poussière protosolaire de taille moyenne, entassés pêle-mêle (voir la figure 5) : environ 80 pour cent de cet agrégat (de trois micromètres de diamètre) est vide.

Depuis leur naissance, les comètes circulent autour du Soleil dans les régions du nuage de Oort et de la ceinture de Kuiper, très loin des orbites des planètes. Toutefois, des perturbations gravitationnelles expédient parfois les comètes sur des orbites plus proches du Soleil. En 1986, les sondes spatiales Giotto et Vega 1 et 2 sont passées à proximité de la comète de Halley, qui s'approche du Soleil tous les 76 ans : elles transportaient des spectromètres qui ont mesuré la masse et la composition chimique des particules de la chevelure de Halley, du nuage de gaz et des poussières qui entourent son noyau.

En frappant les détecteurs à une vitesse de 80 kilomètres par seconde, les particules de poussière sont décomposées sous le choc. Les instruments ont mesuré un large éventail de masses pour les particules, par exemple 10^{-14} gramme pour les gros grains de pou-

sière et 10^{-18} gramme pour les petites particules carbonées.

Jochen Kissel, de l'Institut Max Planck de Garching, Franz Krueger, du bureau d'études Krueger, à Darmstadt, et Elmar Jessberger, de l'Université de Munster ont ensuite confirmé que la poussière de la comète de Halley est constituée d'agrégats de particules dont le noyau est constitué de silicates et le manteau de composés organiques réfractaires. Ils avaient en effet constaté que les atomes d'oxygène, de carbone et d'azote des manteaux organiques externes heurtaient les



5. CE MODELE DE POUSSIERE DE COMETE, élaboré par l'auteur, montre 100 gros grains qui forment un amas peu dense de trois micromètres de diamètre. Riche en composés organiques, ces agrégats ont peut-être été des germes de vie sur Terre.

détecteurs des sondes avant les atomes de silicium, de magnésium et de fer enfouis dans les noyaux.

Quel est l'âge de la poussière contenue dans la comète de Halley et dans les autres comètes ? Au moment de son aggrégation, la poussière avait environ cinq milliards d'années, le temps que passe un grain de poussière dans l'espace avant d'être englouti dans une étoile en formation. Par ailleurs, les comètes ont elles-mêmes 4,6 milliards d'années : leur poussière est probablement âgée de dix milliards d'années. Ainsi, les comètes nous donnent accès à la prime enfance de la Voie Lactée.

Les poussières des comètes ont peut-être aussi apporté la vie sur Terre, car chaque amas floconneux de poussières de comète contient de la matière organique. En outre, leur structure cavernueuse a peut-être favorisé les

réactions chimiques qui ont eu lieu après immersion dans l'eau. J. Kissel et F. Krueger ont montré que de petites molécules pénètrent facilement dans un amas, tandis que les grosses ne peuvent s'en échapper. Une telle structure aurait stimulé la synthèse de molécules plus grosses et plus complexes, et aurait joué le rôle d'incubateur des formes de vie les plus primitives. Une seule comète aurait pu déposer jusqu'à 10^{25} de ces «graines» de vie sur la Terre, alors qu'elle était toute jeune.

La NASA et l'Agence spatiale européenne préparent des missions d'étude des comètes et des poussières interstellaires. Le vaisseau *Stardust* (Poussière d'Étoiles) de la NASA, lancé en 2000, a un rendez-vous avec la comète Wild-2 en 2004 : de cette rencontre, il rapportera un échantillon des poussières de la chevelure de cette comète. Pendant son voyage, la sonde récoltera également des échantillons des poussières interstellaires du système solaire. La mission Rosetta de l'Agence spatiale européenne, à laquelle nous participons, est programmée pour 2003 : un vaisseau se placera en orbite autour de la comète Wirtanen, et enverra une sonde se poser à la surface de son corps poreux. Des instruments analyseront la structure physique et la composition chimique de la comète.

Ces missions spatiales feront sans doute passer les poussières cosmiques du statut de nuisance à un statut plus prestigieux. Aujourd'hui, on sait déjà qu'elles détiennent des informations sur la naissance des étoiles, des planètes et des comètes, et peut-être même sur l'origine de la vie.

J. MAYO GREENBERG dirige le Laboratoire d'astrophysique de l'Université de Leyde, aux Pays-Bas.

J. GREENBERG, *The Structure and evolution of Interstellar Grains*, in *Scientific American*, vol. 250, n° 6, pp. 124-135, juin 1984.

A. LI et J. GREENBERG, *A Unified Model of Interstellar Dust*, in *Astronomy and Astrophysics*, vol. 323, n° 2, pp. 566-584, 1997.

J. GREENBERG et C. SHEN, *Cosmic Dust in the 21st Century*, in *Astrophysics and Space Science*, vol. 269-270/1-4, pp. 33-35, 1999.

Les maladies de nos ancêtres

OLIVIER DUTOUR • YANN ARDAGNA

Les ossements anciens présentent parfois des lésions ou des déformations ; le paléopathologiste dépiste ces indices et en déduit, avec l'aide des documents anciens et de divers moyens modernes de diagnostic, les maladies en cause.

Les maladies de nos ancêtres sont étudiées par les spécialistes de la paléopathologie d'après les traces que les maladies ont laissées sur les ossements et d'après les documents anciens, que ce soit des textes ou d'autres documents archéologiques ; ces analyses révèlent qu'à de très rares exceptions près, nos ancêtres souffraient des mêmes maladies que l'homme d'aujourd'hui. Seule la fréquence de ces pathologies et leur évolution ont été modifiées, en raison de l'efficacité des traitements modernes. Les paléopathologistes reconnaissent sur ces vestiges du passé des maladies toujours actuelles, ou suffisamment récentes pour être identifiées. Ainsi, la paléopathologie est plus l'étude des maladies qui ont sévi par le passé que celle des maladies passées, lesquelles restent méconnues, car on en ignore les signes : le paléopathologiste est incapable de les déceler sur les vestiges analysés.

La paléopathologie est une science relativement récente ; elle prend racine durant le siècle des Lumières, et suivra les progrès des sciences médicales et archéologiques, qui se sont accélérés durant la première moitié du XX^e siècle. À la fin du XVIII^e et au début du XIX^e siècles, Esper, en Allemagne (1774), puis Cuvier, en France (1820), parlent pour la première fois de pathologie à propos d'ossements d'animaux. L'étude d'ossements humains anciens porteurs d'altérations pathologiques ne s'est véritablement développée qu'au cours du XIX^e siècle. L'américain Warren (1822), puis le français Gosse (1855) publient des travaux sur les déformations crâniennes artificielles de squelettes anciens. En 1858, l'anthropologue allemand Shaaflhausen étudie les altérations pathologiques présentes sur le squelette de l'Homme de Néandertal. Dès 1876, Jones étudie des squelettes indiens et soulève la question – tou-

jours débattue – de l'origine de la syphilis. En 1881, Le Baron soutient en France la première thèse de médecine sur cette spécialité qui n'a pas encore de nom, intitulée *Lésions osseuses de l'homme pré-historique en France et en Algérie*. En 1892, l'américain Shufeldt introduit le terme de *paleopathology* dans la littérature scientifique.

Il faut attendre le début du XX^e siècle pour que cette discipline se développe sous l'impulsion d'un médecin bactériologiste britannique, Marc Armand Ruffer (sa famille est en fait d'origine lyonnaise, mais a émigré quand il était enfant). Il structure cette nouvelle science en la définissant comme «la science des maladies dont l'existence peut être démontrée sur les restes humains et animaux des périodes anciennes», et publie à partir de 1910 des travaux fondamentaux sur les momies égyptiennes. Simultanément, les britanniques Francis Wood-Jones et Georges Elliot-Smith (1908-1910) font des recherches sur des séries de squelettes de Nubie. L'américain Roy Moodie réalise en 1923 la première synthèse, suivie, sept ans plus tard, de la parution du premier ouvrage méthodologique en langue française, *Paléopathologie et pathologie comparative* de Léon Pales, médecin des troupes coloniales, alors âgé de 25 ans. Il est impossible de citer tous les auteurs qui, à partir des années 1960, ont contribué à l'expansion de la discipline.

Le paléopathologiste américain John Lawrence Angel distinguait, il y a une vingtaine d'années, quatre phases de développement de cette discipline : une phase descriptive au XIX^e siècle ; une



1. UNE LÈPROSERIE, miniature du XIV^e siècle. La lèpre est une des maladies qui endommagent les os et dont les paléopathologistes reconnaissent la signature.

phase plus analytique au début du XX^e siècle ; une phase de synthèse des données, entre 1930 et 1970 ; enfin, la phase pluridisciplinaire moderne. Depuis, la paléopathologie s'est enrichie d'une nouvelle discipline, la paléo-épidémiologie, qui tente de reconstituer les fréquences des maladies identifiées sur diverses «populations» représentées par des séries de squelettes anciens. Elle bénéficie des progrès de la biologie moléculaire, notamment des procédés d'amplification de séquences d'ADN ancien.

Le paléopathologiste, enquêteur du passé

Pour mener son enquête, le paléopathologiste se fonde sur deux types de données, les «sources primaires», c'est-à-dire les données directes recueillies soit sur les restes squelettiques (des os et des dents) soit sur des restes momifiés, plus rares. Les «sources secondaires» sont les données historiques consignées dans des textes ou sur des représentations iconographiques, entachées de subjectivité.

La recherche archéologique est le support de la paléopathologie, car, d'une part, elle définit le contexte chronologique et, d'autre part, elle fournit les restes humains anciens. Ces derniers sont des documents archéologiques particuliers, car ils appartiennent également au domaine de la biologie : l'anthropologie permet la lecture de ces «archives biologiques» en fournissant les méthodes de reconstitution de la biologie des populations du passé. La médecine fournit l'outil diagnostique. Le paléopathologiste dont on comprend qu'il doit avoir des compétences en archéologie, en anthropologie et en médecine, adopte une démarche diagnostique générale fondée sur un examen «clinique» et sur des analyses complémentaires. Avec tous ces éléments, il sait que telle maladie est en cause, mais parfois, il ne peut départager plusieurs pathologies possibles qui créent des lésions analogues.

Comment un paléopathologiste analyse-t-il un os ancien ? Les pièces paléopathologiques sont observées à l'œil nu, au microscope binoculaire et, parfois, au microscope électronique. L'observation de coupes de tissus osseux ou momifiés en microscopie optique sous lumière polarisée fournit des informations complémentaires. L'imagerie médicale, notamment la radiographie, la tomographie, le

scanner et les reconstitutions d'images en trois dimensions, révèle les lésions internes. La biochimie, avec le dosage d'éléments toxiques (par exemple, le fluor), d'éléments présents à l'état de traces (tels le zinc et le strontium) ou d'isotopes (les isotopes du carbone et de l'azote) permettent de découvrir une éventuelle intoxication ou de définir un régime alimentaire. Par la méthode d'amplification des gènes, la PCR, appliquée aux ossements humains anciens, on a mis en évidence des maladies génétiques et l'on a confirmé l'identité de certains agents infectieux.

Les mécanismes pathologiques, quelle que soit leur origine – un traumatisme, des troubles métaboliques, des anomalies génétiques ou de croissance, une dégénérescence, une inflammation, une tumeur ou une infection – modifient l'activité des cellules du tissu osseux, les ostéoblastes (les cellules qui reconstruisent sans cesse l'os) et les

ostéoclastes (les cellules qui détruisent sans cesse l'os). Ces modifications sont responsables des lésions osseuses par excès de production ou de destruction du tissu osseux. Ce dernier n'a généralement que deux façons d'exprimer une atteinte pathologique : une construction ou une destruction excessives. C'est avec cet «alphabet binaire» que le paléopathologiste déchiffre toute la gamme des affections du squelette. En 1981, le paléopathologiste américain D. Ortner a proposé de classer les lésions anatomo-pathologiques en quatre grands groupes : les anomalies de la perte osseuse, nommée ostéolyse ; les anomalies de gain osseux, l'ostéof ormation ; les lésions mixtes ; les anomalies de la forme et/ou du contour de l'os sans que le tissu osseux ne soit lui-même altéré. Ces lésions élémentaires peuvent être isolées ou multiples, localisées ou diffuses, avec ou sans modification de la qualité du tissu osseux, de la taille ou de la forme de l'os.



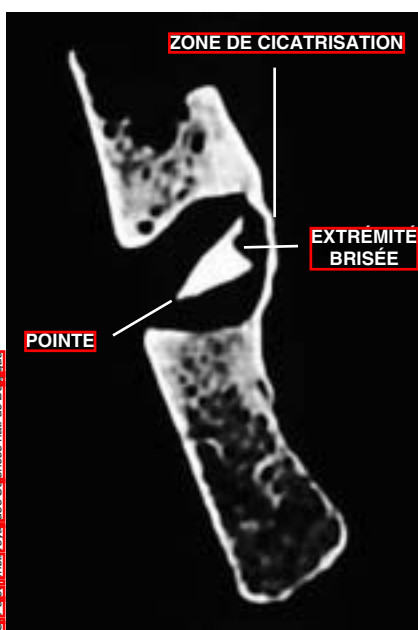
2. LA TUBERCULOSE OSSEUSE crée des difformités de la colonne vertébrale, notamment les gibbosités des bossus. Ces anomalies osseuses permettent le suivi de cette maladie dans les populations anciennes.



3. FRACTURE CONSOLIDÉE des deux os de l'avant-bras droit avec déformation en baïonnette (par analogie avec la forme de l'arme). Ces os proviennent du cimetière de Saint-Pierre, à Hyères, occupé du XIV^e au XVII^e siècle.



4. FRACTURE DES OS de l'avant-bras droit avec consolidation en position « vicieuse » du radius, qui fait un angle de 45 degrés (en bas). L'autre os, l'ulna, n'a pas été consolidé, ce qui crée une pseudo-articulation entre les deux extrémités fracturées (en haut). Ce sujet devait être victime d'un handicap fonctionnel certain déformant son avant-bras droit et limitant sa mobilité. Ces os ont été retrouvés dans le cimetière de Saint-Pierre, à Hyères.



5. UNE POINTE DE FLECHE en silex est fichée dans l'épine iliaque gauche d'un os coxal retrouvé sur le site néolithique tardif de Furfooz, en Belgique. La flèche a traversé le muscle fessier pour se ficher dans l'os, et la pointe s'est brisée au moment de l'impact ou lors d'une tentative d'extraction du projectile. L'individu a survécu à cette blessure comme l'indique la cicatrisation osseuse autour de la pointe de flèche.

Les lésions décrites, comment le paléopathologiste pose-t-il un diagnostic ? Le diagnostic peut reposer sur des présomptions ou sur des certitudes. Les démonstrations qui établissent de façon formelle un diagnostic sont rares en paléopathologie. Aujourd'hui, on confirme souvent un diagnostic de maladie génétique ou infectieuse par l'amplification de séquences de gènes humains qui portent des mutations ou par amplification de séquences d'ADN microbien. Le plus souvent, on compare les lésions paléopathologiques à des lésions actuelles de maladies connues, et l'on aboutit de cette façon à un diagnostic vraisemblable. Ce raisonnement par analogie est la première étape du raisonnement médical ; la seconde est celle des examens qui permettent de confirmer le diagnostic.

Dans ses tentatives de reconstitution de la pathologie des populations du passé et dans sa démarche diagnostique, le paléopathologiste est confronté à des limites et à des pièges, inconnus des cliniciens actuels. Le plus souvent, seuls les ossements témoignent des populations disparues. Ainsi nous échappe une grande partie de la

pathologie, puisque les tissus mous ont disparu. Par ailleurs, le matériel osseux est souvent incomplet ou fragmentaire, ce qui complique l'élaboration des diagnostics rétrospectifs. La pseudo-pathologie et la variabilité anatomique sont deux pièges à éviter. La pseudo-pathologie résulte d'altérations qui se sont produites après la mort. Ces processus, dits taphonomiques, créent de faux aspects pathologiques, parfois trompeurs, même pour un paléopathologiste confirmé. De surcroît, une variation morphologique inhabituelle peut-être interprétée, à tort, comme une modification pathologique : la variabilité des caractères anthropologiques et anatomiques doit être prise en compte dans toute étude paléopathologique.

Les diverses lésions

Les lésions dues à des traumatismes du squelette sont fréquentes. Les fractures sont les lésions les plus évidentes en paléopathologie et ont été décrites dès le XVIII^e siècle. Leur existence est probablement très ancienne, certaines observations ayant été faites sur des restes de dinosaures. On reconnaît les fractures consolidées grâce à la production d'un cal, une « cicatrice » osseuse qui témoigne d'une production d'os de « réparation ». Lorsque la fracture est survenue peu de temps avant la mort et que le cal n'a pas eu le temps de consolider la fracture, on ne peut la distinguer d'une cassure ayant eu lieu après la mort.

A condition qu'il puisse étudier des séries de squelettes suffisamment importantes (plus d'une centaine d'individus), le paléopathologiste peut évaluer les activités traumatisantes (accidentelles ou belliqueuses) des populations anciennes et fournir, selon le type et la localisation des lésions, des informations sur leur mode de vie. Ainsi, en 1910, le paléopathologiste britannique Wood-Jones étudie plus de 5 000 squelettes d'une population nubienne antique ; il observe que trois pour cent des os portent une fracture et le tiers des fractures concerne les os de l'avant-bras. Dans cette importante série, la fréquence de l'atteinte du membre supérieur est le double de celle observée dans les populations actuelles, où les fractures des membres inférieurs sont plus nombreuses. Les fractures des deux os de l'avant-bras sont généralement considérées comme d'origine « belliqueuse ».

Dans une série de la fin du Moyen Âge, retrouvée dans le cimetière de Saint-Pierre, à Hyères, plusieurs de ces fractures de l'avant-bras ont été identifiées. L'un des os (*voir la figure 3*) présente une consolidation satisfaisante, avec une déformation en baïonnette ; on peut en déduire que la réduction de cette fracture fut incomplète. Un autre cas (*voir la figure 4*) montre que la fracture n'a pas été réduite : le radius ne s'est pas consolidé selon un axe correct, mais avec un angle de 45 degrés et l'autre os de l'avant bras, l'ulna, n'a pas été consolidé du tout, de sorte que la fracture est restée mobile, réalisant une sorte de nouvelle articulation (pseudarthrose). Devant des cas isolés de ce type de fracture, on peut difficilement se prononcer sur la nature belliqueuse du traumatisme, mais si la fréquence de ces fractures est importante et si d'autres traces traumatiques sont associées, notamment des fractures du crâne, elle fournissent des informations sur le degré de violence des périodes considérées.

La confirmation de faits de guerre par des témoignages paléopathologiques évidents est plus rare, mais on retrouve, par exemple, des projectiles (des pointes de flèches) fichés dans des os datant du Néolithique : grâce à l'imagerie médicale, on a, par exemple, décelé la présence d'une extrémité de pointe de flèche en silex, à l'intérieur de l'os coxal d'un homme de la fin du Néolithique, qui vivait il y a quelque 4000 ans en Belgique (*voir la figure 5*) : étant donné que l'os s'est reconstruit autour de la pointe de flèche, on peut supposer que l'homme a parfaitement survécu à cet incident.

Par ailleurs, on retrouve pour des périodes plus récentes, des traces d'impact d'armes blanches (notamment de sabre) sur des crânes. Ainsi, le crâne d'un homme datant du Moyen Âge (*voir la figure 6*) porte des lésions qui témoignent d'une grande violence et qui ont certainement entraîné la mort immédiate du sujet. Dans un autre cas, (*voir la figure 7*) retrouvé près de Salon de Provence dans un cimetière d'infirmerie regroupant des victimes de la peste, un homme d'âge moyen a été victime d'un coup violent, qui lui a enfoncé le crâne. Ayant survécu à cette blessure qu'il a vraisemblablement reçue durant une Guerre de religions, et qui avait dû laisser des séquelles neurologiques, il est décédé de la peste au printemps 1590 ! On observe d'autres types de lésions traumatiques sur les



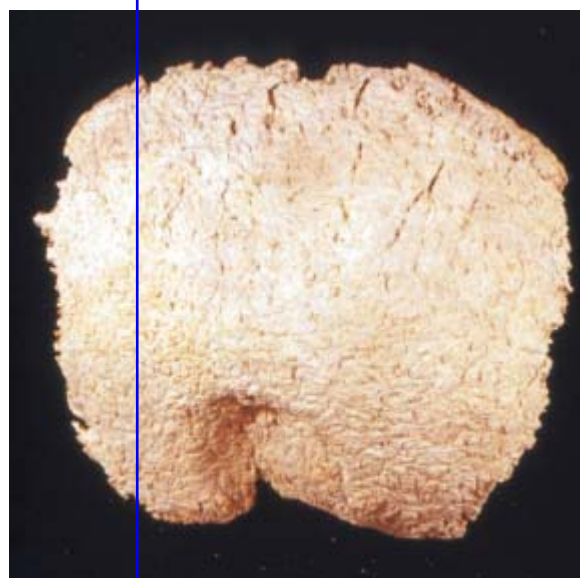
6. CE CRANE incomplet, celui d'un homme adulte, a été découvert dans le cimetière de la basilique Sainte-Marie-Madeleine de Saint-Maximin, daté des XII^e-XIII^e siècles. On observe deux sections nettes, sur l'os frontal et sur les os pariétaux, manifestement provoquées par un instrument tranchant. L'absence de cicatrisation indique que l'arme blanche, lourde et très affûtée (une épée ou une hache) responsable des lésions a entraîné une mort immédiate ou très rapide. La reconstitution de l'orientation des coups, indique qu'ils ont été portés successivement, des deux côtés, de bas en haut et d'une certaine hauteur, peut-être par un cavalier sur un fantassin.

squelettes : les luxations et les entorses laissent des séquelles perceptibles par le paléopathologiste.

Les séquelles des infections

Venons-en aux lésions d'origine infectieuse. On observe deux grands groupes d'atteintes infectieuses en paléopathologie : les infections spécifiques et les infections non spécifiques. Ces dernières sont dues à des infections de l'os ou des articulations liées à des germes qualifiés de « banaux », le plus souvent ceux du groupe *Staphylococcus*. Les infections osseuses concernent le plus fréquemment les os des membres, les formes principales étant les périostites et les ostéomyélites. La périostite se présente sous la forme d'appositions osseuses superficielles de formes variées, recouvrant la surface des os (*voir la figure 8*).

Cette ossification périostée est une réaction de l'os à une agression, due à un microbe ou à d'autres causes, telles qu'un traumatisme, une tumeur, une insuffisance veineuse chronique, des carences alimentaires, des troubles métaboliques ou des intoxications. Les



7. OS PARIÉTAL DROIT du crâne d'un homme d'âge mûr, décédé au printemps 1590 d'une épidémie de peste à Lambesc, près de Salon de Provence. La lésion (*en bas*) résulte d'un choc violent sur le crâne, ayant provoqué un enfoncement de la voûte crânienne, dont une partie a pénétré à l'intérieur de la boîte crânienne. Malgré la violence du choc (provoqué par un instrument non tranchant ou amorti par un casque protecteur) le sujet a survécu comme l'atteste la cicatrisation osseuse. On peut supposer que l'éperon osseux cicatriciel faisant saillie à l'intérieur du crâne dans la région pariéto-temporale a provoqué des séquelles neurologiques, par exemple des crises d'épilepsie.



8. TIBIA d'une jeune femme, âgée de moins de 25 ans. On constate des appositions osseuses concentriques et irrégulières sur l'os, qui prédominent du côté gauche (*flèche, en bas*). Cet aspect est probablement dû à une infection généralisée : ce type de lésion pourrait correspondre à une tréponématose ou à une tuberculose. Ces ossements ont été retrouvés en Guadeloupe sur le site de l'anse Sainte-Marguerite par Patrice Courtaud et son équipe ; ils datent des XVIII^e-XIX^e siècles. L'autre os de la jambe, la fibula (*en haut*), présente des appositions périostées qui hypertrophient l'os et rendent sa surface irrégulière.

antibiotiques, les cas paléopathologiques d'ostéomyélite ne dépassent pas un pour cent des os analysés.

Syphilis, tuberculose et lèpre

Les infections à germes dits spécifiques sont principalement liées à deux groupes de bactéries pathogènes : les tréponèmes et les mycobactéries. Pour



9. CRÂNE FÉMININ présentant des lésions typiques de tréponématose. Il a été retrouvé à Cueva de la Candelaria, au Mexique, et date de l'époque pré-colombienne. Les lésions infectieuses liées au développement du tréponème, micro-organisme responsable de la syphilis notamment, prennent, sur le crâne, un aspect de nodules, nommés gomme ; ils sont parfois responsables de nécroses étendues qui entraînent une perte de substance osseuse.

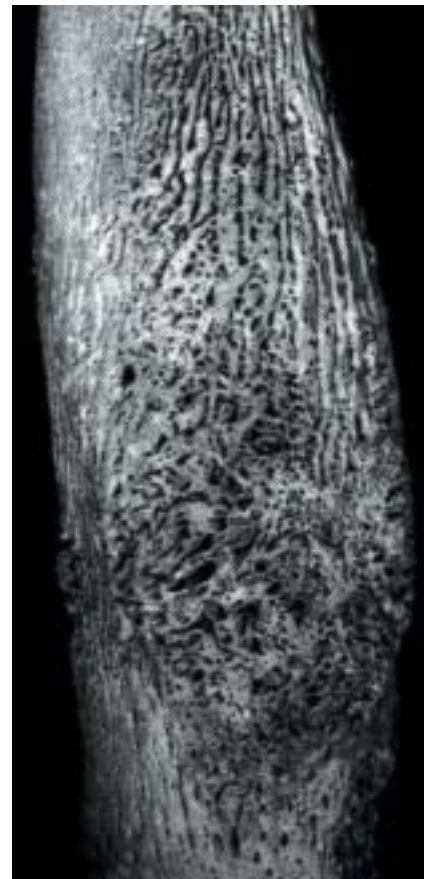
ces infections et surtout pour le second groupe, le diagnostic paléopathologique est actuellement secondé par la biologie moléculaire par amplification de séquences de l'ADN microbien. Parmi les quatre tréponématoses humaines, les trois dues à *Treponema pallidum* (la syphilis, la seule tréponématose vénérienne, le pian et le bégel) sont associées à des lésions osseuses ; la quatrième, la pinta ou caraté (infection par *Treponema carateum*) n'entraîne que des lésions cutanées.

Avant l'ère des antibiotiques, d'après les données rassemblées au début du XX^e siècle, les tréponématoses humaines étaient réparties selon des zones géographiques bien définies : le pian était une infection des régions tropicales, le bégel une tréponématose des régions sèches d'Afrique du Nord, du Proche-Orient et d'Asie, le caraté une forme Sud-Américaine, la syphilis une infection fréquente en zone urbaine. Ces répartitions ont été conservées jusqu'à aujourd'hui, hormis celle de la syphilis qui touche des régions plus étendues. L'incidence des tréponématoses non vénériennes a été réduite par les traitements antibiotiques.

Les lésions osseuses des tréponématoses regroupent des lésions infectieuses particulières de la voûte crânienne, les gomme, caractérisées par des sortes de nodules responsables de cicatrices caractéristiques ; lorsque le processus persiste, il est responsable de perte de substance osseuse (*voir la figure 9*) ; des périostites diffuses bila-

térales des os longs des membres, surtout des tibias (*voir la figure 10*) avec parfois une déformation spécifique incurvant l'avant du tibia en « lame de sabre » ; des lésions destructives de différents éléments du squelette. Les paléopathologistes ne peuvent distinguer ces trois formes cliniques d'après les lésions osseuses, sauf dans le cas particulier de la syphilis vénérienne, la seule tréponématose susceptible d'être transmise au fœtus : le nouveau-né est atteint d'une syphilis congénitale précoce.

Seule l'existence de ces atteintes du fœtus permet d'affirmer le diagnostic de syphilis vénérienne. Cette observation est particulièrement importante dans le débat sur l'origine de la syphilis en Europe : selon l'hypothèse la plus répandue, la maladie aurait été rapportée d'Amérique par les marins de Christophe Colomb, mais une autre



10. TIBIA DROIT d'une jeune femme adulte retrouvée à Gloucester et datant des XIII^e-XIV^e siècles. Il présente une déformation liée à une tréponématose. Ce cas, antérieur à 1493, fait partie d'un ensemble d'observations paléopathologiques réalisées en Grande-Bretagne qui témoignent de l'existence probable d'une tréponématose européenne antérieure au contact des populations européennes et amérindiennes. C'est un des arguments pour une origine européenne de la syphilis.

hypothèse stipule qu'elle aurait été présente en Europe, au moins depuis l'Antiquité. Nous avons étudié un fœtus de sept mois environ, très bien conservé ; il a été retrouvé à Costebelle, près de Hyères, et date du IV^e siècle de notre ère (voir la figure 11). Après avoir éliminé d'autres pathologies, nous sommes arrivés à la conclusion que le fœtus était vraisemblablement atteint de syphilis congénitale. Le résultat devra être confirmé, mais il renforce l'hypothèse selon laquelle la syphilis n'a pas franchi l'océan Atlantique dans le sens Ouest-Est.

En ce qui concerne les mycobactéries, les deux infections identifiables en paléopathologie sont la tuberculose et la lèpre. La première résulte de l'infection chronique de l'organisme par *Mycobacterium tuberculosis*. Cette infection souvent mortelle avant la découverte des substances antituberculeuses, au milieu du XX^e siècle, était responsable au tournant de ce siècle d'une mortalité atteignant 300 personnes pour 100 000 habitants. C'est une infection d'origine animale qui s'est adaptée à l'homme depuis le Néolithique, après la domestication des bovidés ; elle est associée à la sédentarisation et à la concentration de populations dans les premières cités. Les localisations des lésions osseuses typiques de cette maladie sont variées. Dans la spondylodiscite tuberculeuse ou mal de Pott, les vertèbres sont atteintes (voir la figure 12) ; dans l'arthrite tuberculeuse, ce sont les articulations (le genou, la hanche, le coude, le poignet) ; dans les ostéites tuberculeuses, ce sont les os des mains et des pieds, les côtes et les os des membres. Le mal de Pott se manifeste par des destructions vertébrales responsables de troubles notables de la statique, et les bosses de beaucoup des « gibbeux » du Moyen Âge étaient probablement des séquelles d'une tuberculose vertébrale. L'application des méthodes de biologie moléculaire a fait progresser le diagnostic paléopathologique de la tuberculose.

La seconde des infections mycobactériennes que les paléopathologistes reconnaissent avec certitude est la lèpre, une infection chronique par *Mycobacterium leprae*, encore nommé le bacille de Hansen. Cette maladie chronique aboutit, en l'absence de traitement,

à des mutilations des extrémités et du visage, dont le caractère horrible faisait considérer au Moyen Âge cette maladie comme un fléau comparable à la peste et justifiait une exclusion complète des lépreux de la société. Les lésions de la lèpre sont faciles à reconnaître sur du matériel ostéo-archéologique : sur le crâne, le *facies leprosa* se manifeste par une résorption de l'épine nasale et du rebord des mâchoires et par des modifications de l'os du palais ; aux extrémités, les lésions ressemblent à celles que laissent des amputations des doigts ou des orteils. La maladie a été identifiée dès l'Antiquité en Europe et aurait été rapportée de l'Inde par les soldats d'Alexandre le Grand au IV^e siècle avant notre ère. La maladie semble avoir connue son apogée en Europe entre 1 000 et 1 400. Il est vraisemblable que cette infection a été introduite après Christophe Colomb dans le Nouveau Monde, où les cas paléopathologiques restent rares.

Les anomalies de la croissance et les tumeurs

Les ostéonécroses et les dystrophies de croissance, deux pathologies d'origines différentes, sont parfois regroupées sous le terme de troubles circulatoires. Les ostéonécroses, des nécroses du tissu osseux dues à une interruption de la vascularisation, peuvent survenir en dehors de causes infectieuses, à la suite de traumatismes, de maladies du sang ou le plus souvent sans cause connue. Sur l'os ancien, elles se manifestent sous la forme d'excavations à contours circulaires exposant le tissu spongieux sous-jacent et aboutissant pour les grosses articulations, notamment pour la tête fémorale, à une détérioration de l'articulation (une arthrose). Les ostéodystrophies de croissance rassemblent une série de lésions qui surviennent au cours de l'enfance ou de l'adolescence à la suite d'une ischémie (une vascularisation insuffisante de l'os) d'origine inconnue. L'ostéochondrite primitive de la hanche ou maladie de Legg-Perthes-Calvé, responsable de déformations de la tête fémorale, est observée fréquemment sur les os anciens. Les lésions de l'ostéochondrodystrophie vertébrale de croissance ou maladie de Scheuerman (la cyphose des adolescents) sont également souvent décrites ; lorsqu'elles concernent des squelettes mésolithiques, on ne peut alors les imputer à la mauvaise position des élèves sur les bancs de l'école ! Aujourd'hui, c'est pourtant une explication souvent invoquée comme étant à l'origine de ce trouble de la croissance vertébrale.

En ce qui concerne les tumeurs osseuses, on les classe en tumeurs bénignes ou tumeurs malignes (primaires ou secondaires). On observe peu de tumeurs osseuses, sans doute parce que les cancers et les conditions d'environnement se sont notablement modifiés au cours du temps : le cancer pulmonaire est aujourd'hui essentiellement lié à la consommation de tabac, et ses métastases osseuses étaient sans doute rares à des époques où les conditions étaient différentes. Par ailleurs, les cancers secondaires des os surviennent aujourd'hui chez des personnes âgées : il est vraisemblable que nos ancêtres mouraient,



11. OSSEMENTS D'UN FŒTUS d'environ sept mois découvert à Costebelle, alors qu'il était encore en place dans la cavité pelvienne de sa mère. Ils datent du IV^e siècle. Il présente un ensemble de lésions qui résultent vraisemblablement d'une syphilis congénitale et remettent en question le dogme de l'origine américaine de la maladie.



12. COLONNE VERTEBRALE d'un homme adulte âgé, qui présente un aspect typique de tuberculose vertébrale. Les lésions vertébrales sont caractéristiques : plusieurs vertèbres sont fusionnées et présentent un changement de direction plus ou moins important dû au tassement de plusieurs vertèbres. Ici, l'angulation est notable, puisqu'elle est proche de 90 degrés. Cette angulation est responsable de la gibbosité – la bosse dorsale –, conséquence d'une tuberculose vertébrale.



13. ARTHROSE VERTEBRALE chez une femme d'une trentaine d'années, retrouvée en Guadeloupe dans l'anse Sainte-Marguerite (XVIII^e - XIX^e siècles). Les plateaux vertébraux érodés se sont remodelés, et une collerette (flèches) périphérique, parfois volumineuse, s'est formée. Cette dégénérescence est liée à un trouble de la statique lombaire (une scoliose lombaire à concavité gauche), elle-même liée à une asymétrie de longueur des membres inférieurs, responsable d'une bascule du bassin.

pour diverses raisons, avant que n'apparaissent de telles tumeurs. N'oublions pas que nos connaissances de la pathologie tumorale sont issues de l'observation des populations actuelles qui vivent au moins deux fois plus longtemps que les populations du passé.

C'est aussi le cas de l'ostéoporose qui se caractérise par une perte importante de tissu osseux : fréquente aujourd'hui, elle est rare en paléopathologie, car la longévité était inférieure et l'activité physique supérieure.

Les lésions des articulations

La malformation congénitale des articulations la plus fréquemment observée en paléopathologie est celle de la hanche : les séquelles de luxation congénitale de la hanche sont parfois fréquentes dans certaines séries d'ossements ; l'anomalie étant génétique, ces lésions sont des marqueurs de consanguinité. Les altérations dégénératives articulaires et vertébrales se définissent sous le terme général d'arthrose : c'est l'atteinte non inflammatoire, chronique et déformante d'une articulation, associant des destructions articulaires et des modifications de l'os. En paléopathologie, l'arthrose signifie en fait une ostéo-arthrose dans la mesure où l'on ne peut identifier l'atteinte éventuelle du cartilage. L'arthrose est fréquente, et augmente avec l'âge, même si d'autres facteurs peuvent être incriminés.

Les arthroses des membres sont caractérisées par l'association d'une érosion des surfaces des articulations, d'une

production osseuse périphérique à l'endroit où s'exerce l'excès de pression et d'une sclérose sous la zone de pression. Les articulations les plus touchées sont les plus actives (la hanche, le genou, la cheville, la racine du pouce). Certaines localisations (le coude ou le poignet) révèlent toujours des traumatismes : ces localisations nous permettent de formuler des hypothèses sur l'activité de la population ancienne. Par exemple l'observation d'arthrose bilatérale des poignets chez des sujets néolithiques a permis de postuler que les activités de production d'outillage en pierre, taillée ou polie, provoquait des microtraumatismes analogues à ceux du marteau-piqueur, qui entraîne, aujourd'hui, des lésions identiques, reconnues comme une maladie professionnelle.

Des modifications anatomiques semblables à l'arthrose des membres se retrouvent sur la colonne vertébrale : les plateaux vertébraux se sclérosent, s'érodent et se remodelent, et l'on observe une collerette ostéophytique périphérique, parfois volumineuse (voir la figure 13). On constate que les lésions vertébrales diffèrent selon les populations anciennes : en fonction de leurs activités dominantes, les anomalies sont plutôt localisées au niveau des vertèbres cervicales, des vertèbres thoraciques ou des vertèbres lombaires. L'arthrose des vertèbres cervicales chez les sujets jeunes a pu être mise en relation avec le port de charges lourdes sur la tête. Nous avons été surpris de la diagnostiquer, dans les Antilles, avec une fréquence particulièrement importante dans un cimetière d'esclaves de

la période coloniale, chez des adolescents. Par ailleurs, l'arthrose lombaire est fréquente dans les populations anciennes et a pu être mise en relation avec la pratique cavalière, activité qui sollicite beaucoup le rachis lombaire.

Arthropathies infectieuses et inflammatoires

En dehors des infections spécifiques mentionnées précédemment, une articulation peut être atteinte par un germe, par exemple un staphylocoque, un streptocoque, un gonocoque ou un pneumocoque, qui se loge dans la cavité articulaire. Ces arthrites septiques sont perceptibles pour le paléopathologiste dès l'apparition de lésions destructrices de l'articulation qui aboutissent souvent à une fusion articulaire, témoin de la guérison. Ces arthrites surviennent à la suite d'une infection générale ou par contamination locale, par exemple lors d'une fracture ouverte.

On observe une atteinte des articulations dans le cadre des rhumatismes inflammatoires, notamment lors d'une polyarthrite rhumatoïde. Au cours de cette maladie inflammatoire, les articulations sont progressivement détruites. Cette maladie, aujourd'hui fréquente puisqu'elle touche un pour cent de la population, est si rare en paléopathologie que l'on pense qu'il s'agit d'une maladie « nouvelle » en Europe, où elle serait apparue il y a seulement 200 à 300 ans. Selon certains paléopathologistes américains, tels Bruce Rothschild de l'Université de médecine de l'Ohio, cette maladie aurait été importée

d'Amérique, mais quelques cas amérindiens décrits semblent postérieurs à la découverte du Nouveau Monde et quelques cas supposés de l'Ancien Monde sont plus anciens, soulignant, comme dans le cas de la syphilis, la difficulté de ce type de débats.

Les spondyloarthropathies constituent un groupe de maladies inflammatoires qui touchent le rachis et les articulations périphériques ; ces maladies sont moins destructrices que la polyarthrite rhumatoïde, mais plus invalidantes. La spondylarthrite ankylosante aboutit, dans ses formes évoluées, à la fusion complète de la colonne vertébrale, alors dénommée « colonne bambou », et des côtes (voir la figure 14) ; elle est facile à reconnaître en paléopathologie : les cas décrits sont nombreux, alors que cette maladie est aujourd'hui dix fois moins fréquente que la polyarthrite rhumatoïde. Il s'agirait d'une maladie ancienne dans l'Ancien Monde. Les cas les plus anciens remontent à la période néolithique. On sait que cette pathologie fait partie d'un groupe de maladies inflammatoires qui associent une susceptibilité génétique particulière et une sensibilité à diverses infections qui déclenchent des réactions inflammatoires.

Les lésions des tendons qui entourent l'articulation laissent parfois des traces sur les squelettes anciens. Ainsi les enthésopathies mécaniques sont des lésions micro-traumatiques qui touchent la zone d'insertion d'un tendon ou d'un ligament sur l'os. Ces lésions sont liées à un surmenage de cette zone nommée enthèse, dans le cadre d'activités répétitives. Longtemps négligée en paléopathologie, leur observation sur des squelettes anciens a permis de développer la notion de marqueurs osseux d'activité. Ainsi, nous avons émis l'hypothèse que certains types d'activités physiques répétitives des populations anciennes, telles que les activités de chasse, telles que le lancer de javelot ou le tir à l'arc, étaient peut-être responsables de ce type de lésions.

Au cours de l'hyperostose squelettique diffuse, tous les sites d'insertion des tendons sur les os sont ossifiés. Aujourd'hui, cette maladie qui touche surtout l'homme plutôt âgé, trop gros et ayant parfois un diabète gras (non insulino-dépendant) concerne 6 à 12 pour cent de la population. Elle est également fréquente en paléopathologie. Selon Tony Waldron de l'Université de Londres, la fréquence de cette mala-

die peut varier notablement : il a ainsi retrouvé cette pathologie chez 30 pour cent des moines enterrés dans un cimetière monastique ; il en conclut qu'ils devaient être riches et bien nourris !

Des épidémies du passé à celles d'aujourd'hui

La paléoépidémiologie est une nouvelle approche de la paléopathologie en plein développement. On envisage les maladies à l'échelle des populations anciennes, et non plus à la lumière de l'analyse de cas particuliers. Toutefois, les collections ostéo-archéologiques humaines sont qualifiées à tort de « populations », car il existe de nombreux biais de recrutement et de conservation qui font qu'une « population de cimetière » est très éloignée de la population vivante dont elle est issue. L'histoire des maladies et notamment des infections humaines passe pourtant par cette approche paléoépidémiologique, assistée des méthodes paléomicrobiologiques utilisant la biologie moléculaire. Nous avons eu la chance d'éviter les biais de recrutement lorsque nous avons travaillé sur des charniers de peste des XVI^e et XVIII^e siècles (toutefois, la peste ne laissait pas de traces osseuses et ne peut faire l'objet d'études paléopathologiques directes). Ces séries présentent l'intérêt unique d'avoir été constituées de victimes décédées dans un laps de temps très court, sans sélection, et de constituer une sorte de reflet de la population vivante, condition unique en paléopathologie.

Ceci nous a permis de reconstituer par exemple la prévalence de la tuberculose durant ces périodes : elle est alors particulièrement élevée, proche de 50 pour cent (par comparaison, il y a une quarantaine d'années dans les zones de forte endémicité, en Asie du Sud-Est, la prévalence se situait aux environs de 37 pour cent). La connaissance des modalités évolutives de cer-



Fig. 14. Un verset de l'histoire humaine

14. « COLONNE DE BAMBOU » : cette portion de la colonne vertébrale d'un homme âgé, issu des fouilles de la nécropole de Pitvaros-Vitzárdó, en Hongrie, et daté du VIII^e siècle, présente une fusion complète de plusieurs vertèbres. Cet aspect est typique des stades avancés de spondylarthrite ankylosante. Cette maladie est responsable d'une rigidité totale de la colonne vertébrale, entraînant un handicap fonctionnel notable qui peut provoquer des complications respiratoires quand le thorax est aussi atteint par ce mécanisme d'ossification excessive.

taines maladies revêt ainsi un intérêt épidémiologique fondamental pour l'étude et la prévision de l'évolution des maladies actuelles, telle la tuberculose, exemple d'infection qui semblait bien contrôlée et qui, aujourd'hui, acquiert une nouvelle virulence.

Comprendre les situations présentes pour mieux gérer les situations futures, à la lumière de la connaissance du passé, illustre ainsi la devise de l'association internationale de paléopathologie : *Mortui viventes docent*, Les morts servent aux vivants.

Yann ARDAGNA est assistant-ingénieur en anthropologie biologique dans l'Unité d'anthropologie, UMR 6578, CNRS – Université de la Méditerranée – Faculté de médecine de Marseille, où Olivier DUTOIR dirige le Service d'anthropologie biologique.

O. DUTOIR, G. PÁLFI et al., *L'origine de la syphilis en Europe : avant ou après 1493 ?* Éditions Errance-CAV, Paris-Toulon, 1993.

Pierre THILLAUD, *Paléopathologie humaine*, Kronos, Paris, 1996.

Michel SIGNOLI, *Étude anthropologique de crises démographiques en contexte épidémique. Aspects paléo- et biodémographiques de la Peste en Provence*, Doctorat de l'Université de la Méditerranée, Faculté de Médecine de Marseille, 1998.

G. PÁLFI et al. *Tuberculosis : past and present*, in *Golden Book-Tuberculosis foundation*, Budapest-Szeged, 1999.

Les marées noires naturelles

IAN MACDONALD

Dans le golfe du Mexique, du pétrole s'échappe naturellement des fissures du fond marin et se répand dans l'océan.

Dans le golfe du Mexique, au large du Texas et de la Louisiane, de minuscules bulles de pétrole et de gaz naturel remontent des fonds océaniques, suintant le long des failles qui sillonnent la couche de sédiments, grouillante de vie. Puis, une fois dans l'océan, ces bulles s'élèvent en panaches étroits jusqu'à la surface. Le gaz naturel se répand dans l'atmosphère, tandis que le pétrole dérive à la surface de l'eau ; il s'évapore, se mélange à l'eau et finit par se disperser.

C'est pendant l'été, après plusieurs jours de calme plat, que l'on observe le mieux ces «marées noires» naturelles : de larges rubans de pétrole s'étirent vers l'horizon. Quand on navigue à proximité de ces traînées, on constate que la surface de l'eau est plus lisse et plus brillante qu'à l'accoutumée et que l'eau elle-même semble plus claire. Les poissons volants qui sautent devant le bateau piquent dans l'eau sans éclaboussures. À mesure que l'on avance, l'odeur du pétrole devient plus forte que l'odeur de diesel du moteur. Des nappes visqueuses flottent autour du bateau et se collent parfois à la coque.

Soudain, des gouttelettes de pétrole éclatent à la surface, formant de petits disques irisés qui ont la taille d'une soucoupe, puis d'une assiette, puis d'un plat à tarte. Elles se fondent dans la couche irisée qui dérive à la surface de l'eau. Plus loin, la mer retrouve son apparence habituelle. L'eau s'assombrit, la brise soulève de petites vaguelettes et les poissons volants font jaillir des embruns. Le bateau a dépassé une nappe de pétrole, mais, au loin, d'autres flottent sur la mer.

Autrefois, les garde-côtes les suivaient, pensant qu'elles les mèneraient à un navire qui vidangeait clandestinement ses ballasts. En fait, elles ne sont que des conséquences naturelles de la géologie du golfe du Mexique, une région qui possède les plus grands gisements d'hydrocarbures du monde.

Contre temps et marées

Sous l'action de l'énergie géothermique, les matières organiques enfouies dans les roches sédimentaires de la croûte terrestre se transforment en hydrocarbures. Issus des couches sédimentaires profondes, les hydrocarbures migrent lentement vers la surface, mais sont parfois piégés par des grès poreux, par des schistes fracturés, ou par les restes calcaires d'anciens récifs.

Dans le golfe du Mexique, ces «pièges» géologiques abondent. Au Jurassique, il y a environ 170 millions d'années, une couche de sel s'y est déposée ; aujourd'hui, elle recouvre la plupart des gisements pétrolifères de la région. Elle est déformable, mais quasi incompressible. Au cours des temps géologiques, les sédiments arrachés au continent par l'érosion se sont accumulés sur le plancher océanique. Sous l'action de leur poids inégalement réparti, la couche de sel s'est déformée en s'amincissant ou s'épaississant selon les endroits. Le sel ainsi déplacé a formé des «montées diapiriques» : ces paquets de sel remontent dans les sédiments en adoptant des formes géométriques variées et vont parfois jusqu'à se détacher de la couche de sel sous-jacente.

Ce type de tectonique influe sur la migration des hydrocarbures. Le sel étant imperméable, les hydrocarbures restent

piégés au-dessous. Parfois, la couche de sel se brise sous l'effet des contraintes internes : de grandes failles s'enfoncent jusqu'aux réservoirs d'hydrocarbures profondément enfouis, qui trouvent ainsi un chemin jusqu'à la surface du plancher océanique.

La géologie du golfe du Mexique est unique au monde et la région a joué un rôle de tout premier plan dans l'histoire de l'industrie pétrolière. La première plate-forme pétrolière y fut installée en 1947, et beaucoup d'autres ont été installées depuis. Grâce aux progrès techniques, on a repéré des gisements de plus en plus profonds, dont on réussit à extraire le pétrole. L'exploitation pétrolière a favorisé l'essor économique de la région. Les plates-formes, les navires pétroliers et les raffineries font partie du paysage du golfe du Mexique. Le secteur emploie une main-d'œuvre importante qui travaille souvent en mer pour satisfaire les besoins toujours croissants de notre société. Dans ce contexte, les marées noires naturelles intéressent l'industrie pétrolière.

Les Précolombiens connaissaient déjà leur existence et utilisaient le goudron qu'ils ramassaient sur les plages comme matériau de calfatage. Des récits espagnols du XVI^e siècle mentionnent ces nappes de pétrole flottantes. En 1910, John Soley, lieutenant dans la marine américaine, publie la première étude systématique des nappes de pétrole dans *Scientific American*. Il relève toutes les mentions de nappes de pétrole consignées dans les carnets de bord des navires qui ont sillonné le golfe : le commandant du paquebot *Comedian* raconte qu'il a vu trois jets de pétrole sortir de la mer au même endroit. À l'époque,



1. B&W. CROSS IN PHOTOS

1. LORSQU'UNE GOUTTELETTE DE PÉTROLE montant des profondeurs de l'océan arrive à la surface, elle éclate et s'étale en formant une tâche irisée. Sur cette photographie, la tâche a à peu près la taille d'une assiette.

2. SUR CETTE VUE AERIENNE, on aperçoit de longues trainées entre les ombres des nuages : ce sont des nappes d'hydrocarbures issues du plancher océanique.

R. BACHA

l'origine des marées noires restait une énigme. Soley pensait – naïvement – que le pétrole qui émergeait loin des côtes était d'origine inorganique. Les détails rapportés par les marins dont il étudia les récits (les nappes de pétrole flottantes, les oiseaux mazoutés, les morceaux de goudron, la puanteur âcre...) évoquent les marées noires accidentelles qui surviennent trop souvent aujourd'hui. D'après ces descriptions, qui datent d'une centaine d'années, le pétrole semblait s'échapper du plancher océanique en plus grandes quantités qu'aujourd'hui.

Une carte des marées noires naturelles

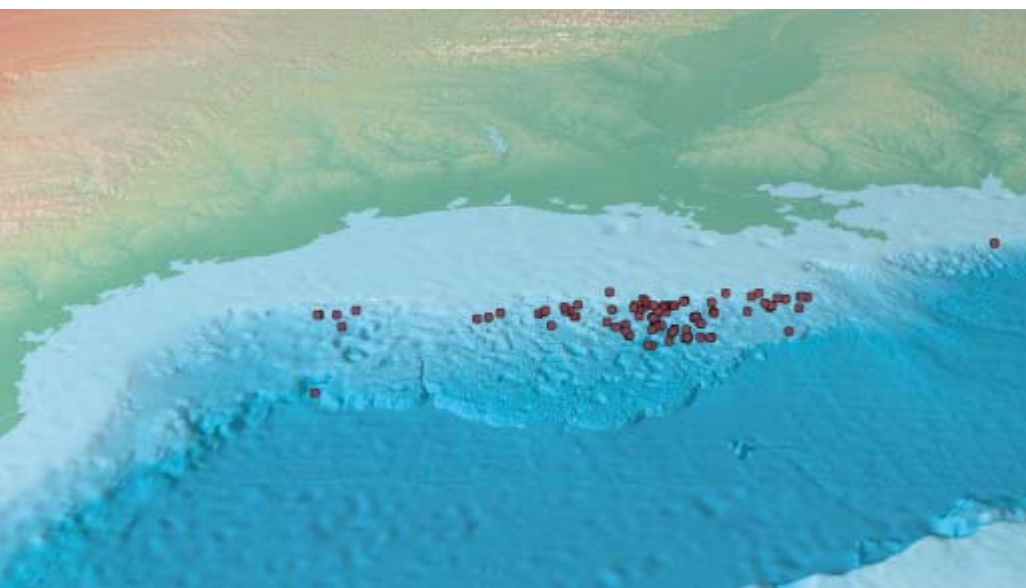
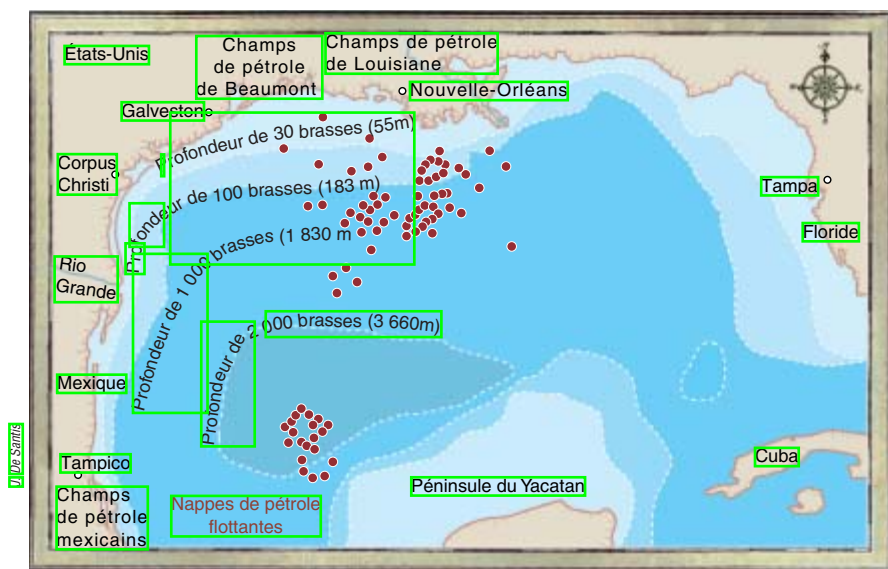
Soley dressa une carte des marées noires naturelles d'après les récits qu'il avait retrouvés, et d'après les positions des navires qui avaient été relevées de façon rudimentaire. Aujourd'hui, les océanographes surveillent les nappes de pétrole par satellite : elles sont visibles de très loin, grâce à leurs propriétés physiques et chimiques. Les couches d'hydrocarbures dont l'épaisseur est supérieure à quatre micromètres (l'épaisseur moyenne des marées noires acci-

dentelles) sont brun-rougeâtre ou ocres. Une fois exposée à l'atmosphère, la fraction volatile du pétrole s'évapore rapidement. Le résidu cireux restant forme une émulsion avec l'eau de mer et finit par coaguler en billes de goudrons et en nappes flottantes. Les couches d'hydrocarbures dont l'épaisseur est comprise entre un et quatre micromètres sont irisées, comme les flaques d'huile sur les routes. Les marées noires naturelles de faible épaisseur (entre 0,01 et 1 micromètre), ne sont constituées que de quelques dizaines de couches moléculaires, mais les liaisons chimiques sont suffisamment fortes pour que le film qu'elles forment soit très résistant. Ces couches tensioactives empêchent le vent de soulever des vagues à la surface de la mer. En l'absence de vaguelette, l'eau réfléchit la lumière presque aussi efficacement qu'un miroir, ce qui lui confère son aspect luisant. La lumière ne se réfléchit pas de la même façon sur l'eau et sur les flaques de pétrole, de sorte que, lorsque le Soleil éclaire la surface de l'océan dans des conditions favorables, ces nappes sont visibles du pont d'un bateau, mais aussi d'un avion ou même d'un satellite : les astronautes les voient lorsqu'ils observent les reflets du Soleil sur la mer.

Au centre d'un reflet, les taches sont beaucoup plus brillantes que l'eau environnante, tandis qu'aux bords du reflet, elles sont plus sombres : la plupart des rayons lumineux qui s'y réfléchissent ne parviennent pas à l'œil de l'observateur (voir la figure 4).

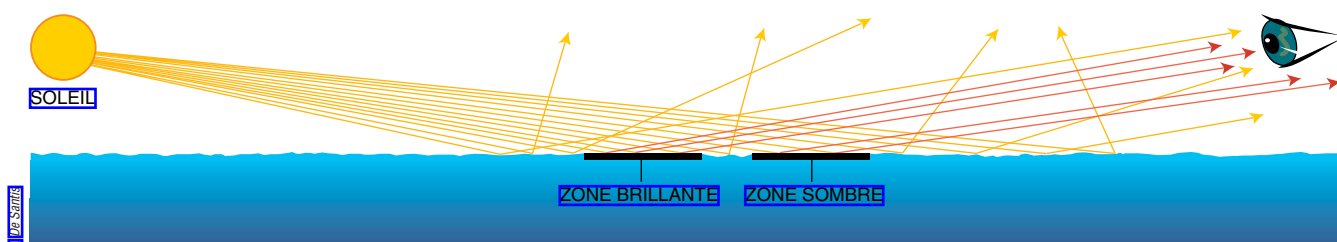
Au radar, les nappes de pétrole apparaissent également sombres, les sources d'ondes radio et les détecteurs sont en incidence rasante. Les radars embarqués sur des satellites, tel le *European Radar Satellite* ou le satellite canadien *RADARSAT*, ont repéré des traces de pétrole et suivi leur évolution dans le temps sur presque toute la surface de l'océan. On utilise parfois ces observations pour étudier les courants océaniques, car elles fournissent des informations plus détaillées que les instruments océanographiques classiques. La surveillance par satellite aide aussi les géologues à localiser les gisements de pétrole sous-marins.

Pour repérer les nappes de pétrole, on doit savoir les distinguer des autres couches tensioactives qui recouvrent l'océan par endroits et qui sont produites par le frai des poissons, par le plancton, par des végétaux... Quand elles sont concentrées par des courants



3. D'APRÈS LA PREMIÈRE ÉTUDE SYSTÉMATIQUE, les marées noires naturelles observées entre 1902 et 1909 (*en haut*) dans le golfe du Mexique étaient surtout localisées au Sud-Ouest du delta du Mississippi. Celles que l'on a découvertes récemment grâce aux techniques modernes d'observation, par satellite notamment, sont à peu près aux mêmes endroits (*en bas*), ce qui laisse supposer que de nombreux sites actifs au début du *xx^e* siècle le sont encore aujourd'hui.

4. LE REFLET DU SOLEIL observé par les astronautes qui passent au-dessus du golfe du Mexique indique plusieurs nappes de pétrole (*photographie ci-contre*). Là où la réflexion du Soleil est la plus intense, ces nappes sont très brillantes. À la périphérie de la nappe, elles sont plus sombres que les eaux environnantes. Dans le premier cas, la surface de la nappe réfléchit les rayons du Soleil, tel un miroir, vers l'observateur, tandis que, dans le second, les rayons sont réfléchis sous un angle tel qu'ils ne l'atteignent pas. La surface de l'eau environnante apparaît plus brillante, car la lumière incidente est diffusée dans plusieurs directions (certains rayons atteignent l'œil de l'observateur).



marins convergents, elles peuvent être confondues avec des nappes de pétrole. Toutefois, les instruments embarqués à bord des satellites les distinguent notamment parce que le pétrole et le gaz naturel s'échappent de sources fixes situées au bord des failles sous-marines, sur le plancher océanique. Les modèles mathématiques montrent que les gouttes de pétrole issues d'une même source située à un kilomètre de profondeur atteignent la surface de l'océan dans une même zone de quelque 100 mètres de diamètre, ce que l'on observe dans le golfe du Mexique. De plus, le pétrole atteint la surface à moins de deux kilomètres de sa source. En pratique, des détections répétées de nappes de pétrole dans une zone fixe d'une centaine de mètres de diamètre indiquent la présence d'une source de pétrole sur le fond océanique.

Pour localiser une source, encore faut-il savoir distinguer la tête de la nappe de sa queue. Si l'on observe de la fumée de cigarette, on constate que la partie la plus étroite correspond à l'origine, mais contrairement aux particules de fumée, qui ne s'attirent pas, les gouttelettes de pétrole ont tendance à fusionner, formant les nappes que l'on observe à la surface de l'eau. Dès qu'elles ont fait surface, les gouttes de pétrole s'étalent, en même temps qu'elles dérivent sous l'action du vent et des courants. En théorie, elles devraient s'étaler jusqu'à former une couche monomoléculaire, mais, en réalité, les bords des rubans sont si minces qu'ils se désagrègent. En aval de la

source, le film de pétrole mesure 0,1 micromètre d'épaisseur environ, ce qui correspond à plusieurs couches moléculaires. Les zones plus minces du film se sont effritées : la nappe est plus large à l'aplomb de sa source qu'à son extrémité, quand elle a été charriée à la surface de la mer, par les vents et les courants.

La longueur d'une nappe dépend des conditions météorologiques. Lorsque la mer est agitée, la nappe se désagrège rapidement. Par temps calme, elle atteint parfois 25 kilomètres de longueur. Le vent détermine la forme du ruban : quand sa direction varie progressivement, le ruban décrit de larges courbes, tandis que s'il change brusquement de sens, le ruban décrit des zigzag. La durée de vie de la nappe est l'intervalle de temps entre le moment où le vent change de direction et celui où le ruban change de forme. Avec mes collègues de l'Université du Texas, nous avons estimé, d'après diverses observations par satellite, que, dans la partie la plus éloignée de la source, le pétrole flotte pendant 12 à 24 heures.

Les marées noires naturelles sont une aubaine pour les océanographes qui cartographient les courants marins ou pour les compagnies pétrolières à la recherche de nouveaux gisements, mais quel est leur impact sur les organismes vivants ? Dans les années 1980, Mahlon Kennicut et son équipe, de l'Université du Texas, ont étudié la faune qui vit autour des sources d'hydrocarbures sous-marines. Ils ont recueilli divers spécimens, avec un filet de pêche.

L'un des premiers coups de filet contenait plus de 800 kilogrammes de *Calypptogena ponderosa*, une espèce de palourde géante. Pourtant, à cette profondeur, la vie sous-marine est rare. Le filet contenait aussi plusieurs dizaines de tiges brunes et fibreuses. Pensant qu'il s'agissait d'une sorte de roseau, charrié par le Mississippi, qui s'était déposé au fond du golfe, les océanographes les auraient jetées, si l'un d'eux n'avait eu l'idée de les récupérer pour tresser des paniers. En tirant les tiges, il en cassa plusieurs d'où s'écoula un liquide rouge : du sang !

Vivre du pétrole

Après avoir mené leur enquête, ils découvrirent que ces « roseaux » sont des vers vestimentifères, d'une espèce voisine de celle qui vit près des sources hydrothermales du Pacifique. Dans ces milieux, les vers vestimentifères, les palourdes géantes et une espèce de bivalves des abysses se nourrissent de l'énergie chimique libérée par les sources sous-marines d'hydrocarbures, grâce à leur symbiose avec des bactéries : ces dernières oxydent l'hydrogène sulfuré produit par d'autres bactéries (qui ne sont pas des symbiontes) à partir des hydrocarbures. Elles utilisent l'énergie de la réaction pour synthétiser des substances organiques en l'absence de lumière.

En 1986, nous avons plongé au fond du golfe du Mexique à bord d'un sous-marin de recherche. Alors que nous espérions, au mieux, trouver quelques



H. Buckel



J. P. S. 1997

5. CETTE SOURCE DE PÉTROLE SOUS-MARINE est recouverte d'un monticule d'hydrate de méthane et entourée de nombreux organismes vivant à ces grandes profondeurs (*ci-dessus*). L'hydrate de méthane est une solution solide de méthane et d'eau, qui se forme aux fortes pressions et aux basses températures. Il héberge un animal microscopique, le ver de glace (*à gauche*) découvert en 1997.

rares vers vestimentifères, nous avons trouvé une faune luxuriante. D'innombrables moules étaient agglutinées autour des sources de gaz bouillonnantes, ainsi que des bactéries, qui formaient un tapis coloré. Des poissons, des crustacés et autres invertébrés, qui vivent normalement dans des eaux moins profondes, étaient massés autour des sources où ils se nourrissaient de ces espèces exotiques.

Depuis, d'autres communautés de ce type ont été découvertes dans le golfe. Elles sont parfois si florissantes qu'elles bouchent les sources d'hydrocarbures : les sous-produits métaboliques des microbes provoquent la précipitation de carbonate de calcium, qui forme des calottes étanches au-dessus des sources. Ces organismes produiraient aussi du méthane responsable de la formation d'hydrates de méthane, des substances qui ressemblent à de la glace et se forment lorsque des molécules de méthane sont piégées dans un réseau de molécules d'eau, à haute pression et à basse température. Ces solides, qui bouchent les gazoducs, ont obligé les exploitants des plates-formes offshore à chauffer et isoler ces canalisations sous-marines à grands frais. Plus récemment, les chercheurs se sont intéressés aux hydrates de méthane qui cristallisent au fond des mers.

Quelle est la quantité de pétrole qui se déverse naturellement dans le golfe du Mexique chaque année? En supposant qu'une seule nappe mesure

environ 100 mètres de largeur et 10 kilomètres de longueur, pour une épaisseur moyenne de 0,1 micromètre, elle contiendrait à peu près 100 litres de pétrole. La durée de vie maximale d'une telle nappe étant de 24 heures, chaque source libère 100 litres de pétrole par jour.

Une pollution naturelle?

On estime que 100 sources d'hydrocarbures sont simultanément en activité dans le golfe : près de quatre millions de litres s'y déverseraient chaque année. Rappelons que l'*Exxon Valdez* a déversé à peu près la même quantité de pétrole lors de son naufrage dans le détroit du prince William, en Alaska en 1989 (soit 40 000 tonnes environ). Pour mémoire, l'*Amoco Cadiz* et l'*Érika* en ont déversé respectivement 230 000 en 1978 et 10 000 en 1999. Heureusement, l'écosystème du golfe du Mexique, où les sources sont actives depuis plus

d'un million d'années, survit à cette «pollution» pétrolière.

Les marées noires naturelles ont produit autant de pétrole et de gaz que l'industrie pétrolière n'en a extrait des gisements sous-marins. La différence d'échelle de temps explique pourquoi une marée noire naturelle fait beaucoup moins de dégâts qu'un accident pétrolier. L'existence des épanchements naturels n'excuse en aucun cas la pollution accidentelle. Alors que l'océan supporte des centaines de tonnes de pétrole déversées chaque mois, si l'hydrocarbure est répandu sous forme de gouttelettes sur des milliers de kilomètres carrés, la même quantité déversée sur une aire de nidification d'oiseaux de mer détruit inévitablement la population locale. Après certaines marées noires accidentelles, l'écosystème met des années à guérir, et certains dommages sont irréversibles. Les marées noires naturelles ne semblent pas avoir de conséquences délétères sur l'environnement marin.

Ian MACDONALD est océanographe à l'Université du Texas.

K.A. KVENVOLDEN, *Reassessment of the Rates at Which Oil from Natural Sources Enters the Marine Environment*, in *Marine Environmental Research*, vol. 10, pp. 223-243, 1983.

I.R. MACDONALD et al., *Natural Oil Slicks in the Gulf of Mexico Visible from Space*, in *Journal of Geophysical Research*,

vol. 98, n° C9, pp.16351-16364, 15 septembre 1993.

I.R. MACDONALD et al., *Remote Sensing Inventory of Active Oil Seeps and Chemosynthetic Communities in the Northern Gulf of Mexico*, in *Hydrocarbon Migration and Its Near-Surface Expression*, sous la direction de D. Schumacher et M.A. Abrams, American Association of Petroleum Geologists Memoir 66, 1996.

Les nanotubes en électronique

PHILIP COLLINS • PHAEDON AVOURIS

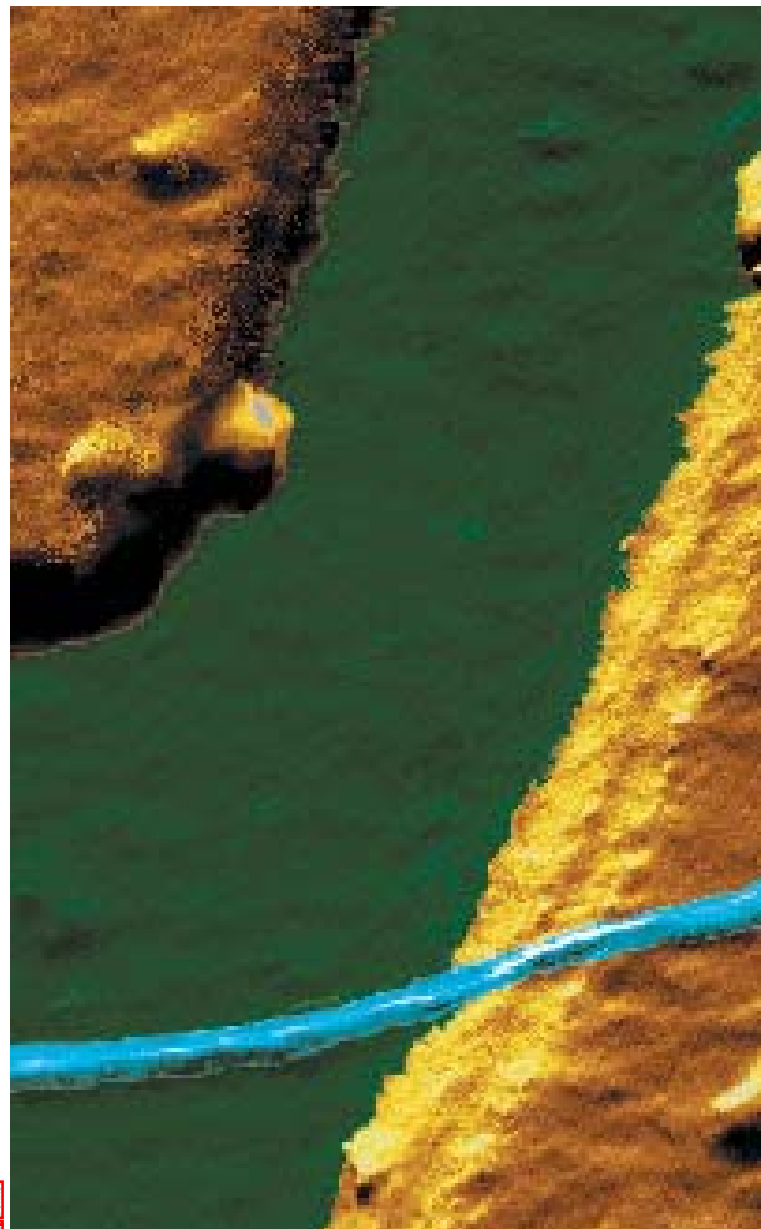
Plus résistants que l'acier, les nanotubes sont des macromolécules qui ressemblent à de longs filaments. Ils devraient améliorer la rapidité, l'efficacité et la longévité des composants électroniques.

Il y a une dizaine d'années, Sumio Iijima, du Laboratoire de recherche fondamentale de la Société NEC, à Tsukuba, au Japon, observa, à l'aide d'un microscope électronique, de curieux filaments «nanoscopiques» au sein de dépôts de suie. Ces macromolécules, observées pour la première fois, étaient extrêmement longues et fines, constituées de carbone pur et aussi ordonnées que des cristaux. Nommées «nanotubes», elles sont étudiées par de nombreuses équipes de recherche.

Les propriétés étonnantes des nanotubes, telles leur élasticité, leur résistance et leur stabilité thermique élevées, font aussi rêver les ingénieurs qui ont imaginé des projets – plus ou moins réalistes – de robots microscopiques, de carrosseries d'automobiles résistant aux chocs ou encore d'immeubles insensibles aux tremblements de terre. Les premières applications des nanotubes viennent d'apparaître et elles reposent sur une propriété différente de celles mentionnées : elles tirent parti des propriétés électriques des nanotubes. Les voitures de *General Motors* sont déjà équipées de pièces en plastique qui contiennent des nanotubes. Pendant l'opération de peinture, un courant électrique circule ainsi dans ces pièces, et la peinture y adhère plus facilement. Par ailleurs, des dispositifs d'éclairage et d'affichage contenant des nanotubes sont sur le point d'être commercialisés.

A long terme, ce seront peut-être les propriétés électroniques des nanotubes qui engendreront les applications les plus importantes. Les nanotubes de carbone pourraient remplacer le silicium dans les circuits électroniques à l'échelle moléculaire, où le silicium et les autres semi-conducteurs cessent de fonctionner. Aujourd'hui, les dimensions des transistors contenus dans les puces électroniques sont inférieures à 200 nanomètres (200 milliardièmes de mètre), soit environ la taille de 400 atomes accolés. Jusqu'où pourra-t-on miniaturiser ces composants ? Les techniques classiques se heurteront bientôt à des limites physiques incontournables.

1. LES MICROPUCES DU FUTUR nécessiteront des fils et des transistors plus petits que ceux produits aujourd'hui par photolithographie. Des macromolécules conductrices de carbone s'auto-assemblent et forment des nanotubes (en haut, à gauche). Elles sont actuellement testées comme fils ultrafins (au centre) et comme canaux dans des transistors à effet de champ (à droite).



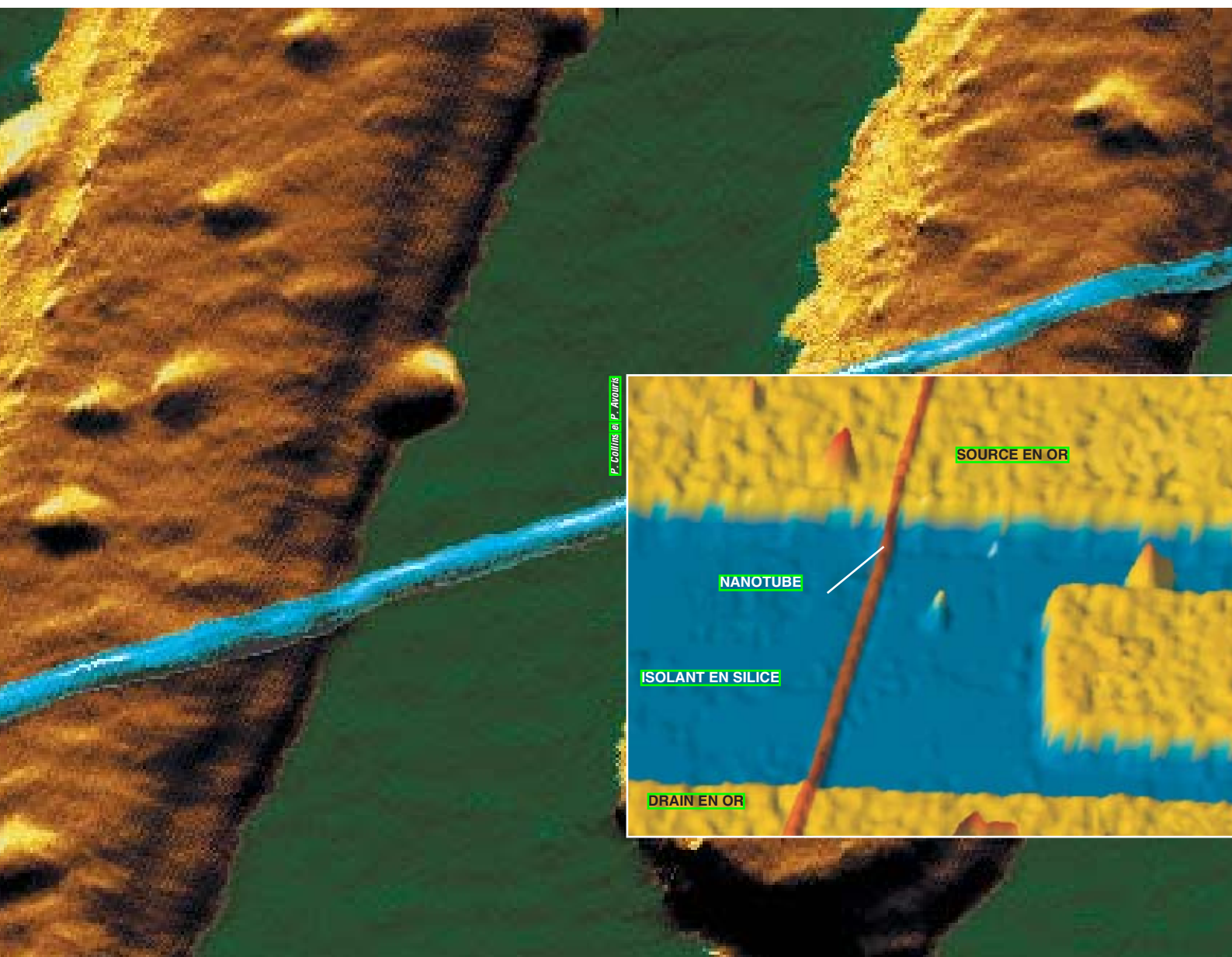
Pourtant, sous la pression économique, les ingénieurs cherchent à réduire toujours plus la taille des dispositifs micro-électroniques, car leur vitesse, leur densité et leur rendement augmentent lorsque leur taille diminue. Des filaments en nanotubes et des dispositifs de quelques dizaines de nanomètres contenant des nanotubes pourraient devenir les composants des circuits électroniques de demain, plus rapides et consommant moins d'énergie que ceux d'aujourd'hui.

Les premiers nanotubes de carbone observés par S. Iijima, en 1991, étaient des tubes à parois multiples : chacun contenait plusieurs cylindres creux imbriqués les uns dans les autres comme des poupées russes et constitués d'atomes de carbone. Deux ans plus tard, S. Iijima et Donald Bethune de la Société IBM créèrent, l'un et l'autre, des nanotubes à paroi unique, constitués d'une seule couche d'atomes de carbone. Ces deux types de tubes sont fabriqués de la même façon et ont des propriétés semblables ; ils sont notamment très longs et étroits. Les nanotubes à paroi unique, par exemple, ont un diamètre de un nanomètre environ sur une longueur de plusieurs milliers de nanomètres.

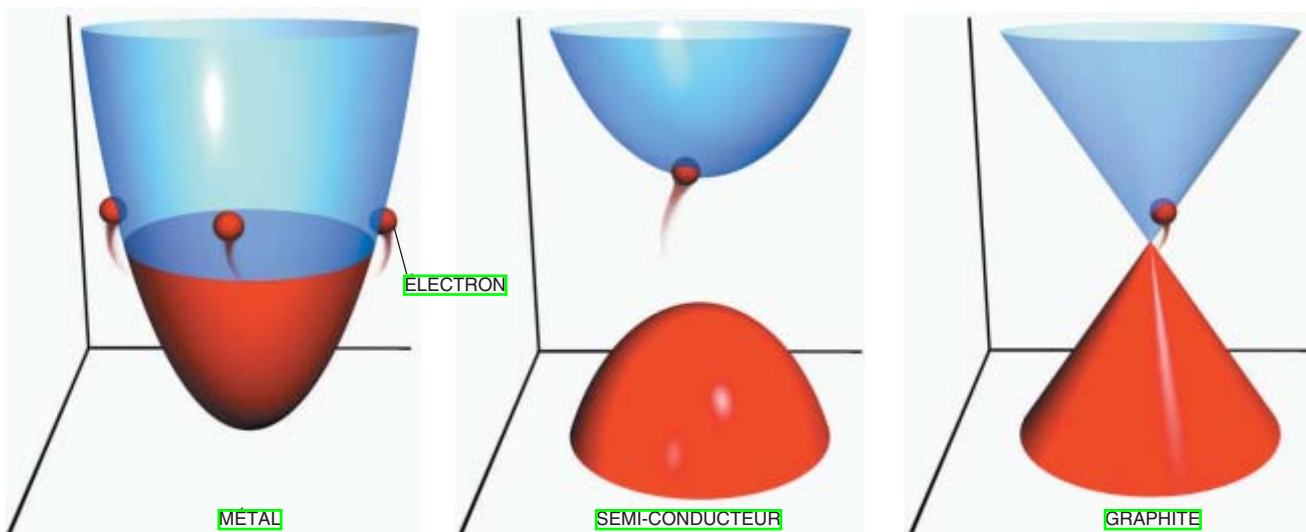
La stabilité de ces tubes résulte de la force avec laquelle les atomes de carbone sont liés les uns aux autres, force responsable de la dureté du diamant. Dans le diamant, les atomes de carbone sont disposés sur les sommets de tétraèdres à quatre faces, tandis que dans les nanotubes, les atomes sont arrangés en anneaux hexagonaux, comme dans le graphite ou dans un grillage en fil de fer. Un nanotube ressemble à une feuille de graphite dont on aurait fait un cylindre sans soudure. On ignore comment les atomes se condensent pour former des nanotubes (voir l'encadré page 73), mais il semble que les tubes grandissent par adjonction d'atomes aux extrémités, comme des mailles qui allongent la manche d'un pull-over tricoté à la main.

Un matériau exotique

Quel que soit leur mode de formation, les nanotubes ont une composition et une géométrie qui les rendent précieux en électronique. Le graphite lui-même est déjà un matériau insolite. Alors que la plupart des conducteurs

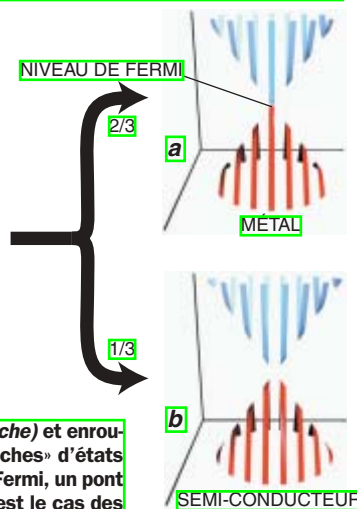
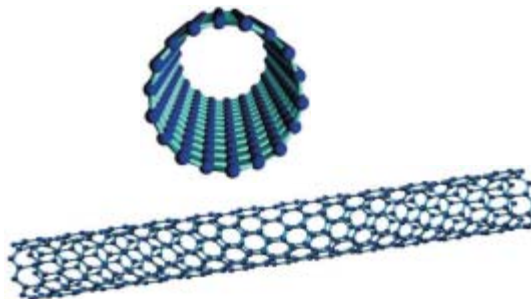
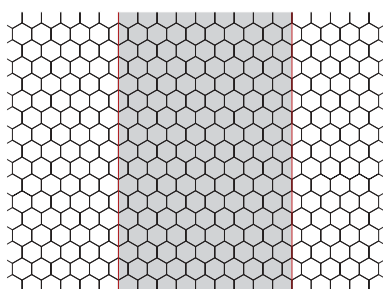


2. LE COMPORTEMENT ELECTRIQUE DES NANOTUBES.

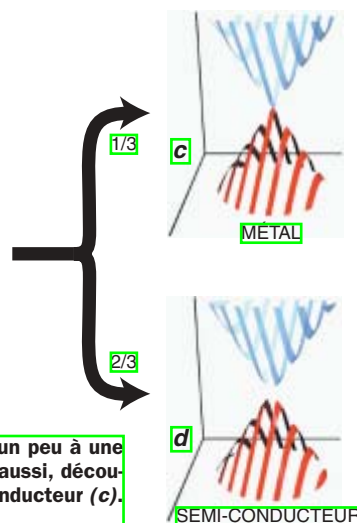
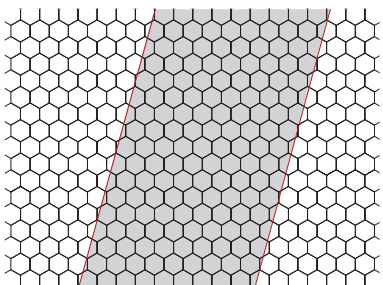


LES PROPRIETES ELECTRIQUES d'un matériau dépendent de la séparation entre les états d'énergie remplis par des électrons (*en rouge*) et les états vides (*en bleu clair*). Les métaux conduisent facilement l'électricité, car de nombreux électrons sont susceptibles d'accéder facilement aux états de conduction supérieurs. Dans les semi-conducteurs, les électrons ont besoin d'un

apport supplémentaire d'énergie (de la lumière ou un champ électrique) pour franchir la bande d'énergie interdite qui les sépare du premier état de conduction disponible. Le graphite, une des formes du carbone, est un semi-métal qui conduit mal le courant, car, sans apport externe d'énergie, seul un petit nombre d'électrons peut accéder à un état de conduction.



LES NANOTUBES DROITS ressemblent à une bande rectiligne découpée dans une feuille de graphite (*à gauche*) et enroulée pour former un tube (*au centre*). La géométrie des nanotubes cantonne les électrons à quelques «tranches» d'états d'énergie du graphite (*à droite*). Selon le diamètre du tube, l'une de ces tranches peut inclure le niveau de Fermi, un pont étroit entre les états occupés et les états vides. Dans ce cas, les nanotubes sont métalliques (*a*), ce qui est le cas des deux tiers d'entre eux. Quand le niveau de Fermi n'est pas inclus, les nanotubes sont semi-conducteurs (*b*).



LES NANOTUBES TORSADÉS, coupés en oblique dans la feuille de graphite (*à gauche*) ressemblent un peu à une colonne torsadée (*au centre*). Les tranches d'états permises pour les électrons (*à droite*) sont, elles aussi, découpées en oblique, de sorte qu'un tiers seulement de ces nanotubes inclut le niveau de Fermi et est conducteur (*c*). Les deux tiers des nanotubes torsadés sont semi-conducteurs (*d*).

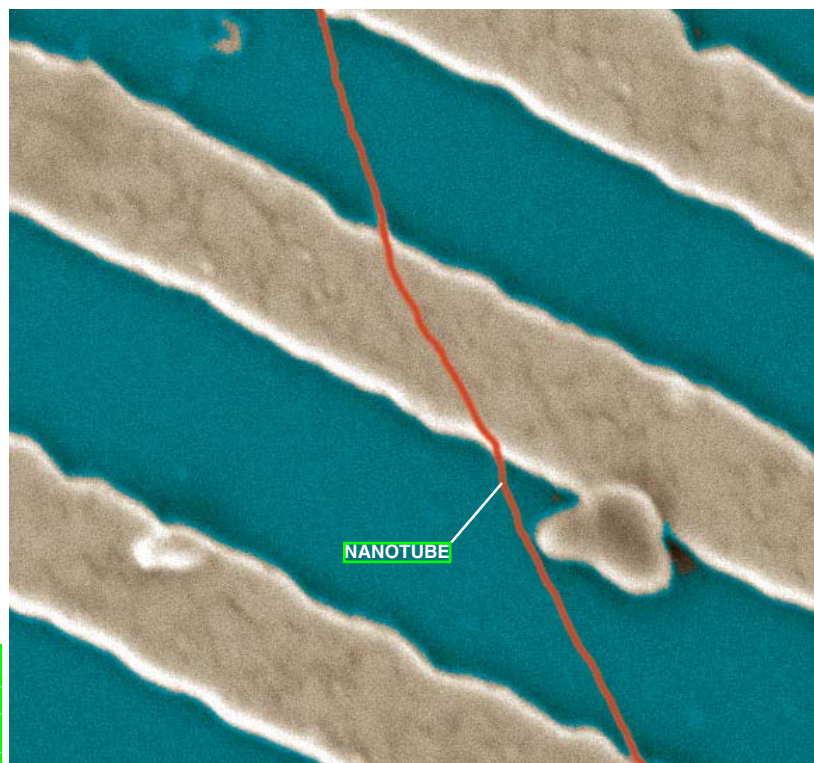
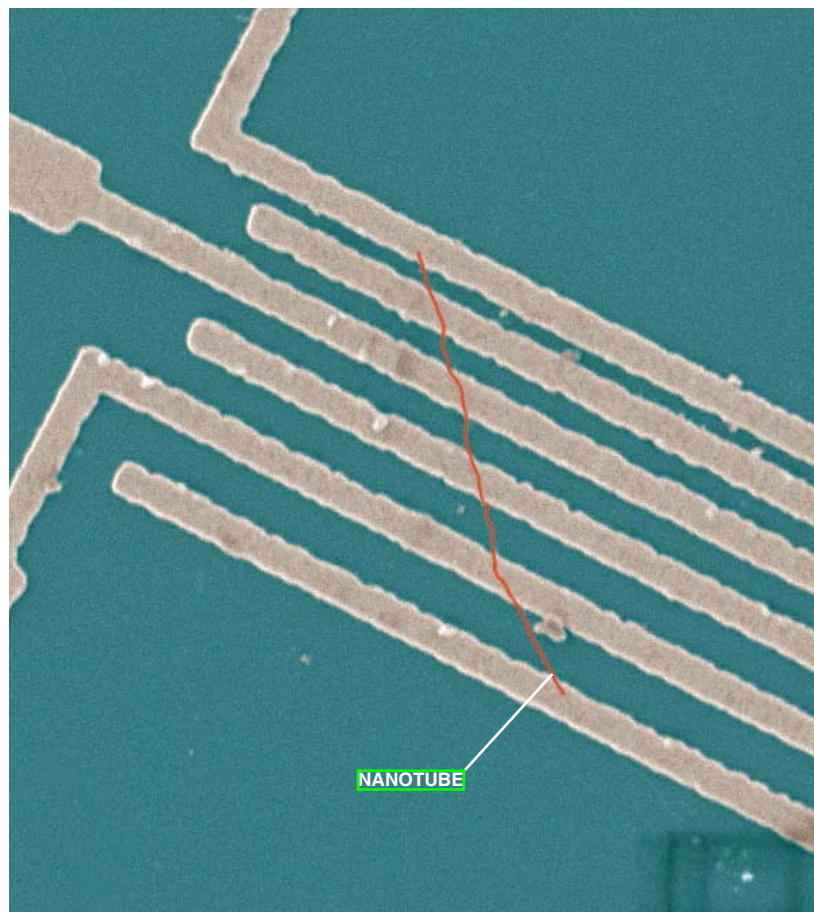
électriques sont classés, soit comme des métaux, soit comme des semi-conducteurs, le graphite est l'un des rares semi-métaux, intermédiaires entre les deux classes. Combinant les propriétés semi-métalliques du graphite et les comportements quantiques des matériaux de très petites dimensions, les nanotubes de carbone sont des conducteurs exotiques.

Selon un grand principe de la mécanique quantique, les électrons se comportent à la fois comme des ondes et comme des particules, et les ondes électroniques peuvent se combiner ou s'annuler. Ainsi, un électron qui se propage sur la circonférence d'un nanotube peut «s'annuler» ; seuls subsistent les électrons qui ont une longueur d'onde adéquate. Parmi toutes les longueurs d'onde électroniques, c'est-à-dire parmi les états électroniques autorisés, seules quelques longueurs d'onde possibles dans une feuille de graphite sont conservées lorsque la feuille est enroulée pour former un nanotube. Ces dernières dépendent de la circonférence du nanotube et varient selon que le nanotube est torsadé ou non.

La suppression de quelques états électroniques dans un métal ou dans un semi-conducteur simple ne crée pas d'effets inattendus. En revanche, les semi-métaux sont des matériaux beaucoup plus sensibles et révèlent des propriétés étonnantes. Dans une feuille de graphite, un état électronique particulier, que les physiciens nomment le niveau de Fermi, confère au graphite sa conductivité : les électrons qui ne sont pas dans cet état restent immobiles. Un tiers seulement de tous les nanotubes torsadés par exemple ont un diamètre et un degré de torsion tels que le niveau de Fermi fait partie des états permis. Ce sont de vrais nanotubes métalliques. Les autres nanotubes sont des semi-conducteurs. Cela signifie que, comme le silicium, ils conduisent le courant, mais à condition qu'on leur confère de l'énergie. Excités par la lumière ou par une tension, les électrons des états de valence passent alors dans des états de conduction où ils se déplacent librement : le courant circule. La quantité d'énergie nécessaire dépend de l'écart entre le niveau le plus haut de la bande de valence et le niveau le plus bas de la bande de conduction ; cet écart est nommé bande d'énergie interdite ou «gap» du semi-conducteur.

Les nanotubes de carbone n'ont pas tous le même gap, car l'ensemble des états de valence et des états de conduction permis diffère pour chaque circonférence. Les nanotubes de petit diamètre ont très peu d'états d'énergie autorisés et leur gap est élevé. Lorsque le diamètre du nanotube augmente, les états permis sont de plus en plus nombreux et le gap diminue. Ainsi, selon leur diamètre, les nanotubes ont des gaps compris entre zéro (comme dans un métal) et celui du silicium (1,14 électronvolt). Aucun autre matériau ne permet d'ajuster ainsi le gap. Malheureusement, les techniques actuelles de fabrication des nanotubes ne garantissent pas encore la production de nanotubes de type et de diamètre contrôlés.

Dans les nanotubes à parois multiples, chaque couche a une géométrie légèrement différente de celles des autres. Si nous pouvions maîtriser la composition de chaque couche, nous fabriquerions des tubes à parois multiples auto-isolants qui transporteraient plusieurs signaux à la fois, comme des câbles coaxiaux nanoscopiques. Nous n'en sommes pas là, mais nous avons déjà incorporé des nanotubes dans des circuits et commencé à explorer leurs propriétés.



3. ULTRAFINS, les nanotubes de carbone pourraient libérer de l'espace dans les microprocesseurs. Ils pourraient aussi éviter la surchauffe et l'instabilité engendrées lorsque l'on miniaturise les circuits par des procédés classiques. Ici, les lignes tracées par photolithographie (en gris) semblent gigantesques par rapport au nanotube (en rouge) dont le diamètre mesure à peine plus d'un nanomètre.



4. LES PREMIERS DISPOSITIFS ÉLECTRONIQUES qui utilisent des nanotubes sont des lampes à vide pour l'éclairage (à gauche) et un écran plat en couleurs (à droite). Ces produits exploitent la capacité des nanotubes d'émettre des électrons à des tensions relativement basses, ce qui se traduit par une économie d'énergie et une durée de vie supérieure.

Les nanocircuits

Plusieurs groupes de recherches, dont le nôtre, ont réussi à mettre au point des dispositifs électroniques qui contiennent des nanotubes de carbone. Dans le transistor à effet de champ que nous avons élaboré, des nanotubes semi-conducteurs à paroi unique constituent le canal où s'écoulent les électrons entre deux électrodes métalliques (voir la figure 1). Le courant circulant dans ce canal peut être activé ou interrompu au moyen d'une troisième électrode (c'est l'électrode de commande, nommée grille). Les dispositifs contenant des nanotubes fonctionnent à température ambiante et ont des caractéristiques électriques semblables à celles des dispositifs en silicium classiques. Nous avons mesuré, par exemple, que, selon la tension appliquée à la grille, la conductivité du nanotube-canal varie d'un facteur égal à un million, ce qui est comparable aux transistors en silicium : le transistor remplit le rôle d'un interrupteur. Toutefois, en raison de sa taille minuscule, le transistor à nanotube est un interrupteur plus rapide et qui utilise moins d'énergie qu'un dispositif en silicium. Un nanocommutateur pourrait fonctionner à une fréquence supérieure à un térahertz, soit 1 000 fois plus rapidement que les processeurs disponibles aujourd'hui.

La grande variété de gaps et de conductivités des nanotubes ouvre la voie à d'autres nanodispositifs. Par exemple, nous avons récemment étudié des jonctions entre nanotubes métalliques et semi-conducteurs. Nous avons montré que ces jonctions se comportent comme des diodes, en ne laissant passer le courant que dans un seul sens. Par ailleurs, des combinaisons de nanotubes de gaps différents pour-

raient se comporter comme des diodes électroluminescentes et peut-être même comme des lasers nanoscopiques. Finalement, il est aujourd'hui possible de fabriquer un nanocircuit qui a des fils, des commutateurs et des éléments de stockage entièrement constitués de nanotubes et d'autres molécules. Les nanotechnologies fournissent des versions minuscules de dispositifs classiques, mais aussi de nouveaux dispositifs fondés sur des effets quantiques, comme nous l'expliquerons plus loin.

Aujourd'hui, les nanocircuits sont des pièces uniques, difficiles à fabriquer. La «recette» pour connecter un nanotube à des électrodes métalliques varie selon les groupes de recherche. Elle combine la lithographie traditionnelle pour la fabrication des électrodes, et des outils de plus haute résolution, tels des microscopes à force atomique, qui permettent de localiser et même de positionner les nanotubes. Nous sommes loin de la production automatisée et rapide des micropuces de silicium utilisées dans toute l'électronique. Avant d'élaborer des circuits plus complexes contenant des nanotubes, nous devons trouver comment maîtriser la croissance des nanotubes, leur forme, leur taille ou encore leur orientation. Des équipes de recherche fabriquent des nanotubes là où elles le souhaitent, en déposant de petites quantités de nickel, de fer ou de catalyseurs sur un substrat. D'autres obtiennent la fusion des nanotubes avec des nanofils de silicium, réalisant ainsi des connexions avec des circuits classiques.

En électronique, les connexions sont un des nerfs de la guerre. Les ingénieurs cherchent en effet à réduire le diamètre des fils de connexion, pour optimiser la surface des puces. Les

fils de connexion classiques sont métalliques et ont un diamètre d'environ 250 nanomètres, mais deux obstacles empêchent de les miniaturiser davantage. D'abord, on ne connaît aucun moyen efficace pour dissiper la chaleur dégagée par les dispositifs, et si on les entasse, ils surchauffent rapidement. Enfin, à mesure que les fils métalliques s'amincissent, les paquets d'électrons qui s'y propagent deviennent assez énergétiques pour heurter les atomes métalliques, et les fils «grillent».

En théorie, les nanotubes pourraient éviter l'un et l'autre obstacle. Des expériences préliminaires ont montré que des nanotubes de carbone conduiraient la chaleur presque aussi bien que le diamant ou le saphir. Ainsi, des nanotubes pourraient refroidir des réseaux très denses de dispositifs électroniques. Comme les liaisons entre les atomes de carbone sont beaucoup plus fortes que dans un métal, les nanotubes pourraient transporter d'énormes quantités de courant électrique. Les mesures les plus récentes montrent qu'un milliard d'ampères pourrait circuler dans un faisceau de nanotubes de un centimètre carré de section. Avec de telles intensités de courant, des fils de cuivre ou d'or de la même section seraient vaporisés!

Quand les nanotubes scintillent

Les nanotubes de carbone ont une autre propriété que les ingénieurs commencent à exploiter. Les nanotubes, dressés sur leur extrémité et électrifiés, réagissent en effet comme des miniparatonnerres, concentrant le champ électrique sur leur pointe. Toutefois, tandis qu'un paratonnerre conduit un arc électrique du ciel vers le sol, un nanotube émet des électrons par sa pointe à une vitesse prodigieuse. Ce comportement est nommé l'émission de champ. Comme ils sont très pointus, les nanotubes émettent des électrons à des tensions inférieures à celles des électrodes classiques, ils fonctionnent longtemps sans dommage, parce que les atomes de carbone sont solidement liés.

Les écrans plats à émission de champ pourraient remplacer les moniteurs de télévisions et d'ordinateurs à tubes cathodiques, et pourraient concurrencer les écrans à cristaux liquides : ils sont lumineux, minces et

Les trois techniques de fabrication des nanotubes

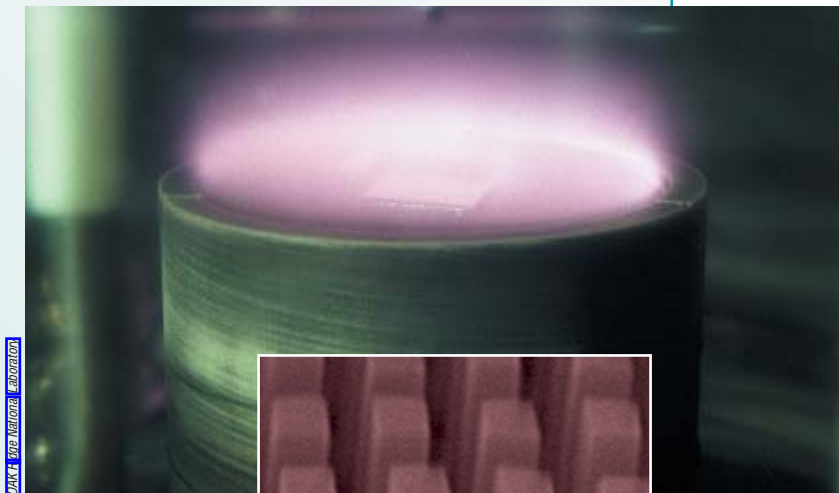
Le Japonais Sumio Iijima est le premier à avoir observé un nanotube, mais il n'est sans doute pas le premier à en avoir fabriqué un. Les hommes de Néandertal ont probablement fabriqué, sans le savoir, de minuscules quantités de nanotubes, dans les feux qui chauffaient leurs cavernes. Séparés par la chaleur, les atomes de carbone se recombinaient de différentes façons dans la suie, certains sous forme de pâte amorphe

et d'autres sous forme de sphères – de ballons de football – ou de longs cylindres nommés nanotubes. Les physiciens ont découvert trois techniques pour fabriquer de la suie contenant une proportion notable de nanotubes. Jusqu'à présent, cependant, ces trois méthodes produisent des mélanges de nanotubes de longueur et de torsion variées, et qui ont de nombreux défauts.

1. Une grosse étincelle

En 1992, Thomas Ebbesen et Pulickel Ajayan, du Laboratoire de recherche fondamentale de la Société NEC à Tsukuba, au Japon, ont publié la première méthode pour fabriquer des quantités macroscopiques de nanotubes. Son principe rappelle un peu la méthode du docteur Frankenstein pour donner vie : il consiste à placer deux barres de graphite à quelques millimètres l'une de l'autre et à leur appliquer une forte tension. Lorsqu'une étincelle de 100 ampères jaillit entre les deux barres, le carbone se vaporise en un plasma chaud (à droite) ; certaines molécules se recombinent sous forme de nanotubes.

- **Rendement** : 40 pour cent en masse.
- **Avantages** : en augmentant la température et en ajoutant des catalyseurs métalliques au graphite, on obtient des nanotubes dont certains sont dépourvus de défauts structuraux.
- **Inconvénients** : les tubes ont tendance à être courts ; leur taille ainsi que leur orientation sont aléatoires.



MARK - SHUTTERSTOCK

2. Un gaz chaud

Morinubo Endo, de l'Université Shinshu à Nagano, au Japon, fut le premier à fabriquer des nanotubes avec la méthode dite de dépôt par vapeur chimique. Cette recette est également assez simple. Il suffit de placer un substrat dans un four, de le chauffer à 600 °C et d'ajouter lentement un gaz carboné, tel le méthane. Lorsque le gaz se décompose, il libère des atomes de carbone, qui se recombinaient sur le substrat sous la forme de nanotubes. Jie Liu et ses collègues de l'Université Duke ont récemment inventé un catalyseur poreux qui convertirait presque tout le carbone du gaz en nanotubes. En imprimant sur le substrat des motifs de particules de catalyseur, Hongjie Dai et ses collègues de l'Université de Stanford ont pu contrôler les sites où se forment les tubes (à droite) ; ils essaient de combiner cette croissance contrôlée avec la technique classique de croissance du silicium.

- **Rendement** : de 20 à presque 100 pour cent.
- **Avantages** : le dépôt par vapeur chimique est la plus simple des trois méthodes pour une éventuelle production industrielle. Les nanotubes obtenus sont assez longs pour être utilisés dans des composites.
- **Inconvénients** : les nanotubes ont le plus souvent des parois multiples et sont criblés de défauts. Leur résistance est dix fois plus faible que celle des tubes fabriqués par arc électrique.

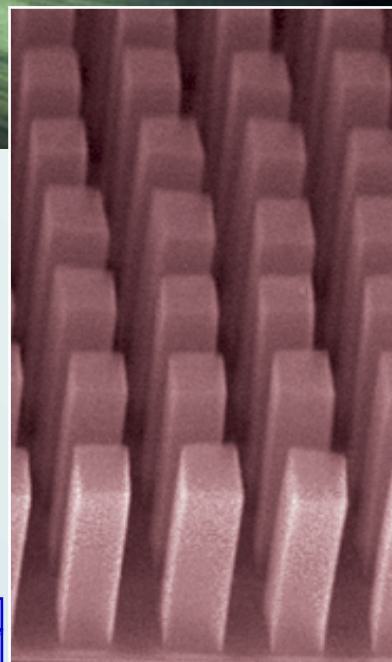
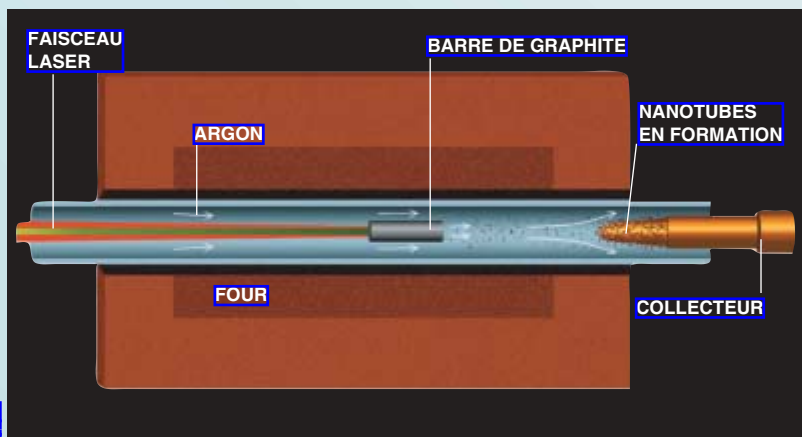


PHOTO 123



3. Un bombardement laser

Richard Smalley et ses collègues de l'Université Rice vaporisent des barres de graphite avec des lasers intenses, et les molécules de carbone se recombinaient sous forme de nanotubes (à gauche). Ils cherchent aujourd'hui un catalyseur qui favoriserait la production de grandes quantités de nanotubes à paroi unique.

- **Rendement** : jusqu'à 70 pour cent.
- **Avantages** : cette méthode produit en majorité des nanotubes à paroi unique, et leur diamètre est contrôlé par la température de réaction.
- **Inconvénients** : la plus coûteuse, à cause des lasers.

consomment peu d'énergie. Toutefois, les dispositifs à émission de champ qui existent restent fragiles : les nanotubes pourraient bientôt les remplacer.

Pour fabriquer un émetteur de champ avec des nanotubes, il suffit de les mélanger en une pâte composite avec des plastiques, de les étaler sur une électrode, et d'appliquer une ten-

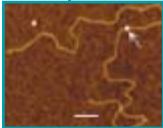
sion. Certains des nanotubes de la couche s'orientent vers l'électrode opposée et émettent des électrons. Divers groupes de recherches ont déjà découvert plusieurs façons de faire croître des grappes de nanotubes verticaux en petites grilles régulières. Lorsque la densité est optimale, ces nanotubes émettent plus d'un ampère

par centimètre carré, ce qui est suffisant pour faire scintiller le phosphore d'un écran et même pour actionner des relais à micro-ondes, et des commutateurs à haute fréquence dans des antennes de base utilisées pour la téléphonie cellulaire.

Deux sociétés ont déjà mis au point des produits utilisant des nanotubes

Indices de faisabilité
0 = science-fiction
2 = démontré
4 = prêt pour la commercialisation

D'autres utilisations pour les nanotubes

	LE PRINCIPE	LES OBSTACLES	LA FAISABILITÉ
 1. SONDES GÉNÉTIQUES ET CHIMIQUES Brin d'ADN marqué	Un microscope à force atomique dont la pointe se réduit à un nanotube détecte un brin d'ADN et identifie les marqueurs qui repèrent les différents variants d'un même gène.	C'est la seule méthode qui permet de repérer les constituants de la surface, mais, pour l'instant, elle n'a été utilisée que pour des fragments d'ADN relativement petits.	3
 2. MÉMOIRE MÉCANIQUE Mémoire non volatile	Des nanotubes alignés sur un support ont été testés comme dispositif de mémoire binaire : en appliquant une tension, certains tubes entrent en contact et conservent cette position «marche» ; d'autres se séparent, ce qui correspond à la position «arrêt».	La vitesse de commutation de ce dispositif n'a pas été mesurée, mais elle se limite probablement à un mégahertz, ce qui est beaucoup plus lent que les puces à mémoire classiques.	2
 3. NANOPINCES Pinces de cinq micromètres de long	Deux nanotubes, attachés à des électrodes sur une tige de verre, forment une pince, qui s'ouvre ou se ferme en fonction de la tension appliquée. Ces pinces sont utilisées pour saisir et déplacer des objets de quelque 500 nanomètres.	Les nanotubes sont si «collants» que la plupart des objets pincés ne peuvent plus être relâchés. Il existe des techniques plus simples pour déplacer ces nanoobjets.	2
 4. CAPTEURS SUPERSENSIBLES L'oxygène se fixe sur les tubes	La résistance électrique des nanotubes semi-conducteurs varie quand ils sont exposés à des alcalins, des halogènes et divers éléments des gaz à température ambiante. On pourrait exploiter cette propriété des nanotubes pour réaliser de nouveaux capteurs chimiques sensibles.	La sensibilité des nanotubes n'est pas spécifique à un élément. Ils pourraient être incapables de distinguer un élément chimique d'un autre.	3
 5. STOCKAGE D'HYDROGÈNE ET D'IONS Des atomes dans un cœur creux	Les nanotubes stockent de l'hydrogène ou des ions lithium dans leur cœur creux et pourraient être utilisés dans des batteries ayant une durée de vie supérieure à celles existantes.	Le stockage maximal de l'hydrogène obtenu jusqu'à présent n'excède pas 6,5 pour cent de l'espace disponible, ce qui est insuffisant pour que ces cellules soient rentables. Des tests préliminaires avec les ions lithium sont en cours.	1
 6. MICROSCOPES PLUS PUISSANTS Anticorps anti-immunoglobulines	Fixés à la pointe d'une sonde de microscope, des nanotubes améliorent la résolution latérale de l'instrument d'un facteur 10, ce qui facilite l'observation des protéines et d'autres molécules.	Bien que disponible dans le commerce, ce dispositif est fabriqué à l'unité. Les nanotubes n'améliorent pas la résolution verticale, mais ils détectent des reliefs auparavant invisibles dans des nanostructures.	4
 7. MATÉRIAUX SUPER-RÉSISTANTS Test de pression	Les nanotubes ont une élasticité et une résistance élevées. Un matériau composite contenant des nanotubes pourrait être utilisé dans les carrosseries de voitures qui «rebondiraient» sous un choc, ou des bâtiments qui oscilleraient sans s'écrouler lors d'un tremblement de terre.	Les nanotubes coûtent encore 10 à 1 000 fois plus cher que les fibres de carbone utilisées dans les composites. En outre, ils sont si fins qu'ils risquent de ne pas rester en place dans la matrice.	0

Du fil en nanotubes

Des câbles d'une extrême résistance, des ascenseurs dans l'espace, des muscles artificiels... Ces quelques exemples figurent parmi les nombreuses réalisations auxquelles les nanotubes de carbone font rêver. Ils sont 100 fois plus résistants et six fois plus légers que l'acier, ce qui les rend intéressants pour la fabrication de câbles et de matériaux composites. Ils se déforment sous l'effet d'un champ électrique et, inversement, produisent de l'énergie électrique lorsqu'ils sont déformés. Des muscles artificiels en nanotubes seraient plus résistants que les muscles humains et plus rapides que les systèmes artificiels actuels. Il serait même possible de fabriquer des drapeaux de nanotubes qui, à la place des éoliennes, produiraient du courant en se déformant sous l'effet du vent.

Ainsi, les laboratoires du monde entier tentent de maîtriser cette nouvelle forme du carbone. Les principaux obstacles proviennent des impuretés et de la difficulté à mettre en forme le matériau brut issu de la synthèse, une suie fragile et délicate à manipuler. On mélange cette suie à des polymères pour faire des fibres ou des matériaux composites, plus pratiques. Cependant, ces matériaux bénéficient peu des propriétés des nanotubes, car les concentrations en nanotubes qui y sont incorporées sont faibles. On disperse alors la suie de départ dans un solvant, puis on la sèche sur une membrane de filtration ; on obtient des galettes qui ressemblent à du papier de nanotubes enchevêtrés. Ce papier, bien que peu dense et relativement fragile, a d'étonnantes capacités pour la réalisation de muscles artificiels. Récemment, des films de nanotubes alignés par de forts champs magnétiques et des fibres de nanotubes alignés par un procédé électrophorétique ont été réalisés. L'alignement des nanotubes est un progrès majeur pour les applications qui reposent sur les propriétés mécaniques ou les propriétés de transport électrique et thermique des nanotubes. Toutes ces techniques restent lentes et difficiles à reproduire à grande échelle. Au Centre de recherche Paul Pascal (CRPP/CNRS), à Bordeaux, nous avons mis au point une

nouvelle méthode, brevetée en février 2000, pour assembler et aligner les nanotubes sous forme de fibres très longues. Cette méthode n'a pas d'équivalent à l'heure actuelle, car elle permet de « filer » les nanotubes de façon simple et rapide en production continue. Les nanotubes sont hydrophobes (ils repoussent l'eau), de sorte



Nœud formé avec une fibre de nanotubes. Le rayon de la fibre mesure environ 15 micromètres.

que, placés dans l'eau, ils se dispersent en présence d'un tensio-actif (un détergent). La suspension obtenue est ensuite injectée en continu dans une solution visqueuse qui s'écoule et contient un polymère soluble dans l'eau. Ce polymère déstabilise la suspension et conduit à l'aggrégation des nanotubes sous forme de rubans fins qui croissent à des vitesses de plusieurs kilomètres par heure. Ces rubans, de quelques dixièmes de millimètres de largeur, sont constitués de nanotubes enchevêtrés qui ont une orientation préférentielle, due à l'écoulement de la suspension.

Lorsque ces rubans sont sortis de l'eau, ils se contractent et sèchent pour former des fibres denses, assimilables à du fil, de plusieurs micromètres de diamètre. Les fils réalisés dans notre laboratoire n'ont une longueur que de quelques dizaines de centimètres, mais ils pourraient, en principe, être obtenus sur des kilomètres avec des dispositifs proches des dispositifs industriels de filage de fibres plastiques ou textiles. Les propriétés mécaniques du fil de nanotubes sont en cours d'optimisation. Nous faisons notamment varier le degré d'enchevêtrement, l'alignement et l'adhésion des nanotubes. D'ores et déjà, ce fil présente une grande résistance à la torsion : quand on y fait un nœud et qu'on tire sur ses deux extrémités, les fibres de nanotubes résistent bien, tandis que la majorité des fibres de carbone se rompent dans ces conditions. Elles pourraient bientôt concurrencer les fibres de carbone, de polymères ou de métaux. D'ores et déjà, nous collaborons avec la Société américaine *Honeywell* pour fabriquer des muscles artificiels à partir de ces nouvelles fibres. Les performances que nous avons déjà obtenues dépassent celles du papier de nanotubes. Par ailleurs, la Société *Nanoleedge* a été récemment créée à Montpellier pour valoriser la technique de synthèse par arc électrique des nanotubes de carbone maîtrisée par le Groupe de dynamique des phases condensées (CNRS-Université Montpellier 2) ; cette société va acquérir une licence de notre brevet pour commercialiser des fibres de nanotubes.

Philippe POULIN, Centre de recherche Paul Pascal et
Brigitte VIGOLO, Université Bordeaux I



Un ruban de nanotubes de carbone a été plié. On l'a observé entre polariseurs et analyseurs optiques croisés. Les couleurs varient en fonction de l'orientation du ruban ; cette variation reflète une structure organisée : les nanotubes ont une orientation préférentielle au sein du ruban.

Les propriétés des nanotubes de carbone

PROPRIÉTÉ	NANOTUBES À PAROI UNIQUE	POUR MÉMOIRE
 TAILLE	0,6 à 1,8 nanomètre de diamètre.	La lithographie par faisceau électronique peut créer des lignes de 50 nanomètres de large et de quelques nanomètres d'épaisseur.
 DENSITÉ	1,33 à 1,40 gramme par centimètre cube.	L'aluminium a une densité de 2,7 grammes par centimètre cube.
 RÉSISTANCE	45 milliards de pascals.	Les alliages en acier les plus résistants se brisent à environ deux milliards de pascals.
 ELASTICITÉ	Ils peuvent être fortement courbés sans déformation irréversible.	Les métaux et les fibres de carbone se fracturent au niveau des limites entre les grains.
 CAPACITÉ DE TRANSPORT DU COURANT	Estimée à un milliard d'ampères par centimètre carré.	Les fils de cuivre grillent à environ un million d'ampères par centimètre carré.
 ÉMISSION DE CHAMP	Ils peuvent activer le phosphore à une tension comprise entre 1 à 3 volts quand les électrodes sont éloignées de un micromètre.	Des pointes de molybdène requièrent des champs électriques de 50 à 100 volts par micromètre et ont des durées de vie très limitées.
 TRANSMISSION DE LA CHALEUR	Elle serait de 6 000 watts par mètre et par kelvin à température ambiante.	Un diamant quasi pur transmet 3 320 watts par mètre et par kelvin.
 STABILITÉ THERMIQUE	Stables jusqu'à 2 800 °C dans le vide, 750 °C dans l'air.	Les fils métalliques des microprocesseurs fondent entre 600 et 1 000 °C.
 COUT	5 000 francs par gramme.	L'or valait 70 francs le gramme en octobre 2000.

L'ÉQUIPE CARBONE

de carbone comme émetteurs de champ. La Société *Ise Electronics*, à Ise au Japon, utilise des composites de nanotubes pour fabriquer des lampes à vide. Elles existent en six couleurs, sont deux fois plus lumineuses, ont une durée de vie supérieure et consomment dix fois moins d'énergie que les ampoules classiques. Le premier prototype a fonctionné pendant plus de 10 000 heures et fonctionne toujours. Par ailleurs, des ingénieurs de la Société *Samsung*, à Séoul, ont appliqué un mince film de nanotubes sur un circuit électronique de contrôle et l'on recouvre d'un verre enduit de phosphore. Ils ont ainsi réalisé un prototype d'écran plat. Ils espèrent commencer à produire cette année cet écran plat, aussi lumi-

neux qu'un tube cathodique, mais consommant dix fois moins d'énergie.

Les nanotubes de carbone, objets extrêmement petits, présentent des propriétés électroniques particulières liées à leur taille. À cette petite échelle, le concept de résistance électrique d'un fil n'a plus de sens et doit être remplacé

par un modèle quantique. Aujourd'hui, les physiciens étudient comment les électrons se déplacent le long d'un nanotube. Il semble que dans les nanotubes sans défauts, les électrons se déplacent de façon « balistique », c'est-à-dire sans collision, mécanisme qui confère leur résistance aux fils métalliques. Quand des électrons se propagent sur de longues distances sans collision, ils restent dans le même état quantique, ce qui est indispensable pour que les ondes associées interfèrent. L'absence de collision expliquerait pourquoi les électrons conservent leur état de spin (une propriété quantique de l'électron) lorsqu'ils se propagent le long des nanotubes. Des physiciens essaient de tirer parti de ce comportement inhabituel pour fabriquer des dispositifs « spintroniques » qui commutent selon l'état de spin des électrons, et non simplement en fonction de leur charge, comme le font les dispositifs électroniques.

Dans un nanotube, le flux des électrons peut être contrôlé avec une précision presque parfaite. Un phénomène, nommé blocage de Coulomb, a récemment été mis en évidence dans les nanotubes : les électrons « s'opposent » à ce que l'on introduise plus d'un électron à la fois dans un nanotube. Ce phénomène pourrait faciliter la construction de transistors à électron unique, l'idéal de l'électronique ultra-sensible.

Avant de réaliser de nouveaux dispositifs quantiques, il reste des problèmes à résoudre. Tous les dispositifs moléculaires, y compris les nanotubes, sont par exemple très sensibles aux fluctuations électriques, thermiques et chimiques. Des agents contaminants, tel l'oxygène, perturbent aussi leurs propriétés électriques. Cela pourrait être utile pour des détecteurs chimiques extrêmement sensibles, mais c'est un obstacle pour la fabrication de circuits à molécule unique. Aujourd'hui, la question n'est plus de savoir si les nanotubes deviendront des composants de l'électronique du futur, mais simplement comment et quand.

Philip COLLINS travaille au Centre de recherche Thomas Watson d'IBM. Phaedon AVOURIS dirige le groupe « nanoscience et nanotechnologie » d'IBM.

B. VIGOLO, A. PENICAUD, C. COULON, C. SAUDER, R. PAILLER, C. JOURNET, P. BERNIER et P. POULIN, *Macroscopic Fibers and Ribbons of Oriented Carbon Nanotubes*, in *Science*, n° 290, pp. 1331-1334, 2000.

Cees DEKKER, *Carbon Nanotubes as Molecular Quantum Wires*, in *Physics Today*, vol. 52, n° 5, pp. 22-28, mai 1999.

Carbon Nanotubes, in *Physics World*, vol. 13, n° 6, pp. 29-53, juin 2000.

Mildred. DRESSELHAUS, Gene. DRESSELHAUS et Phaedon. AVOURIS, *Carbon Nanotubes*, Springer-Verlag, 2000.

L'épée du Cid

A.-J. CRIADO • J.-A. MARTIN • J.- M. JIMENEZ • R. CALABRES

L'épée tenue en Espagne pour celle du Cid date bien du siècle du fameux chevalier castillan. Cette belle arme mauresque a traversé les siècles, malgré des rénovations maladroites.

L'âme du guerrier est la lame de son épée, dit la tradition. L'Espagne espère avoir conservé celle de son guerrier le plus mythique : le Cid. Du nom de Rodrigo Díaz de Vivar, cet aristocrate du XI^e siècle fut longtemps commandant en chef des troupes du roi de Castille. Au cours de sa carrière, il changea plusieurs fois de camp, vendant notamment son savoir-faire de général vaincu au roi musulman de Saragosse. Il se rendit célèbre dans toute l'Espagne chrétienne en reprenant Valence aux musulmans, et devint, après sa mort, héros national castillan et le sujet récurrent de nombreuses œuvres littéraires. Depuis des siècles, les aristocrates espagnols se transmettent une épée qui aurait été son arme préférée. Elle est si importante dans la tradition espagnole qu'elle servait à sacrer les rois d'Espagne avant l'arrivée des Bourbons. Cette épée, dénommée Tizona, n'avait jamais été étudiée en détail. Chercheurs en archéométaballurgie à l'Université Complutense de Madrid, nous avons eu le privilège de le faire. Nous avons analysé la façon dont elle a été forgée, et montré qu'elle provient presque sûrement d'un atelier arabo-andalou situé dans le Sud de la péninsule. L'arme a une poignée et porte des inscriptions qui datent de la Renaissance, de sorte que les historiens spécialisés dans les armes n'y voyaient qu'une imitation du XV^e siècle. Nos résultats indiquent que la lame de Tizona est plus ancienne. Elle aurait bien été forgée au cours de la première moitié du XI^e siècle, comme la tradition le rapporte.

L'objectif de notre étude était de répondre à trois questions. Quel est l'âge réel de Tizona ? D'où provient-elle ? Comment a-t-elle été fabriquée ? Pour y parvenir, nous avons réalisé toute une série de mesures mécaniques et analysé

les caractéristiques du métal. Naturellement, nous avons commencé par un examen de l'acier, d'abord à l'œil nu, puis au microscope et au microscope électronique à balayage. Nous avons ensuite réalisé des mesures par diffraction des rayons X. Afin d'évaluer la qualité du métal, il nous fallait aussi mesurer sa dureté. Nous avons aussi analysé les impuretés chimiques incluses dans l'acier de Tizona afin d'en déterminer l'origine. Nous avons effectué une étude métallurgique quantitative du vieillissement de la microstructure du métal. Tous nos résultats ont été comparés à ceux que produisent des aciers anciens d'époques diverses, bien datés.

Le temps des taifas

Avant de commencer, nous avons étudié divers documents sur l'industrie militaire de l'époque du Cid et sur les types d'armes qu'elle produisait. Au début du XI^e siècle, le califat de Cordoue, c'est-à-dire l'Espagne musulmane unie, vient de se désintégrer. De petits royaumes musulmans, nommés taifas, apparaissent, lesquels ne vont cesser pendant trois siècles de s'espionner et de se quereller. Dans le même temps, ces taifas doivent faire face à la pression militaire constante des royaumes chrétiens du Nord, au premier rang desquels la Castille. Les textes arabes de l'époque du Califat de Cordoue et des royaumes taifas attestent que Tizona est une épée d'acier courante à l'époque, un type d'arme que l'on désignait en Castille sous le terme de tizona. Sa lame courte, large et de faible épaisseur la classe parmi les armes de chasse et de combat à cheval. Des représentations de ce type de lame se retrouvent sur les bas-reliefs de l'époque arabo-andalouse, notamment sur celui du coffret d'ivoire

de la cathédrale de Pampelune, réalisé pour le chef de guerre Abd al-Malik al-Muzafar, fils de Almanzor, en 1005.

Les chroniques de al-Hulal al-Mawsiyya, qui décrivent la période de transition entre les royaumes taïfas et l'arrivée de la dynastie nord-africaine des almoravides, en plein XI^e siècle, contiennent un élément intéressant sur les armuriers de l'époque. On y apprend que les almoravides se sont procurés des chevaux dans les marais du Guadalquivir ainsi que dans les campagnes et les montagnes de Cordoue ; ils recrutèrent ensuite des soldats et obtinrent des armes en Al Andalus, c'est-à-dire dans le califat qui existait alors en Andalousie. Ce texte atteste donc qu'Almanzor avait mis en place une industrie militaire de tout premier ordre afin de mener à bien sa guerre sainte contre les chrétiens du Nord.

Or, nous possédons un témoignage sur cette industrie de la fin du X^e siècle et du début du XI^e siècle. Un informateur d'Ibn Hyyan à Cordoue raconte que Abu-al-Abbas al-Bagdadi, d'origine orientale et maître-artisan à Cordoue, fabriquait, avec l'aide de son esclave Talha, 12 000 arcs arabes et turcs chaque année dans ses ateliers de Madinat al-Zahara. La production de flèches atteignait 12 000 unités mensuelles !

Des armuriers réputés

Le savoir-faire réputé des armuriers arabo-andalous était constamment renouvelé par les apports des artisans et forgerons immigrés d'Irak, de Perse ou même d'Inde. L'industrie artisanale de l'acier connaît un essor encore supérieur à partir du règne de Abd al-Rahman, à Cordoue et Tolède. Les forgerons arabo-andalous fabriquaient des armes blanches raffinées qu'ils exportaient. Le géographe égyptien Ibn Jurdadhbeh (mort vers 885) signale que les échanges furent importants dès le IX^e siècle. Au milieu du XI^e siècle, l'émir Yousouf ben Taxoufin offre à son premier frère, l'émir Abu Bakr ibn Ibrahim, 50 tizonas, dont 20 avec une poignée d'or et 30 avec une poignée d'argent, toutes fabriquées en Al Andalus.

Avant d'étudier l'épée, nous l'avons d'abord préparée afin de la préserver. Aujourd'hui propriété du marquis de Falcès, Tizona a depuis longtemps un caractère quasi sacré en Espagne, statut qui est à la fois un atout et une malchance. Ce statut, s'il a protégé l'arme au cours des siècles passés, a

aussi entraîné plusieurs réfections, qui l'ont à moitié... détruite ! Lorsque l'arme est arrivée dans notre laboratoire, elle était recouverte d'une couche de laque métallisée. Déposée par petites touches encore visibles, cette laque cachait la couleur originale de l'acier, et dissimulait les traces d'un intense polissage destiné à éliminer la rouille. Selon toute probabilité cette opération fut la plus destructrice de toutes celles qui ont été pratiquées sur la lame. Toutefois, le va-et-vient entre les ancêtres du marquis de Falcès et les rois d'Espagne a aussi contribué à la détérioration de Tizona. L'épée devait être polie à chaque cérémonie. À cela, s'ajoutent le remplacement de la poignée originale à l'époque des Rois Catholiques (1474-1516), et l'apposition de deux inscriptions placées sur chacune des gouttières (sillon central de la lame). L'une, en latin, se lit «*ave maria gratia plena dominus mecum*», c'est-à-dire «Je te salue Marie, pleine de grâce, le Seigneur est avec toi» et l'autre, en castillan du XVI^e siècle, «*io soi tizona fue fecha en la era de mil quatroenta*», c'est-à-dire «Je suis Tizona, faite en l'an de grâce mille quarante». C'est la face qui porte l'inscription «*ave maria gratia...*» qui est la plus abîmée. La couche superficielle dure a partiellement disparu. Comme toutes les épées d'acier, Tizona a subi une corrosion au cours du temps. Sa surface est marquée de nombreuses piqûres, petites blessures ponctuelles qui traversent la couche dure jusqu'au noyau de fer doux et dégradent l'ancrage. La pointe est détériorée. Les tensions accumulées lors de chaque intervention ont aussi légèrement induit une légère courbure de la lame. On remarque aussi la présence de petites crevasses et d'une zone brûlée, lesquelles montrent que l'arme a été reforgee, probablement lors d'une réparation. Les radiographies indiquent que la partie où est fixée la poignée a peut-être été raccourcie, soit pour réparer l'épée, soit lors du montage de la garde actuelle. Si la pointe est détériorée, elle aussi, les études réalisées dans notre laboratoire montrent que le reste de la lame n'a pas été modifié depuis l'origine.

1. TIZONA fut, selon la tradition espagnole, l'épée du Cid, un chevalier castillan du XI^e siècle. D'une longueur totale de 933 millimètres, sa lame mesure 785 millimètres pour une largeur de 43 millimètres au niveau de la garde. L'épée a été rénovée (à gauche avant la rénovation et à droite après) ; on constate que la poignée en fer forgé, montée à la Renaissance, est asymétrique.



1. TIZONA fut, selon la tradition espagnole, l'épée du Cid, un chevalier castillan du XI^e siècle. D'une longueur totale de 933 millimètres, sa lame mesure 785 millimètres pour une largeur de 43 millimètres au niveau de la garde. L'épée a été rénovée (à gauche avant la rénovation et à droite après) ; on constate que la poignée en fer forgé, montée à la Renaissance, est asymétrique.

Le parcours de Tizona selon la tradition espagnole

On ignore où et par qui Tizona fut forgée. Ce qui est sûr, c'est que cette lame d'élite a été transmise entre riches guerriers et aristocrates pendant 1 000 ans. Voici quel fut son parcours probable si l'on accorde foi à ce que rapportent la tradition espagnole et divers documents. Si l'on suppose que le Cid possédait Tizona à sa mort, elle a dû rejoindre le trésor des rois de Castille par l'intermédiaire du neveu du Cid Pedro Bermúdez ou de sa fille Christina Elvira. Par la suite, l'épée tomba dans les mains de Jacques I^{er} d'Aragon, qui l'utilisa lors de la conquête de Valence en 1238. On la localise ensuite dans l'armurerie de Pierre IV le Cérémonieux qui la mentionne dans son testament en 1370. Tizona est présente dans la Chambre Royale du roi Don Martin, puis léguée à Fernando de Antequera, qui l'offre en cadeau à son neveu Don Juan II. Ainsi, Tizona est citée en 1453 lors de l'inventaire du Trésor de Castille parmi les bijoux que Don Alvaro Luna gardait à l'Alcazar de Madrid. Le lot enrichira par la suite le trésor royal de Jean II, ce qui montre qu'elle n'a plus alors le statut de véritable arme, mais celui d'un bien précieux. C'est pourquoi, un ancêtre des actuels marquis de Falcès la reçut en présent de la reine Isabelle I^{re} de Castille, surnommée la Catholique. Cette terrible reine est célèbre pour avoir unifié l'Espagne chrétienne en se mariant à Ferdinand d'Aragon, achevé dans le sang la reconquête et financé le voyage de Christophe Colomb. C'est pour le prix de ses services pendant la prise de Grenade en 1492, que Mosen Pierres de Peralta, ancêtre des marquis de Falcès, reçut Tizona des mains mêmes d'Isabelle de Castille. L'épée suit alors sa descendance pour parvenir aux marquis de Falcès d'aujourd'hui. Notons que Fray Prudencio de Sandoval en réalise une description détaillée entre 1560 et 1621. Tizona est alors gardée dans le château de Morilla, des Falcès. La dernière grande aventure de Tizona est due à la guerre civile. Le 23 Juillet 1936, un Comité est créé à Madrid pour inventorier les objets d'art et les transférer dans des musées afin de les préserver du conflit. Tizona, avec ses documents de passation et d'authentification, est saisie au domicile des marquis de Falcès et conservée avec le «Trésor Artistique». Madrid assiégée, les œuvres du Trésor sont transférées à Valence, puis à Figueras non loin de Barcelone, avant d'être envoyées à Genève. C'est le Maréchal Pétain qui transmettra le Trésor Artistique à Franco au début de la Seconde Guerre mondiale, lequel restituera Tizona à ses légitimes propriétaires, les marquis de Falcès. Ceux-ci la céderont en dépôt au Musée de l'armée de Madrid.

Pour étudier Tizona dans les meilleures conditions, nous avons d'abord éliminé la couche de laque métallisée à l'aide de solvants, puis nous avons retiré les oxydes métalliques incrustés en surface à l'aide de pâte de diamant. Comme nous voulions protéger définitivement la lame contre la corrosion, nous y avons appliqué une résine nitrocellulosique. Ce polymère résiste aux rayures, à la chaleur et aux chocs ; il isole bien la pièce de l'oxygène et de l'humidité. Il n'est ni coloré, ni brillant, de sorte qu'on observe la feuille d'acier sous son aspect original.

La lame enfin en sécurité, son étude pouvait commencer. Nous avons d'abord analysé la technique employée pour la forger. Il était clair que, comme de nombreuses lames médiévales, cette épée est formée de deux aciers différents : un acier dur, qui constitue l'écorce

extérieure, et un acier doux proche du fer, au cœur. Ces deux métaux confèrent à la lame à la fois la souplesse du fer et la dureté de l'acier. Ils se distinguent par leur teneur en carbone : 0,9 pour cent pour l'écorce contre seulement 0,1 pour cent pour le cœur. Nous savions qu'une lame de ce type est obtenue à partir d'une masse de fer aplatie au marteau puis traitée au carbone (opération de cémentation). Nous avons comparé la technique de fabrication de Tizona avec celles qui étaient employées pour l'obtention d'acier cémentés, de l'âge de fer à la fin du premier millénaire. Tout au long de ces siècles, les armuriers espagnols maîtrisaient la technique de cémentation du fer. Tizona s'inscrit dans cette tradition : la transition entre les zones dont la cémentation en carbone diffère, est particulièrement réussie. On n'observe

ni frontière, ni impuretés, ni scories, ni oxydes, alors que tous ces défauts, qui sont autant de zones de fragilité, sont fréquents lorsque deux aciers de compositions distinctes sont soudés. Cette caractéristique indique que la cémentation de la lame de Tizona a été pratiquée après son forgeage.

Nous nous sommes ensuite attachés à évaluer les performances de la lame. Nous avons estimé la durée de la cémentation et l'épaisseur sur laquelle le carbone avait diffusé pendant le traitement. L'usage continu d'abrasifs a fait presque disparaître l'écorce par endroits, notamment comme nous l'avons déjà signalé, sur la face inscrite «*ave maria gratia plena dominus mecum*». La couche extérieure d'origine aurait eu une épaisseur moyenne de 0,4 à 0,5 millimètre. Sa dureté est de l'ordre de 60 HRC sur la face qui conserve la couche cémentée ; pour évaluer la dureté en unités HRC, on mesure jusqu'à quelle profondeur une pointe de diamant soumise à une force égale à 150 kilogrammes s'enfonce dans l'échantillon. Ici, nous n'avons évidemment pas utilisé directement cette technique, mais une mesure indirecte dont les résultats ont été convertis en unités HRC.

L'art du maître de forge

Le maître de forge a durci la lame d'acier de Tizona en procédant à une double trempe. Après avoir d'abord chauffé la lame à une température comprise entre 890 °C et 925 °C, il l'a ensuite plongée dans une eau contenant de la saumure. Puis, il a recommencé en portant cette fois la lame à 780 °C seulement. L'eau froide, en effet, refroidit moins vite le métal chauffé au rouge si elle est salée : l'eau salée a contribué au caractère progressif de la transitions entre les deux alliages. Le résultat est une écorce très dure et tenace, c'est-à-dire qui adhère bien au cœur.

Ce forgeron maîtrisait les techniques de chauffe et de trempe nécessaires à l'élaboration de chacun des deux aciers de la lame. Ainsi, il est parvenu à conférer à l'acier intérieur un grain très fin, qui le rend homogène. La lame a un aspect métallique blanchâtre intense, presque argenté. Caractéristique, ce ton argenté s'exacerbe lorsqu'on polit la lame, ce qui explique sans doute que la tentation ait été si grande de «nettoyer» Tizona au cours des siècles, au point de l'endommager... Aujourd'hui, ce type d'acier dur, à haute teneur en carbone, est toujours

désigné en Espagne par le terme «acier argent». Notons que le maître de forge a aussi pris la précaution de tremper plus délicatement la poignée et d'y introduire moins de carbone afin de lui laisser plus de souplesse. Trop dure, elle se serait brisée au premier coup.

Où a été forgée une telle arme? S'agit-il d'une lame d'importation ou de l'œuvre d'un forgeron espagnol? Chrétien ou sarrasin? Nous avons répondu à ces questions en analysant les impuretés de l'acier de Tizona. Nous les avons comparées à celles des minerais, des fers et des aciers travaillés dans les ateliers arabo-andalous : Tizona a été fabriquée au Sud de l'Espagne. Les impuretés d'un fer ou d'un alliage ferreux peuvent avoir deux sources : le minerai utilisé pour le produire, d'une part, et les matières d'appoint, nommées fondants, utilisées dans les haut fourneaux au cours de l'extraction, d'autre part. L'acier de Tizona contient des impuretés qui le rapprochent des fers et des aciers de l'époque des taifas. Nous l'avons comparé aux aciers trouvés à Tolède, à Séville, à Cadix et à Cordoue. Il apparaît que la nature des impuretés trouvées et leurs proportions correspondent le mieux aux aciers produits au Nord de Cordoue pour la cour du califat de Firrîsh, et à ceux produits à Constantina pour la cour de Séville.



2. RADIOGRAPHIE DE TIZONA ET DE SA POIGNÉE. On constate que la prolongation du manche et la mise en place de la poignée actuelle ont fragilisé la structure (zone noire entre le pommeau et la poignée).



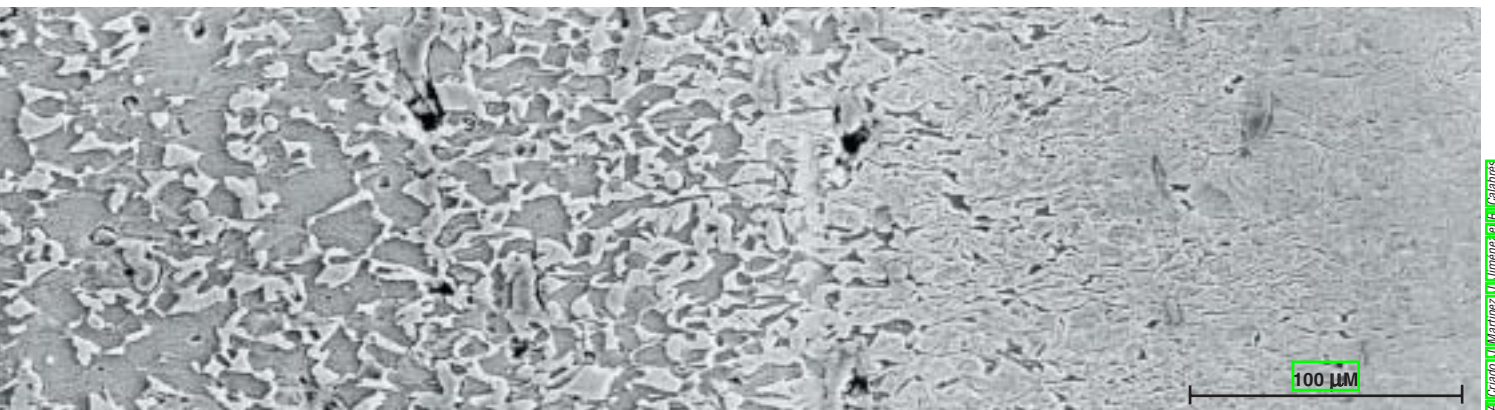
L'hypothèse d'une provenance arabo-andalouse de l'acier de Tizona n'est pas surprenante. La qualité des aciers du Sud de l'Espagne est connue depuis l'Antiquité. Ainsi, les minerais de la péninsule étaient déjà utilisés par les Ibères pour fabriquer leurs falcatas, des épées à lame courbe, à un seul fil et à poignée retournée. Habitants l'Espagne avant l'arrivée des

Romains, les Ibères savaient forger de magnifiques armes. Le général carthaginois Hannibal appréciait tant la qualité de ces falcatas du Sud de la péninsule qu'il en fit les armes réglementaires de son armée! Au moment de la conquête de la Bétique (la région de Cordoue), les légionnaires romains adoptèrent aussi le *gladius hispanensis*. Pour conforter l'hypothèse de la



3. DES INSCRIPTIONS d'un style typique de la Renaissance (*io so tizona fue fecha en la era de mile qvarenta*) et un poinçon ont été gravés sur le même côté de la lame. Ils ont été tracés à l'acide, bien après la fabrication de la lame, au XI^e siècle. Cette opération

a irrémédiablement détérioré la couche externe d'acier, et a rendu l'épée inutilisable au combat. Si la lame était soumise à une forte flexion, elle se briserait, car les caractères creusés à l'acide sont autant de zones de fragilité.



4. LA TRANSITION entre l'acier doux du cœur de la lame (*à gauche*) et l'écorce extérieure en acier dur (*à droite*) est très progressive. Le cœur de l'épée doit sa souplesse à la faible proportion de carbone qu'il contient : 0.1 pour cent en masse. L'écorce extérieure

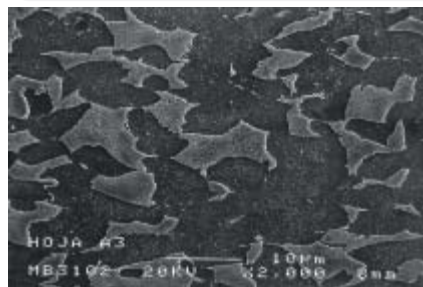
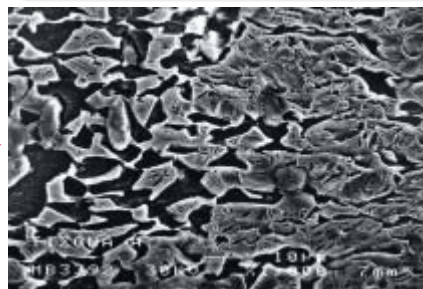
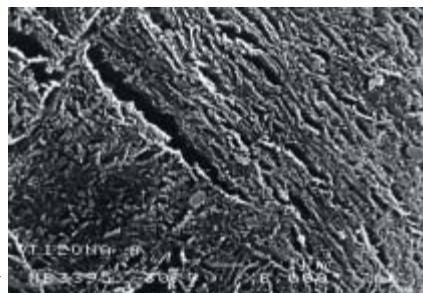
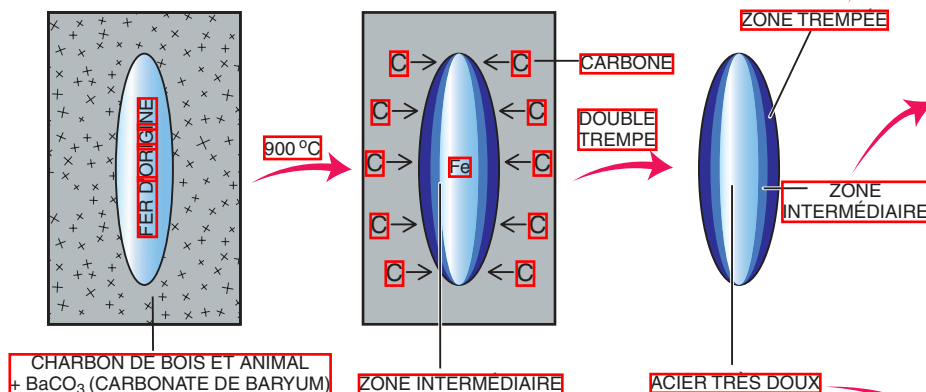
doit sa dureté à sa proportion supérieure de carbone : 0,9 pour cent en masse. Une telle transition indique que le maître de forge trempait la lame dans une solution salée : le refroidissement plus lent explique la transition observée.

provenance arabo-andalouse de Tizona, nous avons comparé les caractéristiques des minerais des aciers espagnols à celles de minerais d'origines européenne ou africaine : seule une origine arabo-andalouse de Tizona est envisageable. Nous avons aussi procédé à une analyse des isotopes du plomb présents dans certaines impuretés contenues dans les aciers : l'hypothèse que l'acier de Tizona provient d'Andalousie a été confirmée par cette méthode.

La datation de Tizona posait un problème particulier à cause des inscriptions qui ornent les gouttières et la poignée. D'après le type de la garde et celui des caractères, Tizona serait postérieure au XI^e siècle. La poignée et la garde actuelles, réalisées en fer forgé, présentent les « caractères impériaux » typiques de l'époque de Charles I^{er} (1516-1556). Ainsi, chacune des deux branches de la croix que forme l'épée (les quillons)

est tournée vers le bas, percée et unie à l'épée par un renfort, l'entourant et revenant en angle droit vers l'intérieur. Le pommeau a une forme de feuille de poirier. La poignée, en bois parcheminé, a été rehaussée aux métaux nobles (on en découvre les restes sur les radiographies). D'après les chroniques de l'époque de Charles I^{er}, la poignée d'origine aurait été ornée d'or, d'argent, de pierreries, d'ivoire et d'autres matières précieuses, mais non de fer forgé. Les inscriptions en lettres de la renaissance sont très probablement un autre héritage de l'époque de Charles I^{er}. Elles ont été réalisées à l'acide, par quelqu'un qui, manifestement, ignorait la structure interne de la lame d'acier, et la virtuosité technique nécessaire à sa réalisation. Ces gravures n'ont pu être l'œuvre de l'artisan qui façonna Tizona, qui n'aurait pas accepté de détruire la couche carburée, et de rendre ainsi l'épée inutilisable au combat. Quant à

la légende «*io soi...*», elle apparaît anachronique, si on la suppose du XI^e siècle. Comment une épée mauresque aurait-elle pu être datée en castillan d'après le calendrier chrétien ? Le même argument s'applique à l'inscription «*ave maria gratia plena dominus mecum*», chrétienne et donc impensable dans un contexte islamique. La poignée et les inscriptions étant manifestement postérieures à la fabrication de Tizona, il nous restait à dater la lame. Pour ce faire, nous avons



5. TROIS COUPES DE LA LAME DE TIZONA. L'écorce se compose de deux zones : la zone intermédiaire, où la perlite prédomine, sert d'ancrage pour la couche externe ; la zone externe (*en haut*), très dure, où la bainite et la martensite prédominent. Le cœur de l'arme (*en bas*) est constitué d'une structure ferritique. Le procédé de trempe a doté la lame de Tizona d'excellentes propriétés mécaniques : flexibilité, dureté, ténacité et tranchant inusable.

Comment Tizona fut façonnée

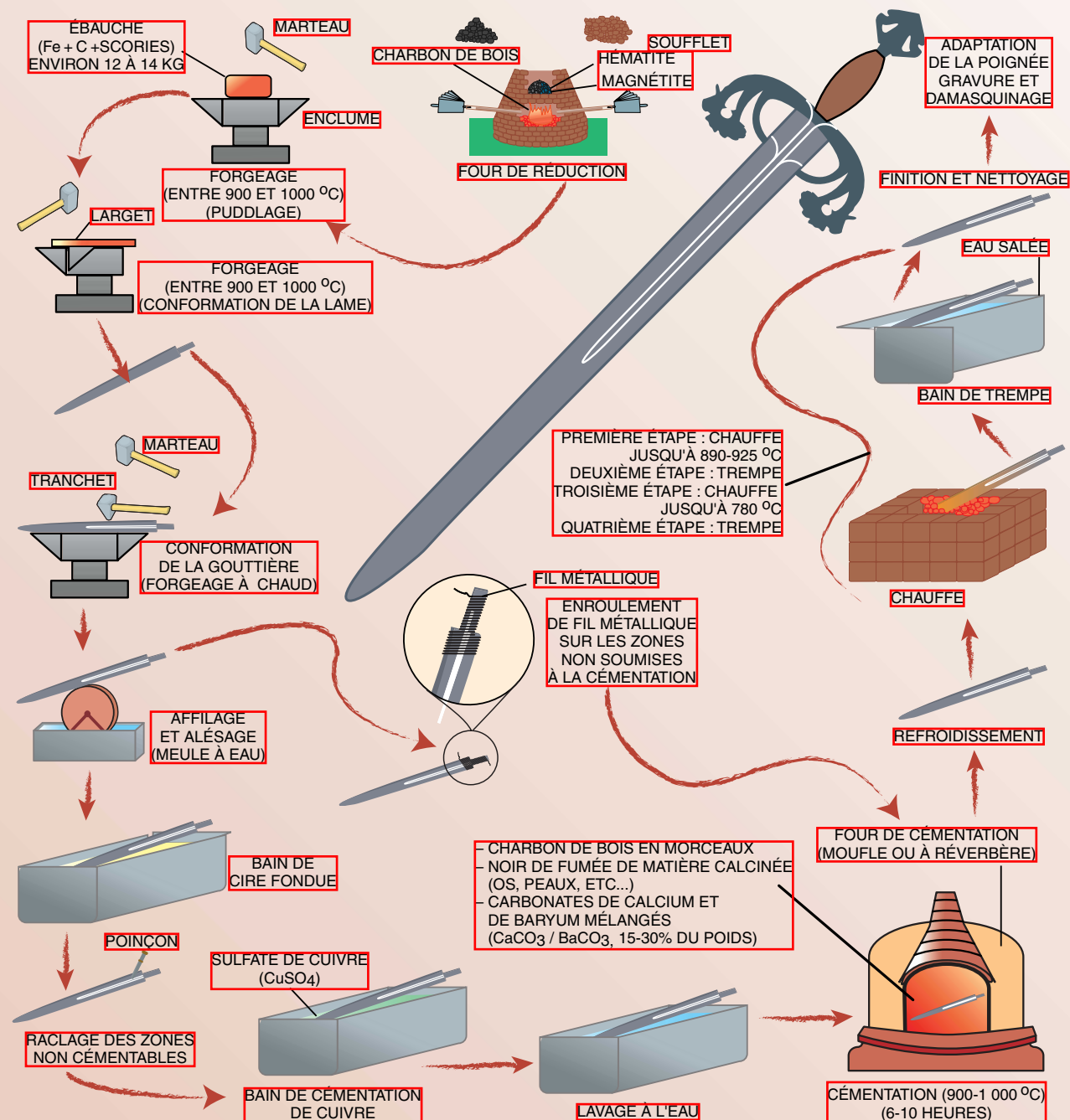
Après avoir mené des essais dans notre laboratoire, nous pensons avoir reconstruit le procédé de fabrication de Tizona.

Dans un premier temps, le minerai de fer est réduit à l'aide de charbon de bois. On passe ensuite à un forgeage à chaud entre 900 et 1 000 °C d'un noyau de fer, que l'on aplatit. Un tranchet sert à former les gouttières de cette future lame, laquelle est aplanie et effilée au moyen d'une meule. Les zones où le carbone ne doit pas diffuser, tel le manche de la poignée, sont ensuite protégées à l'aide de fil métallique, puis plongées dans un bain de sulfate de cuivre ; ensuite, ces zones, qui ne doivent pas être cémentées, sont recouvertes d'une couche de cire.

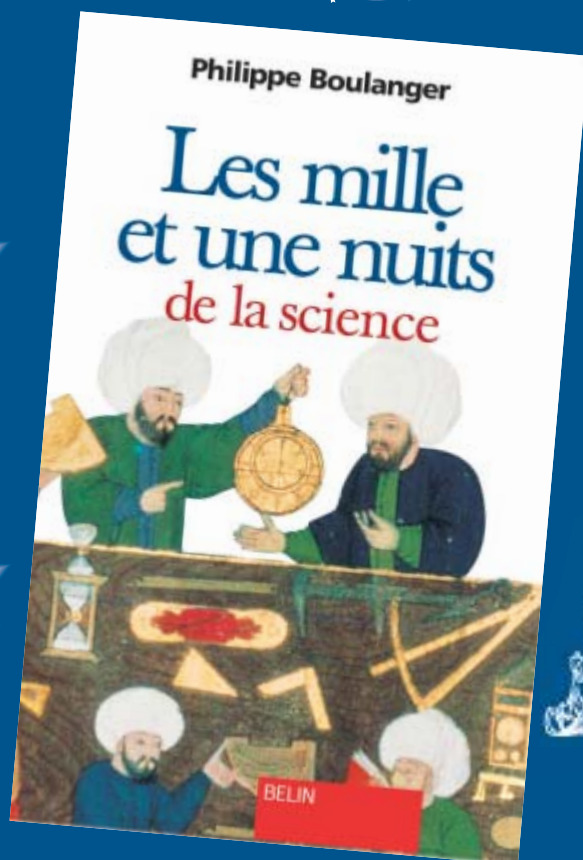
Puis, les forgerons passent à la cémentation. Ils la réalisent dans un four dont la température est située entre 900 et 1 000 °C ; l'opération dure de 6 à 10 heures. La pièce est placée dans le four

en compagnie de morceaux de charbon de bois, de matière organique (des os, des morceaux de peau animale) et d'un mélange de carbonate de calcium et de carbonate de baryum (15 à 30 pour cent de la masse totale).

Après la cémentation, vient la trempe. Celle-ci se déroule en deux étapes : la première a lieu entre 890 et 925 °C et la seconde à 780 °C. La lame est plongée par la pointe dans un bain d'eau salée jusqu'à refroidissement complet de l'acier. Procédure complexe, cette trempe associe des structures dures, et résistantes. Plusieurs phases de l'acier sont ainsi associées dans des proportions variables en fonction de la zone : la martensite, la bainite, la perlite fine et l'austénite. Le tout produit des propriétés mécaniques différentes de la pointe à la poignée. L'épée est finalement nettoyée et pourvue d'une poignée.



Entrez dans l'ambiance orientale
des mille et une nuits et laissez-vous
charmer par l'imagination
de Shéhérazade contant la science
et les tribulations des savants



«Dans ce livre, Philippe Boulanger,
Directeur de la revue Pour la Science,
réussit le tour de force de vulgariser des
concepts difficiles en charmant son lecteur
par une subtile danse... des neurones».

Hervé Ponchelet
Le Point

Code 2445 • 240 pages • Prix 100 F
Voir bon de commande p. 98

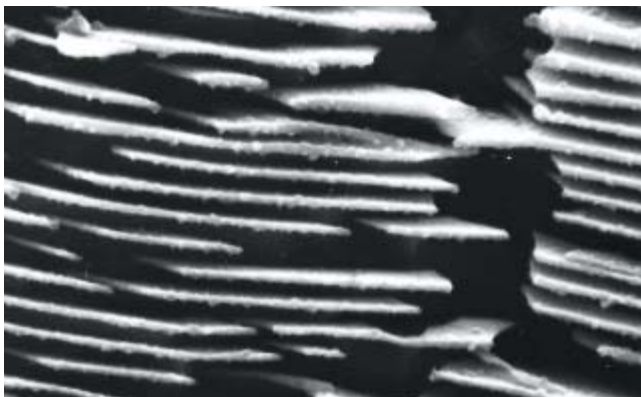
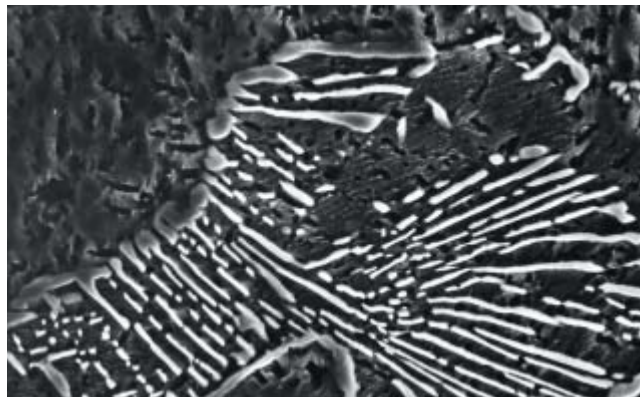
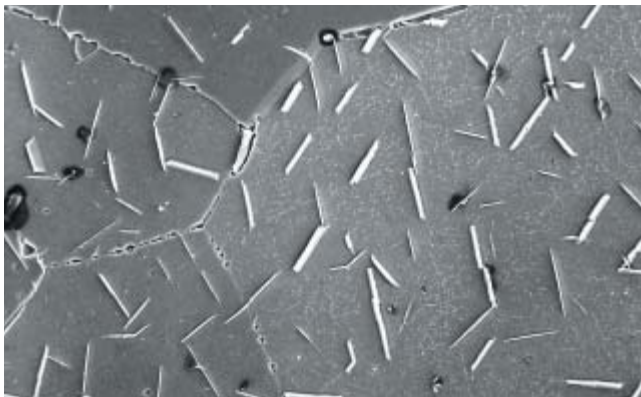
BELIN • POUR LA SCIENCE

choisi d'étudier les évolutions de la microstructure métallique avec le temps.

Lorsqu'un acier vieillit, le carbone diffuse lentement. Le fer existe sous deux formes cristallines : aux basses températures et jusqu'à 910 °C, les atomes de fer sont disposés suivant un réseau cubique centré (il est constitué de cubes juxtaposés avec des atomes de fer aux sommets de chaque cube et en leurs centres) ; aux températures comprises entre 910 °C et 1 392 °C, le réseau cristallin du fer est du type cubique à faces centrées (il est constitué de cubes juxtaposés avec des atomes de fer aux sommets et aux centres des faces de chaque cube) ; au-dessus de 1 392 °C et jusqu'au point de fusion, à 1 535 °C, le fer retrouve la structure cubique centrée. Un acier est un alliage de fer et de moins de deux pour cent de carbone. Les différentes phases qui le constituent résultent de la solubilité différente du carbone dans chacune des formes cristallines du fer. Ainsi, la «solution» de carbone dans le fer cubique à faces centrées est l'austénite, tandis que la solution de carbone dans le fer cubique centré est appelée ferrite (on parle de solution, mais il s'agit de solution solide, c'est-à-dire que des atomes de carbone se «dissolvent», ou plutôt s'insèrent, dans le réseau cristallin du fer).

La cémentite précipite

Comme le carbone est peu soluble dans le fer, un troisième constituant apparaît dans l'acier : la cémentite, c'est-à-dire du fer et du carbone sous forme de carbure de fer (Fe_3C). Ainsi, un acier, alliage de fer et de carbone, est constitué à la température ordinaire d'un mélange de ferrite et de cémentite. Toutefois, en fonction des conditions de chauffage et de refroidissement, plusieurs autres structures peuvent apparaître : la martensite (solution instable de carbone dans de la ferrite déformée), la perlite (constituée d'agrégats microscopiques de ferrite et de cémentite), la bainite (constituée d'agrégats de plaquettes en forme d'aiguilles de ferrite et de particules de cémentite),... Au moment de la trempe, un acier se fige en une structure, laquelle évolue ensuite. Les changements sont décelables au microscope électronique à balayage. Ainsi, dans les ferrites le carbone s'accumule dans des cristaux en forme de prismes. Ce phénomène, la précipitation de la cémentite (carbure) est de grande ampleur. La cémentite



J. Criado, J. Martínez, J. Jiménez, et J. Calabrès

6. STRUCTURES D'ACIER MODIFIÉES PAR LE VIEILLISSEMENT. En haut à gauche, des cristaux de carbure de fer précipités dans la ferrite d'une fibule trouvée dans la nécropole ibérique de Villanueva de Teba (IV^e-II^e siècles avant notre ère) dans la région de Burgos. En haut à droite, des plaques de cémentite sont noyées dans la perlite de l'acier d'une boucle de la même nécropole. En bas à gauche, des plaques cristallines sont présentes dans l'acier hypereutectoïde d'un clou romain du

Haut-empire de la villa romaine de Cerro Muriano (entre -100 et 100). En bas à droite : Tizona. On distingue une écorce de perlite fine associée à de la ferrite dans la zone de transition entre le noyau et la zone dure externe. Ces formes vieilles d'acier ne peuvent être reproduites en laboratoire parce qu'elles sont le résultat de centaines d'années d'évolution lente. Toute tentative de reproduction de telles structures à haute température conduit à des morphologies différentes.

tite se concentre dans la perlite sous forme de plaques en forme de prismes. Dans la bainite et la perlite, des blocs de ferrite se forment, au sein desquels la cémentite s'accumule sous des formes sphéroïdes. La précipitation de la cémentite se produit le long de certains plans des cristaux de ferrite. À mesure qu'il vieillit, le métal perd sa souplesse et sa résistance mécanique. Le processus de vieillissement dépend surtout de la diffusion lente du carbone dans la ferrite, et les formes les plus stables sont sélectionnées.

Ces phénomènes dus au vieillissement ont été observés dans tous les aciers et dans les fers archéologiques déjà étudiés. Avec le temps, les carbures s'accumulent et la taille moyenne des particules dépend du temps écoulé depuis l'élaboration de l'acier.

Afin de calculer l'âge de Tizona, nous avons construit un modèle mathématique reproduisant les phénomènes dus au vieillissement. Pour le valider, nous avons évalué l'âge de pièces antiques et médiévales dont on sait à quel moment elles ont été fabriquées,

et obtenu des résultats raisonnables. D'après notre modèle, Tizona daterait d'environ 950 ans, c'est-à-dire qu'elle aurait bien été forgée dans la première moitié du XI^e siècle, à l'époque du Cid. Nous espérons pouvoir bientôt préciser cette datation à dix ans près.

Nul ne sait comment une arme typiquement mauresque aurait pu devenir la propriété du Cid, même si ce dernier a longtemps servi un maître musulman. Par ailleurs, rien ne permet d'affirmer que la lame d'acier que nous avons étudiée, a effectivement appartenu à

l'homme de Burgos. À l'époque du Cid ou avant, les chevaliers chrétiens étaient nombreux à préférer les armes sarrasines. Ainsi, Roland, qui avait guerroyé longtemps en Espagne avant d'être tué au col de Roncevaux, en utilisait une, la célèbre *Durandal*. Charlemagne de son côté utilisait *Joyeuse*, elle aussi d'origine mauresque. De nombreuses questions restent ouvertes quant à l'origine de Tizona. Notre étude n'a établi avec certitude que deux choses : Tizona est une lame d'acier d'origine mauresque et elle date du XI^e siècle.

José CRIADO, Juan Antonio MARTÍNEZ, José Manuel JIMÉNEZ, et Rafael CALABRÈS appartiennent tous à l'équipe de recherches sur les techniques anciennes et l'archéométallurgie de la Faculté des sciences chimiques de l'Université Complutense de Madrid. Criado et Martínez sont professeurs au département de sciences des matériaux et d'ingénierie métallurgique, où Jiménez et Calabrès préparent leur doctorat.

Antonio J. CRIADO et al., *Metallographic Study of the Steel Blade of the Sword Tizona*, in *Practical Metallography*, vol. 37, n° 7 : 2000

Poema del mio Cid, Anonyme, Édition de Colin Smith, Ediciones Altaya S.A. Barcelona 1993. Ed en fr : *Le poème du Cid*, La renaissance du livre, s.d.

Le Cid : personnage historique et littéraire : anthologie de textes arabes, espagnols, français et latins avec trad., réunis par Mikel de Epalza, Suzanne Guelaz, Paris Maisonneuve, 1983.

Un monde de spins

BRIAN HAYES

Tout au long du XX^e siècle, les physiciens ont étudié le modèle d'Ising, une représentation simplifiée de l'aimantation. Après de francs succès à une et deux dimensions, ils simulent le modèle à trois dimensions sur ordinateur...

Pierre-Simon de Laplace, mécanicien céleste, pensait que l'Univers est entièrement régi par les forces que les particules exercent les unes sur les autres. Il avait donc conçu un projet d'une ambition immense, qu'il pensait réaliser à l'aide d'un plan d'une extrême simplicité : il voulait mesurer toutes les forces et toutes les vitesses à un certain instant, puis reconstituer, par le calcul, l'évolution complète de l'Univers – passée, présente et future. Deux siècles de progrès scientifiques plus tard, le projet de Laplace n'a toujours pas abouti ; au contraire, la mécanique quantique, puis la théorie du chaos, l'ont rendu caduc. Pourtant, il existe des situations où le projet de Laplace semble réalisé : la modélisation des phénomènes physiques. Quand nous étudions un modèle plutôt que l'Univers réel, nous pouvons, en principe, suivre toutes les forces et tous les mouvements, inven-

ter et imposer des lois physiques. Pourtant, notre compréhension d'un tel modèle n'est souvent que partielle. Même si, avec ce modèle, nous parvenons à suivre les particules une à une, nous ignorons comment elles interagissent quand elles sont des millions. En d'autres termes, nous sommes alors incapables de prévoir des phénomènes thermodynamiques aussi élémentaires que l'ébullition ou le gel.

Un tel modèle, fut élaboré dans les années 1920 par les physiciens Wilhelm Lenz et Ernst Ising pour établir une théorie simplifiée du ferromagnétisme expliquant l'aimantation des barreaux de fer. Cette théorie est nommée modèle d'Ising, parce qu'Ernst Ising en fit le sujet de la thèse de doctorat, dirigée par Lenz, qu'il obtint à l'Université de Hambourg. S'il est une situation où le projet de Laplace avait un sens, c'est bien le ferromagnétisme décrit à la façon d'Ising !

Tout au long du XX^e siècle, les physiciens se sont passionnés pour ce modèle. Après le travail de pionnier d'Ising en 1925, Rudolf Peierls réalisa son importance en 1936 et Lars Onsager parvint en 1944 à déterminer par un calcul exact la transition de phase du système à deux dimensions, c'est-à-dire la température à laquelle il s'aimante brusquement. Une transition de phase est une transformation drastique d'un matériau, comme la solidification de l'eau à 0 °C. Le modèle d'Ising à trois dimensions a résisté, en revanche, aux efforts intenses entrepris pour l'explorer ; aujourd'hui, les physiciens s'évertuent toujours à le comprendre et à y identifier la transition de phase. Comme les calculs exacts demeurent hors de portée, les physiciens tentent aussi de réaliser le projet de Laplace... à l'ordinateur. Simuler ainsi le monde sur ordinateur est une gageure, car les résultats

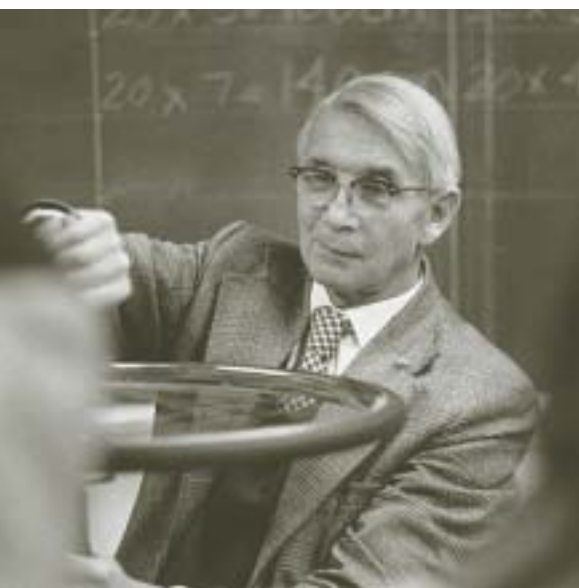
obtenus peuvent être une propriété réelle, mais aussi un artefact de calcul.

Le modèle d'Ising est une description naïve d'un réseau cristallin d'atomes de fer. Les éléments de base du modèle sont symbolisés par des flèches qui pointent, soit vers le haut, soit vers le bas ; elles représentent les spins, c'est-à-dire les moments cinétiques des atomes. Ces spins d'Ising sont disposés sur un réseau dont la maille élémentaire est carrée (ou rectangulaire). Des spins voisins «préfèrent» pointer dans la même direction, ce qui traduit le fait que l'énergie du système est petite lorsque des spins adjacents sont parallèles et grande lorsqu'ils sont antiparallèles ; dans ce modèle, les spins n'interagissent qu'avec leurs voisins les plus proches. Les spins ne sont pas tous orientés parallèlement à cause de la température : l'énergie thermique perturbe l'arrangement parfait de spins parallèles. Enfin, les spins sont soumis à une contrainte supplémentaire : un champ magnétique extérieur tend à les aligner dans sa direction.

Un modèle simple d'aimant

Ce modèle d'Ising est l'un des plus simples inventés par les physiciens pour décrire un grand nombre de particules qui ont un comportement «solidaire». Toutefois, il induit des calculs redoutables, et ce, même avec toute la puissance des calculateurs modernes.

Le modèle d'Ising reproduit bien les principaux aspects de la réalité. Les spins d'Ising correspondent à ceux des électrons en rotation autour des atomes de fer, lesquels sont rangés suivant un réseau cristallin dont la maille est cubique centrée ou cubique à face centrée. La disposition des spins d'Ising sur un réseau régulier à maille carrée ou cubique reproduit cette propriété.



ERNST ISING

1. ERNST ISING (1900–1998) était passionné par l'enseignement de la physique. Originaire d'Allemagne, il fut nommé «meilleur professeur de l'année aux États-Unis», en 1971.

Les interactions des spins voisins représentent le chevauchement des nuages électroniques entourant les noyaux. Au final, un seul élément n'a pas vraiment son pendant dans le monde réel : le fait que les spins d'Ising ne s'orientent que selon deux directions.

L'aimant ainsi modélisé est-il aimanté? Ses spins s'alignent-ils en parallèle comme dans un vrai ferromagnétique? Avant de répondre à ces questions, rappelons le principe de base du physicien : les systèmes tendent à évoluer vers des états d'énergie inférieure (ou d'énergie libre inférieure). C'est en appliquant cette idée que les physiciens ont remporté tant de succès dans leurs efforts pour décrire la nature. Dans le cas du modèle d'Ising, un modèle de la physique statistique, ce principe doit être appliqué de façon probabiliste. Parce qu'ils sont plus probables, les états de moindre énergie du modèle d'Ising sont ceux vers lesquels le système évolue, malgré les fluctuations thermiques qui le poussent en permanence à changer d'état. Lorsque la température est très grande, ces fluctuations thermiques sont incessantes. Chaque spin bascule continuellement et aléatoirement d'une orientation à l'autre, de telle sorte que l'aimantation moyenne reste nulle. Au contraire, lorsque la température est proche de zéro, les fluctuations thermiques tendent à disparaître. Le système est dans un état d'énergie minimale, celui où tous les spins sont alignés. Notons qu'en l'absence de champ magnétique extérieur, l'état où tous les spins sont alignés vers le haut est aussi probable que celui où ils sont alignés vers le bas.

La transition de phase

Supposons maintenant que nous réduisons continûment la température d'un système d'Ising de l'infini à zéro. Initialement désordonné, tous les spins finissent par s'aligner. Ce changement est-il continu, ou brusquement déclenché à une température donnée? Cette question est centrale, car un système à un grand nombre de particules adopte des phases différentes, c'est-à-dire des comportements différents en fonction des conditions extérieures. Parce qu'elles séparent ces comportements, les discontinuités – appelées transitions de phase – sont des repères essentiels dans l'analyse du comportement de la matière. Cette transition de phase apparaît dans les aimants réels. Refroidis-

sons lentement du fer en fusion et mesurons son aimantation : elle reste nulle jusqu'à une température nommée point de Curie ; là, à environ 1 040 kelvins, elle augmente brusquement. Si le modèle d'Ising décrit vraiment le ferromagnétisme, il doit présenter ce type de discontinuité. En d'autres termes, il existe une température (un niveau d'agitation thermique) au-dessous de laquelle le système passe brusquement dans son état aimanté.

C'est cette question qu'Ising a étudiée dans son travail de pionnier. Il s'est limité au «peigne de spins», c'est-à-dire à des alignements de spins. Existe-t-il, dans le cas du peigne, une température critique au-dessous de laquelle l'agitation thermique n'empêche plus les spins de s'aligner? Déçu, il est obligé d'admettre que ce n'est pas le cas. Voyons pourquoi. Considérons une rangée de 10 000 spins qui pointent tous vers le haut. Une telle configuration est un état



2. LE MODELE D'ISING à deux dimensions est un réseau de spins pointant vers le haut (en rouge) ou vers le bas (en vert). Dans l'état représenté ici, la température varie du haut vers le bas, ce qui conduit à un mélange de spins plus désorientés en haut qu'en bas, où les interactions dominant la désorganisation thermique édifient de grands domaines d'orientation uniforme.

d'énergie minimale, puisque toutes les paires de spins sont formées par des voisins parallèles. Si nous inversons maintenant chacun des 5 000 spins situés à droite du milieu de la rangée, l'aimantation moyenne s'annule puisque le nombre de spins qui pointent vers le haut est égal à celui des spins qui pointent vers le bas. Pourtant, le système a pratiquement la même énergie, puisque seule la paire centrale est antiparallèle ; les 9998 autres sont parallèles ! On en conclut que le couplage entre spins est trop faible, dans ce cas, pour vaincre l'agitation thermique, même la plus infime. En d'autres termes, l'état d'énergie minimale est si proche des autres états, que même les fluctuations thermiques les plus faibles empêchent le système de s'y stabiliser.

Il semble qu'Ising pensait qu'il n'existerait pas non plus de transition de phase aux dimensions supérieures. En cela, le pionnier du magnétisme avait tort.

Ouvrons une parenthèse sur sa vie. Son doctorat obtenu, Ising commença par enseigner la physique dans les lycées publics. Parce qu'il était juif, il fut licencié, en 1933, peu après la prise de pouvoir par Hitler. Après un court séjour en France, il retourna en Allemagne pour enseigner à Potsdam dans une école juive. Il en fut nommé directeur, mais l'établissement fut détruit au cours de la *Nuit de Cristal*, en 1938. Ising et son épouse fuirent alors leur patrie pour se réfugier au Luxembourg. Ils survécurent à l'occupation, et émigrèrent aux États-Unis en 1947. Ce n'est que deux ans plus tard, en 1949, qu'Ising prit

conscience de la portée de ses travaux. Aux États-Unis, il enseigna la physique et les mathématiques pendant presque 30 ans à l'Université de Peoria, dans l'Illinois. Il mourut dans cette ville à 98 ans.

Passé inaperçu, le modèle d'Ising fut redécouvert par le physicien britannique Rudolf Peierls dans les années 1930. Celui-ci comprit qu'un réseau de spins à deux dimensions a un tout autre comportement que celui d'un peigne. Une considération sur l'énergie indique pourquoi : imaginons 10 000 spins, tous pointés vers le haut (100 peignes de 100 spins alignés). Si nous en basculons 5 000 pour abolir l'aimantation, au minimum 100 paires de spins sont antiparallèles. Notons que l'état où exactement 100 paires sont antiparallèles est celui où la moitié des peignes, tous voisins, sont basculés (voir la figure 4). Dans tous les autres états, c'est-à-dire quand les 5 000 spins basculés sont répartis dans tout le système, beaucoup plus de 100 paires sont antiparallèles. Nous voyons donc que le «prix énergétique» à payer pour annuler l'aimantation d'un système d'Ising à deux dimensions est beaucoup plus grand que dans le cas unidimensionnel (il est supérieur à l'énergie d'interaction de 100 paires au moins !). Peierls eût l'intuition – juste – qu'au-dessous d'une certaine température, l'agitation thermique ne suffit plus à faire sortir le système de son état d'énergie minimale.

Le carré d'Ising

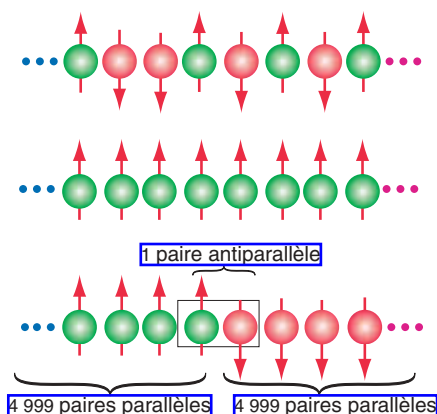
Pour s'en assurer, il fallait calculer la probabilité, à toutes les températures, de chacune des configurations possibles de spins. Prenons le cas simple du carré de spins. Considérons un système d'Ising à deux dimensions composé de quatre spins disposés aux sommets d'un carré. Puisque chacun des quatre spins prend deux valeurs, le système peut adopter 2^4 , c'est-à-dire 16 configurations possibles. Dans chaque cas, l'aimantation est égale à la différence entre le nombre de spins pointant vers le haut et le nombre de spins pointant vers le bas. Le calcul des états d'un tel système ne fait donc appel qu'à un peu d'arithmétique élémentaire. Comment en déduire la probabilité de chaque état à une température donnée ?

La réponse est donnée par le principe fondamental de la physique statistique selon lequel la probabilité que

le système se trouve dans un état donné est proportionnelle à la valeur donnée par la loi de distribution de Boltzmann. Cette dernière est définie par l'inverse de l'exponentielle de l'énergie du système E , divisée par sa température T , c'est-à-dire par la formule $e^{-E/T}$. Notons que si l'on veut exprimer l'énergie et la température dans le système international d'unités, c'est-à-dire en joules et en kelvins, il faut faire intervenir une constante dans cette définition. Celle-ci, la constante de Boltzmann, divise l'énergie du système. Ici, nous la négligerons.

La simple structure de la loi de distribution de Boltzmann est déjà riche d'enseignements. Si la température est élevée, $e^{-E/T}$ a une valeur proche de 1, quelle que soit l'énergie, et toutes les configurations ont la même probabilité d'exister. À basse température, au contraire, de minimes baisses d'énergie conduisent à une remontée du quotient E/T , ce qui suffit à faire considérablement augmenter l'exponentielle $e^{-E/T}$. Les états de basse énergie sont donc favorisés. Afin d'obtenir la probabilité exacte d'une certaine configuration, on doit normaliser la distribution de Boltzmann, c'est-à-dire diviser chaque valeur de $e^{-E/T}$ par la somme de toutes ses valeurs possibles ($\sum e^{-E/T}$, le symbole sigma, Σ , indiquant la sommation des exponentielles). Remarquons que la somme de toutes les valeurs possibles de la quantité $[e^{-E/T} / \sum e^{-E/T}]$ vaut 1, ce qui est normal puisque c'est la probabilité que le système soit dans l'une quelconque des configurations possibles. La quantité $Z = \sum e^{-E/T}$ est nommée fonction de partition. Elle joue un rôle essentiel dans la compréhension du système d'Ising et d'une manière générale de celle des systèmes à grand nombre de particules.

On détermine aisément la fonction de partition d'un système à quatre spins (voir figure 5). Pour ce faire, on calcule la valeur de $e^{-E/T}$ pour chacune des 16 configurations, puis on ajoute les résultats. Ainsi, pour une température égale à 2 (dans les unités du modèle), la somme des valeurs de la distribution de Boltzmann est égale à 27,05. À cette même température, la valeur donnée par la loi de Boltzmann pour la configuration où les quatre spins pointent vers le haut est d'environ 7,39 ; la probabilité de cette configuration est donc de $7,39 / 27,05$ soit environ 0,27. Cela signifie que l'état «aimanté» (à quatre spins pointés vers le haut) apparaît pendant un peu plus du quart du temps.



3. UN PEIGNE DE SPINS quelconque (en haut) avec ses nombreuses paires parallèles et antiparallèles. Au milieu, l'aimantation est maximale et l'énergie est minimale quand tous les spins sont parallèles. En bas, quand la moitié des spins ont été basculés, l'énergie du système est à peine supérieure à sa valeur quand tous les spins sont alignés, car il n'y a qu'une seule paire antiparallèle.

Si un tel calcul est simple à quatre spins, à 40 spins, il y a déjà quelque mille milliards de configurations possibles, et même les ordinateurs les plus puissants calculent difficilement la fonction de partition correspondante. À 400 spins, il ne faut même pas y songer... Pourtant, ce sont bien les grands nombres de spins qui nous intéressent puisque nous souhaitons connaître la fonction de partition dans la «limite thermodynamique», c'est-à-dire quand le nombre de spins tend vers l'infini.

Le calcul exact de la fonction de partition du modèle bidimensionnel est certes difficile, mais pas impossible. En 1944, Lars Onsager, un chimiste de l'Université Yale, en publia le résultat, suscitant surprise et admiration. Onsager ne procède pas par dénombrement direct mais utilise avec maestria l'algèbre des opérateurs. Je ne me risquerai pas à expliquer ici son calcul, et me contenterai de souligner qu'il obtient une expression exacte de la fonction de partition du système à la limite thermodynamique. Toutes les propriétés macroscopiquement observables du modèle peuvent être déduites de ce résultat. La théorie d'Onsager décrit notamment l'apparition de l'aimantation à une température critique T_c . L'aimantation y est proportionnelle à la quantité $(T_c - T)^{1/8}$. Notons que $(T_c - T)^{1/8}$ prend des valeurs au-dessous de la température critique, mais n'est pas définie au-dessus de cette température parce que cette quantité cesse alors d'avoir des valeurs réelles. En d'autres termes, l'aimantation disparaît au-dessus de la température critique.

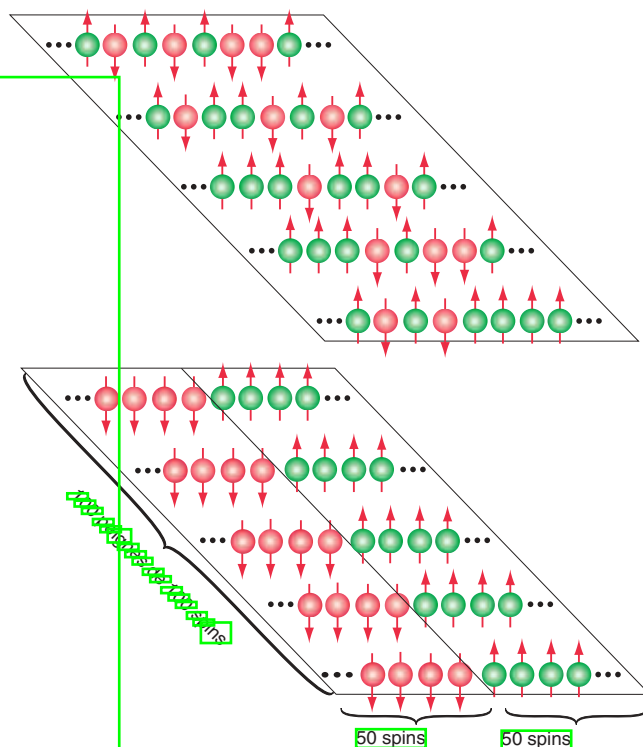
Le premier calcul exact

Une fois le chemin ouvert par Onsager, le modèle d'Ising à deux dimensions fut résolu par plusieurs méthodes. On a aussi fait des calculs dans le cas de systèmes à deux dimensions qui ressemblent à celui d'Ising, mais qui diffèrent par un aspect de leur géométrie ou par le type d'interaction des spins. Malheureusement, jusqu'à présent, le modèle d'Ising à trois dimensions n'a pas été résolu de manière exacte, ce qui frustre les physiciens.

Que change une dimension de plus? Certes, un modèle est plan, l'autre non. Pourtant la géométrie du réseau – les distances et les angles – ne joue aucun rôle dans la définition de la fonction de partition. Seule compte la topologie du

système, c'est-à-dire les connexions entre les sites les plus proches. Imaginons un système d'Ising tridimensionnel, un cube dont les arêtes renferment le même nombre de spins. Un tel système est constitué par l'empilement d'un certain nombre de carrés de spins. Nous pouvons les faire glisser, puis les disposer sur un plan. Le carré de spins de grande taille ainsi obtenu est-il un modèle d'Ising bidimensionnel? Non. La différence tient au fait que pour respecter la structure des interactions à trois dimensions, il faut admettre que de nombreux spins interagissent avec tous ceux qui leur sont proches à trois dimensions. Les anciens voisins participent donc à une série d'interactions à distance, que les spécialistes du modèle d'Ising qualifient de «liaisons non planes». Un système d'Ising tridimensionnel est donc l'équivalent d'un système d'Ising bidimensionnel, auquel on a ajouté un certain nombre de liaisons non planes, ce qui change... tout!

Tullio Regge de l'Institut Polytechnique de Turin et Riccardo Zecchina du Centre international pour la physique théorique de Trieste se sont récemment intéressés à la fonction de partition d'un réseau bidimensionnel, que l'on rend tridimensionnel en ajoutant des liaisons non planes, une à une. Ils espèrent ainsi explorer progressivement le territoire qui sépare les modèles d'Ising bidimensionnels des modèles tridimensionnels. Ils ont constaté qu'à chaque fois que l'on ajoute une liaison non plane, le volume du calcul nécessaire pour la fonction de partition double, quelle que soit la méthode utilisée. Les temps de calcul augmentent donc exponentiellement avec le nombre de liaisons non planes. C'est pourquoi le système d'Ising à trois dimensions est beaucoup plus difficile à résoudre que celui à deux dimensions. Curieusement, au-delà de trois dimensions, la situation se simplifie. Dans un réseau à quatre dimensions (et plus), les connexions sont assez denses pour qu'il soit possible de considérer que chaque spin est soumis à un



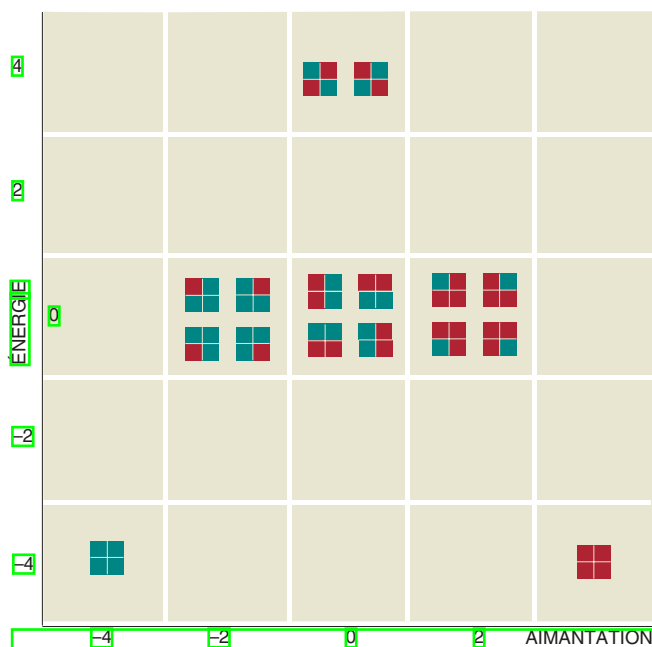
4. A DEUX DIMENSIONS (en haut), le modèle d'Ising présente un tout autre comportement qu'à une dimension. Le prix énergétique à payer pour faire sortir le système d'Ising à deux dimensions d'un état d'aimantation est beaucoup plus grand que dans le cas unidimensionnel. Ainsi, dans le cas d'un système de 10 000 spins composé de 100 peignes de 100 spins (en bas), le prix énergétique à payer pour faire passer le système de l'état de complète aimantation (10 000 spins parallèles) à celui où 5 000 spins ont basculé est au moins égal à l'énergie d'interaction de 100 paires.

champ magnétique moyen résultant de la combinaison des spins voisins.

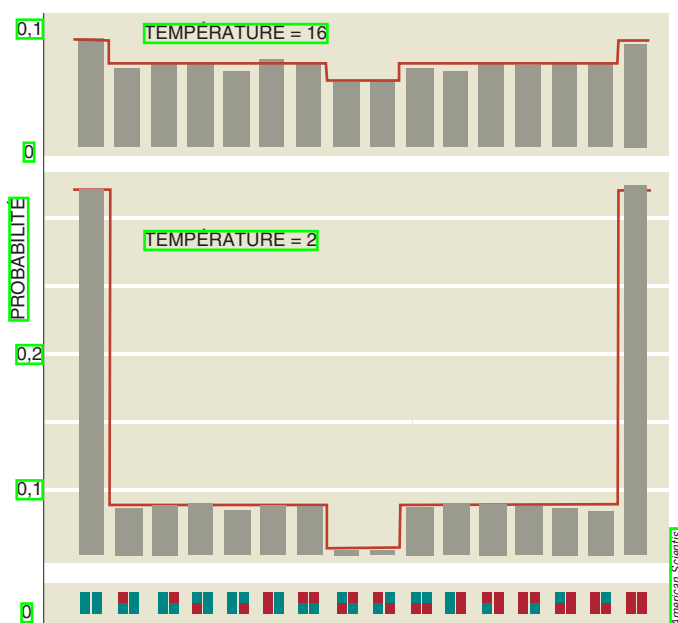
Je ne voudrais pas laisser croire que l'on ignore tout du modèle d'Ising à trois dimensions. Certes, le calcul exact de sa fonction de partition reste à faire, mais la région proche du point critique a pu être étudiée par diverses méthodes approximatives. L'une de ces approches, le développement en séries, aurait plu à Laplace. On extrapole les solutions à basse et à haute température pour en déduire leur comportement dans la région des températures intermédiaires.

Une autre méthode d'approximation a un nom qui pourrait évoquer les pires moments du stalinisme : le groupe de renormalisation. Pour résumer, l'algorithme tiré de la théorie de la renormalisation consiste à réunir des sous-ensembles de spins par blocs (carrés de spins,...), puis à remplacer chaque bloc par un spin équivalent ; ensuite, les liaisons entre les spins ainsi redéfinies sont ajustées afin de compenser l'effet de la création des blocs.

Une dernière technique est très employée pour explorer de façon approchée le modèle d'Ising à trois dimensions : la méthode de Monte Carlo. Elle porte ce nom parce qu'elle



5. SEIZE ÉTATS différents sont adoptés par le modèle d'Ising à deux dimensions et à quatre spins. À gauche, en abscisse, l'aimantation des états est égale au nombre de spins rouges moins celui de spins verts, et prend toutes les valeurs entières entre -4 et $+4$. En ordonnée, l'énergie est égale au nombre de paires antiparallèles diminué du nombre des paires parallèles, et prend des valeurs entières entre -4 et $+4$. Afin de rendre les calculs symétriques, l'énergie des états intermédiaires sert de référence, de sorte qu'il



apparaît des états d'énergie négative! Cette convention est propre au modèle d'Ising. À droite, les probabilités affectées à ces états par la distribution de Boltzmann sont données pour deux températures différentes. En haut, lorsque la température est égale à 16 dans les unités du modèle, les seize états sont quasi équiprobables. En bas, une température inférieure (égale à 2) favorise les deux états de basse énergie, ceux où tous les spins pointent dans la même direction.

est fondée sur l'utilisation de générateurs de nombres aléatoires – l'équivalent des roulettes de Monte Carlo – qui donnent une approximation de la distribution des probabilités des configurations de spins. Elle joue un rôle si important que je vais la développer.

La catastrophe du damier clignotant

L'exploration du modèle d'Ising à l'aide de puissantes méthodes mathématiques, telles que le groupe de renormalisation ou les méthodes algébriques d'Onsager, a déjà fourni beaucoup de résultats intéressants. Toutefois, le projet de Laplace n'est toujours pas réalisé : on ne sait déduire l'évolution du système inventé par Ising de l'observation des événements microscopiques qui s'y déroulent. N'existe-t-il pas un moyen empirique d'apprendre ce qui se passe sur le réseau? Ne pourrait-on pas tout simplement programmer un système d'Ising, puis le regarder évoluer? C'était précisément l'objectif – naïf – du seul programme informatique que j'ai jamais écrit. Il s'agissait d'un modèle d'Ising bidimensionnel, que j'avais paramétré à l'aide d'un tableur. Puisque ce type de logiciel est conçu pour traiter des tables, il se prête naturellement à l'enregistre-

ment des états successifs d'un réseau. À chaque itération, l'état de chaque case du tableur était déterminé en fonction de l'état des quatre cases voisines. En outre, j'avais pris soin de programmer une forme d'agitation thermique, de sorte que le basculement de chaque spin est d'autant plus probable que la température est élevée. Naturellement, je m'attendais à voir s'étendre une phase magnétique, dès qu'une certaine température était atteinte.

Ce que je vis au lieu de cela me rendit perplexe. Certaines zones étaient bien aimantées, mais les autres faisaient penser à un damier dont les lignes blanches et noires ne cessaient d'alterner. Dans ce «damier clignotant», les lignes de spins orientés vers le haut étaient séparées par des lignes de spins orientés vers le bas qui basculaient simultanément de sorte que cette étrange structure se maintenait. Cette configuration semblait pourtant être la moins favorable, puisqu'elle rendait maximal le nombre de paires antiparallèles! Je soupçonnais un moment une erreur de programmation, mais je n'en trouvais aucune...

Mes amis Tommaso Toffoli, Norman Margolus et Gérard Vichniac, de l'Institut de technologie du Massachusetts reconnurent l'erreur avant même d'avoir examiné mon pro-

gramme. Imaginons un spin pointant vers le haut quelque part au milieu d'une zone clignotante du damier. Ses quatre voisins pointent tous vers le bas, ce qui l'incite à basculer vers le bas pour les rejoindre. Toutefois, chacun de ces voisins est lui-même entouré de quatre spins pointant vers le haut et tend à changer de sens. C'est pourquoi tous les spins s'inversent à chaque étape en une alternance sans fin.

L'apparition de cette anomalie illustre les difficultés de la modélisation numérique. Il suffisait de changer un détail de programmation pour se débarrasser de cet artefact : l'ordre de la séquence par laquelle les spins «examinent» l'état de leurs voisins et «décident» de leur propre état futur. Mes amis connaissaient un remède : le problème disparaîtrait si je paramétrais le tableur selon une séquence inspirée de la structure d'un damier. Les «cases noires» devaient être toutes traitées avant les cases blanches. L'astuce était ingénieuse et fonctionna parfaitement.

Cependant, qu'en aurait pensé Laplace? J'avais du mal à croire que les spins d'un aimant suivent une séquence précise pour éviter de basculer sans cesse, et que la moitié des atomes de fer attendent poliment leur tour avant de «décider» quelle sera la

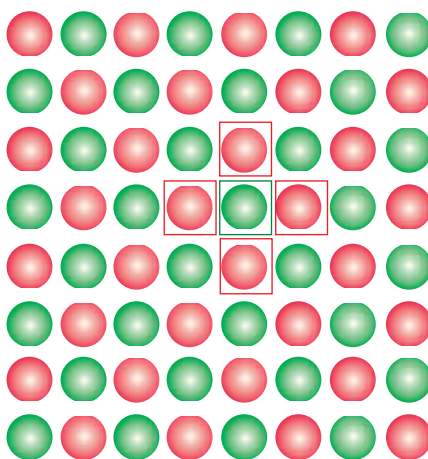
configuration de leur spin. La nature se passe de ce genre d'artifices. Pourquoi, alors, sont-ils indispensables dans les simulations numériques conçues pour la représenter ?

Une réponse à cette question est que la nature possède un meilleur ordinateur que les nôtres. L'artefact du damier clignotant résulte du rythme sur les changements d'état des spins imposé par le microprocesseur. Si nous disposions d'un processeur par spin, le problème de l'ordre des changements ne se poserait plus, puisque tous les spins basculeraient simultanément. Toutefois, je crains que la construction d'un ordinateur parallèle de taille gigantesque ne remplace le problème de l'ordre des inversions de spins par un autre : celui de la synchronisation. Je comprends mal comment tous les spins pourraient interroger tous leurs voisins au moment même, où ils sont eux-mêmes interrogés sur leur état ; cela me semble une énigme encore plus ardue que celle de l'ordre d'inversion des spins.

La méthode de Monte-Carlo

La méthode de Monte-Carlo élude ces difficultés grâce au hasard. À chaque itération, l'algorithme sélectionne un seul spin et examine quelles conséquences aurait son inversion. Si l'inversion réduit l'énergie totale du système, le programme l'effectue. Sinon, si l'énergie du système croît, le spin est soit inversé, soit laissé tel quel... au hasard ; pour prendre cette décision, l'ordinateur emploie un générateur de nombres aléatoires, de telle sorte que la répartition globale des spins basculés suit la statistique de Boltzmann. De cette façon, tout se passe comme si la probabilité d'inversion d'un spin particulier était celle que lui affecte la distribution de Boltzmann.

La plupart de ses utilisateurs considèrent la méthode de Monte Carlo comme un outil efficace pour estimer la fonction de partition. Toutefois, cet algorithme semble avoir en lui quelque chose de si physique, qu'il est tentant de le considérer comme une simulation de ce qui pourrait réellement se passer au sein d'un système d'Ising. Laplace aurait sans doute sourcillé en voyant le hasard jouer un si grand rôle dans cette simulation, mais nous sommes habitués à l'idée aujourd'hui. Personnellement, je trouve plus gênant de plaquer la sta-



6. DANS CETTE CONFIGURATION, chaque spin orienté vers le haut (dans le carré vert, par exemple) est entouré de quatre voisins (dans les carrés rouges) orientés vers le bas, qui le font basculer, et réciproquement. Le système est semblable à un damier clignotant, dont les lignes vertes et rouges alternent sans cesse. Plusieurs modèles numériques prédisent cette configuration, pourtant la plus improbable. Il s'agit là d'un artefact dû à la nature itérative des calculs à la machine.

tistique de Boltzmann sur le comportement collectif des spins. Un système physique ne décide rien et ne calcule aucune probabilité du type $e^{-E/T}$! Même dans le cadre d'une simulation, je continue à préférer la démarche empirique, dans laquelle on ne programme que les comportements individuels, sans imposer aucune loi physique au système.

C'est pourquoi, parmi toutes les simulations numériques du modèle d'Ising, celle de Michael Creutz, du laboratoire de Brookhaven, est la plus séduisante. Elle a en effet l'intérêt d'être strictement déterministe, c'est-à-dire d'exclure le hasard, sauf dans le choix des conditions initiales. Dans le modèle de M. Creutz, chaque spin se voit attribuer une énergie d'interaction définie par l'état des voisins les plus proches et une énergie ciné-

tique. Ce terme, qui représente l'énergie communiquée aux spins par les fluctuations thermiques, agit comme l'équivalent d'un réservoir d'énergie, absorbant les excès d'énergie et les restituant si nécessaire. Lors d'une itération, un spin ne s'inverse que si et seulement si sa réserve d'énergie cinétique peut couvrir le coût énergétique. En d'autres termes, il faut que l'énergie cinétique en réserve égale au moins l'énergie nécessaire à l'inversion du spin. Ce modèle a cependant lui aussi la faiblesse d'aboutir parfois à un état de type « damier clignotant ». M. Creutz impose lui aussi un séquençage. Une fois de plus, un artifice est nécessaire pour que la simulation fonctionne.

Est-ce si étonnant ? Après tout, exiger d'un programme informatique qu'il nous montre ce qui se passe « réellement » au sein d'un système qui n'existe pas, est plutôt excessif. Le modèle d'Ising n'est qu'une construction théorique inventée pour simplifier la réalité ; toutes les structures y sont supposées discrètes et symétriques, au sens mathématique du terme. Dans un monde aussi parfait, un comportement symétrique comme celui du « damier clignotant » est sans doute un véritable régime du système. S'il ne se produit pas dans les ferromagnets réels, c'est tout simplement parce qu'ils ne sont pas parfaits ! Ainsi, G. Vichniac a montré que lorsque les spins d'Ising peuvent se balancer, même légèrement, le syndrome du damier clignotant disparaît. Sans doute pourrait-on aussi le faire disparaître en brisant la symétrie temporelle ou spatiale, ou en d'autres termes en introduisant une forme quelconque « d'imperfection ». Une idée de la simulation du monde réel qui n'aurait certainement pas enchanté Laplace.

Brian HAYES est journaliste scientifique et ancien éditeur de *American Scientist*. Cet article est reproduit avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

Pierre Simon DE LAPLACE, *Essai philosophique sur les probabilités*, Gauthier-Villars, 1921.

Ernst ISING, *Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus*, in *Zeitschrift für Physik*, vol. 31, pp. 253-258, 1925.

Stephen BRUSH, *History of the Lenz-Ising Model*, in *Reviews of Modern Physics*, vol. 39, pp. 883-893, 1967.

Rodney BAXTER, *Exactly Solved Models in Statistical Mechanics*, Academic Press, London, New York, 1982.

Michael CREUTZ, *Deterministic Ising Dynamics*, in *Annals of Physics*, vol. 167, pp. 62-76, 1986.

Barry CIPRA, *An Introduction to the Ising Model*, in *American Mathematical Monthly*, vol. 94, pp. 937-959, 1987.

Martin KRIEGER, *Constitution of Matter: Mathematical Modeling of the Most Everyday of Physical Phenomena*, University Press, Chicago, 1996.



Un bouquet de Bruegel

GERARD-GUY AYMONIN

Vous reconstituerez difficilement le bouquet : les fleurs sont reproduites fidèlement et identifiables, mais elles fleurissent à différentes saisons.

Ce bouquet (voir la figure de la page ci-contre), daté de 1603 et exposé à la Grande Pinacothèque de Munich, est l'une des nombreuses compositions florales attribuées à Jean Bruegel (1568 - 1625). Issu d'une famille de peintres flamands, il a été qualifié « de velours » pour la délicatesse des tons et la matière fine et brillante de ses peintures. En 1607, Bruegel a peint une deuxième version, plus petite, de ce bouquet (voir la reproduction à côté du titre) ; elle est exposée à Vienne.

Les bouquets de Bruegel comptent parmi les plus complexes : ce sont de véritables tapisseries florales. Plus de 130 motifs sont représentés dans ce « Bouquet au baquet ». Il est historiquement intéressant d'identifier les plantes qui illustrent les variétés florales de l'époque, mais la tâche est rendue difficile par l'absence de certains caractères de discrimination indispensables au botaniste, tels les organes souterrains.

À la différence de l'esthétique des bouquets d'aujourd'hui, la partie basse du bouquet de Bruegel présente un assortiment touffu de petites corolles, tandis que les fleurs les plus spectaculaires ornent le haut du bouquet.

Plus de 20 familles végétales sont représentées, avec une prédominance des espèces à bulbes, telles les liliacées, les amaryllidacées et les iridacées. Le motif supérieur (1), classique à l'époque, est une couronne impériale (*Fritillaria imperialis*), admirée par Shakespeare dans l'Épître au Prince d'Aremberg. Facilement reconnaissable par les touffes de bractées qui surmontent la fleur renversée, elle est aussi nommée « larmes de Marie » en raison des gouttelettes blanchâtres de nectar qui coulent parfois de l'intérieur de sa corolle.

Les rameaux de fraisier en fruits (2), dans la partie inférieure à droite du bouquet, sont également un symbole de Marie.

Au centre, entre la tulipe et la rose, toutes deux blanches, on remarque deux fritillaires du groupe des « pintadines », car leurs motifs en damier rappellent la robe des pintades : il s'agit sans doute de *Fritillaria meleagris*.

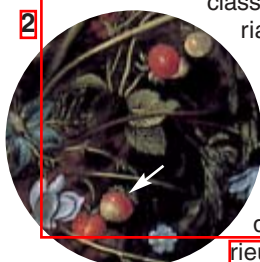
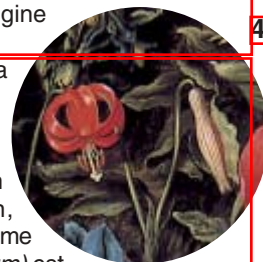
À droite de la couronne impériale, la fleur volumineuse est une « pivoine officinale double » (3) dont on connaissait à l'époque les vertus antispasmodiques, anti-inflammatoires et sédatives des racines. Elle est dite *flore pleno*, car sa corolle contient plusieurs rangs de pétales alors que les espèces sauvages n'en ont qu'un : elle

résulte d'une sélection par des horticulteurs. Cette pivoine rouge est européenne : au XVII^e siècle, les espèces blanches ou jaunes, d'origine asiatique, sont inconnues.

Entre la couronne impériale et la pivoine, deux fleurs rouges de lis (4) : l'une est ouverte, l'autre en boutons. L'absence de feuilles visibles empêche de déterminer s'il s'agit d'un lis de Byzance ou d'un lis turban, espèces cultivées à l'époque. De la même famille, le lis orangé (*Lilium bulbiferum*) est représenté plusieurs fois et le lis de la vierge (*Lilium candidum*), également visible sur des fresques assyriennes et crétoises, constitue le grand motif blanc à gauche (5). Certains des lis ont des fleurs dressées, à la différence d'un joli lis martagon rose-mauve (6) qui complète la collection, au centre à droite, sous le lis orangé. Les pétales de ce lis martagon à fleurs pendantes sont enroulés vers l'arrière.

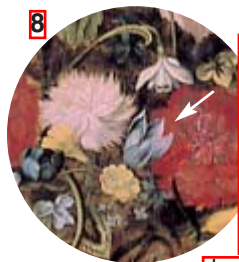
La variété des espèces indique qu'il s'agit d'un bouquet « artificiel », car elles ne fleurissent pas simultanément en conditions naturelles et leurs origines géographiques sont différentes : ainsi, le lis martagon pousse dans les montagnes d'Europe, le lis orangé dans les Alpes, le lis de Byzance en Grèce et le lis de la vierge, des Balkans jusqu'en Israël. Par ailleurs, des fleurs de rocaïlle, telle la couronne impériale sauvage de la Turquie au Cachemire, jouxtent d'autres fleurs qui poussent dans les prés humides, telles les fritillaires pintadines.

La partie haute du bouquet montre aussi une ancolie (*Aquilegia vulgaris*) de la famille des renonculacées, sous sa forme simple et *flore pleno*. À gauche de l'ancolie, un élégant rameau d'une églantine (7) à corolle blanche, à folioles arrondies, est délicat à identifier, car on ne distingue ni le calice, ni les aiguillons. Est-ce *Rosa agrestis* Savi ou une rose des chiens, plus commune ? Les fleurs de cette dernière sont aussi grandes que celles de la fritillaire centrale, alors que les fleurs de *Rosa agrestis* Savi sont plus petites. Les fleurs ici sont également plus petites, mais on ne sait pas si elles sont sur le même plan que la fritillaire ou en retrait. Il en va de même pour la campanule, à gauche de la fritillaire, dont les proportions apparentes ne respectent peut-être pas la réalité à cause de la perspective.





8



Le bouquet contient aussi cinq espèces d'iridacées : un très petit crocus (8), différent de celui dont on extrait le safran, près du vase ; un glaïeul charmé mêlé au lis de la vierge, et trois iris bleutés, dont deux *Iris germanica* à larges pétales et un, dit de Hollande (9), beaucoup plus fin (à droite

de la tige de la couronne

impériale), ainsi qu'un iris à petites fleurs panachées, peut-être une forme cultivée d'*Iris tuberosa*.

Comment Bruegel aurait-il pu oublier les tulipes, les fleurs à la mode ? L'histoire mouvementée de ces fleurs, dont le nom vient du persan *tulipan* qui signifie turban, commence à l'aube du XVII^e siècle, au moment où est peint le tableau. En 1554, Augier Ghislain de Busbecq, ambassadeur des Habsbourg à Constantinople, envoie quelques bulbes des fleurs favorites du sultan Soliman le Magnifique au directeur du jardin impérial de Vienne, Charles de L'Écluse. Celui-ci introduit en Hollande ces fleurs qu'il acclimate au pays. En peu de temps, les tulipes deviennent la coqueluche de l'aristocratie locale et, en 1630, mènent certains spéculateurs à jouer sur le cours des oignons de tulipe et à s'y ruiner. Au moins huit formes horticoles – aucune sauvage – trônent dans le vase. Les horticulteurs avaient déjà amélioré les espèces et obtenu de nouvelles variétés. L'une est bicolore (jaune et rouge) au centre du bouquet (10) : cette race est souvent nommée tulipe de Rembrandt, car elle apparaît régulièrement dans les toiles du maître hollandais. On sait aujourd'hui que cette propriété est due à un virus, celui de la mosaïque. Une autre, à gauche de la précédente, a des pétales un peu dentés : elle préfigure les futures tulipes dites «perroquets» que l'on cultive aujourd'hui.

Une belle diversité caractérise aussi les jonquilles (Amaryllidacées) : des narcisses à bouquets, jaunes ou blancs ; des jeannettes blanches ou jaunes (11) et peut-être aussi une petite espèce dite trompette de méduse. Quelques rameaux complètent le bouquet : au centre à gauche, une «boule de neige» (*Viburnum opulus*), en bas à droite, une branche de mûrier noir (*Morus nigra*) en fruit et un agrume à fleurs blanches du genre *Citrus*, peut-être un oranger.

Au pied du vase, à gauche, la seule plante dont on aperçoit un organe souterrain (12) est un cyclamen (Primulacées) : le tubercule aplati ainsi que les marbrures caractéristiques des feuilles indiquent un cyclamen printanier du groupe *Cyclamen repandum*, plutôt qu'un cyclamen d'Europe, à tubercules plus petits et sphériques, ou qu'un cyclamen à feuilles de lierre. Ces derniers, automnaux, contrasteraient avec le reste du bouquet, principalement printanier, à l'exception du mûrier en fruits.

Parmi les fleurs tombées sur la table, on identifie une pervenche, de la bourrache,

9



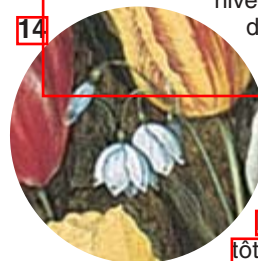
une rose en boutons et un petit brin de romarin dont un rameau pend du bouquet.

Si les grandes fleurs sont assez aisées à identifier, il en va autrement de l'entrelacs des fleurettes. Ce bouquet est plus riche que d'autres comparables, tels les bouquets de Bruegel «en vase d'argile» et «en vase de verre».

Dans cette masse foisonnante, le bleu est celui, de droite à gauche, d'une bourrache officinale, d'une scille, d'une nigelle de Damas (13) *flore pleno* d'allure ébouriffée, de fines tiges pendantes de myosotis, d'une pervenche vue de face et d'une autre vue de côté.

Le blanc est celui des fleurs du fraisier, des cyclamens, d'un œillet double au centre. Ce dernier est surmonté d'une fleurette blanche, à corolle penchée, qui illustre les deux types de tépales (les tépales sont des sépales ressemblant à des pétales) : c'est l'une des fleurs les plus précoces du bouquet, le perce-neige (*Galanthus nivalis*) dont la famille botanique, les Amaryllidacées, est aussi représentée par plusieurs nivéoles (14). Les clochettes les plus visibles de ces fleurs sont entre la tulipe rouge et la tulipe bicolore, au bas de la tige de la grande fritillaire.

14



Les fleurs rouges ou roses sont aussi diverses : à droite, une fleur parfois affiliée aux coquelicots, cependant l'absence de tâches noires à la base des pétales atteste plutôt une anémone double.

De la même famille, bien

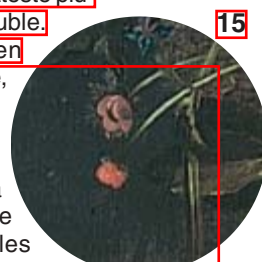
que l'on n'en distingue pas le fin feuillage, des gouttes-de-sang (*Adonis* annuels) déploient leurs petites corolles rouge sombre, en bas à gauche (15). En trois endroits, et notamment à gauche de la tige de la fritillaire centrale, on remarque les nombreuses corolles à cinq pétales vermillon des croix de Jérusalem (*Lychnis chalcidonica*) qui auraient inspiré la croix de l'ordre des Chevaliers de Malte.

En jaune et en orange, on reconnaît les capitules de composées – des soucis doubles ou des œillets d'Inde –, les petites corolles vives des boutons d'or, une fleur pompon d'une espèce cultivée de renoncule d'Asie. Sur le bord du vase, de nombreuses petites pensées étalent leurs trois pétales basaux jaunes. Enfin, au centre, une sphère jaune est entourée de bractées vertes : il s'agit de l'hellébore d'hiver (16) qui fleurit, dès janvier, avec les perce-neige.

Nous l'avons remarqué, ce magnifique bouquet ne peut être le fait d'une cueillette de fleurs dans la nature. Plus encore, il est difficile d'imaginer un mon-

tage à un instant précis, même à l'aide des premières orangeries qui protégeaient les plantes durant l'hiver : la floraison, entre autres, des perce-neige, des fritillaires, des pivoines et des rosiers, ainsi que la présence de fraises mûres montrent qu'il s'agit plutôt d'une œuvre de longue haleine. Bruegel avait une bonne mémoire, ou il a inséré les fleurs de sa composition au gré des saisons.

15



16



Gérard-Guy AYMONIN est botaniste au Laboratoire de phanérogamie du Muséum national d'histoire naturelle.



Ce qui est faux... peut être utile

JEAN-PAUL DELAHAYE

La variété des erreurs commises éclaire la nature du travail mathématique : *Errare mathematicum est.*

Les principes du raisonnement par syllogisme énoncés par Aristote il y a 20 siècles nous enseignent que l'homme est faillible (*Errare humanum est*) et que le mathématicien étant un homme, il est nécessairement faillible.

Pourtant en consultant l'index de livres d'histoire des mathématiques, j'ai constaté que le mot « erreur » y était toujours absent. Les historiens des mathématiques tentent-ils de masquer les innombrables cas d'erreurs, graves ou bénignes, qui les empêchent de concevoir le développement des mathématiques comme une avancée régulière produisant une accumulation continue de vérités garanties.

Sans doute, plus simplement, l'histoire ne retient que ce qui est juste et engloût dans l'oubli toutes les démarches infructueuses, les preuves erronées, les prétentions ridicules et infondées dont l'existence même finit par être niée.

Pourtant, combien de fausses démonstrations du grand théorème de Fermat avant qu'enfin une preuve complète en soit proposée il y a six ans ! Combien de prétendues quadratures du cercle jetées au panier avant que Ferdinand Lindemann établisse de manière irréfutable, en 1882, qu'aucune construction ne conviendra jamais ! Combien de prétendues solutions envoyées aux académies par des passionnés souvent mal informés pour chacune des conjectures célèbres (Goldbach, Syracuse, Riemann, nombres parfaits impairs, $P \neq NP$, etc.) et que l'examen attentif révèle inopérantes !

S'il est vrai que les amateurs sont les champions des arguments inexacts, il serait naïf de croire que les erreurs sont uniquement le fait des incompetents : les plus grands mathématiciens commettent des fautes dans leurs travaux, et ne les voient parfois que tardivement après avoir clamé partout victoire. Il arrive même qu'ils ne voient pas leurs erreurs et c'est seulement lorsqu'un collègue s'interroge sur un point qui semblait aller de soi qu'ils découvrent la faille qui, selon les cas, est répa-

vable ou ne l'est pas. Les mathématiques contrairement à l'image populaire ne sont pas cette science de la précision absolue qui assure au professionnel consciencieux de ne jamais se tromper. Les volumineuses colonnes d'errata des livres de mathématiques en témoignent.

Tous les mathématiciens chercheurs ont d'ailleurs connu la désagréable expérience du résultat remarquable qu'ils viennent de prouver et qui s'effondre douloureusement à l'issue d'une série d'étapes implacables vécues comme un cauchemar. Un point « évident » de la démonstration qu'on avait pourtant pris le soin de rédiger minutieusement devient suspect. Quelque temps plus tard, après examen, le point soulevé apparaît douteux. Enfin, il se révèle irrémédiablement incorrect. Ensuite – et c'est le pire – vient parfois la découverte qu'il est impossible de contourner la difficulté et de réparer la brèche ouverte par la maudite question, et cela malgré toute l'énergie et le temps qu'on y consacre. Cet écroulement de l'édifice qu'on avait amoureux-ement construit durant des jours entiers est une déconvenue traumatisante seule comparable à celle que ressent le joueur de loto qui venant toucher le gros lot s'aperçoit que son billet porte le bon numéro... au détail près qu'il a confondu un 1 avec un 7 et qu'il n'a rien gagné du tout.

Toute l'histoire des mathématiques est semée d'épisodes où l'erreur joue un rôle. Parfois ce rôle est anecdotique et, une fois repérée et corrigée, l'erreur ne laisse plus de trace. Parfois, en revanche, l'erreur est centrale parce qu'elle oblige à reformuler une idée ou un théorème qui changent tout. Alors l'erreur est constructive et amène une avancée importante.

Les quelques exemples que nous allons évoquer ne représentent que la partie immergée de l'iceberg de l'erreur mathématique, erreur que la communauté s'efforce avec application de masquer, offrant au public une image nette et impeccable qui ne correspond pas à la réalité.

IL SUFFIT DE FAIRE LE CALCUL...

L'Antiquité est l'époque pendant laquelle la notion de preuve mathématique s'élabore et fluctue (quoique pour l'essentiel les démonstrations qu'on trouve dans les *Éléments* d'Euclide sont aujourd'hui considérées comme parfaitement rigoureuses). Aussi nous commencerons nos exemples bien au-delà, au XVII^e siècle.

Dans le simple domaine du calcul, des erreurs étonnantes ont été perpétrées et se sont transmises parfois durant de longues années. Le père Mersenne affirme en 1644 que $M_p = 2^p - 1$ est un nombre premier pour $p = 2, 3, 5, 7, 13, 17, 19, 31, 67, 127, 257$ et composé pour les autres exposants jusqu'à 257. Certes les calculs pour établir la divisibilité sont longs, mais puisqu'ils donnent ces résultats, on imagine que Mersenne a vérifié avec soin ses affirmations. Un siècle plus tard, Leonhard Euler prétend corriger Mersenne et écrit que M_{41} et M_{47} sont des nombres premiers. Il se trompe : aucun des deux nombres M_{41} et M_{47} n'est premier. Cela ne signifie pourtant pas que la liste de Mersenne est bonne et une première erreur y est trouvée en 1886 (plus de 200 ans après) par I. Persuvin qui établit que M_{61} est premier. Quatre autres erreurs seront découvertes par la suite : M_{67} et M_{257} ne sont pas premiers alors que M_{89} et M_{107} le sont (aujourd'hui ces résultats ont été vérifiés et revérifiés, et aucun doute ne subsiste concernant la bonne liste).

Toujours dans le domaine des nombres premiers, le grand Fermat à qui on doit tant de merveilles arithmétiques a en quelque sorte battu un record, celui de la conjecture la plus fautive possible. Fermat remarque que les nombres de la forme $F_n = 2^{2^n} + 1$ (dénommés par la suite nombres de Fermat) sont premiers pour n égal à 1, 2, 3 et 4. Il généralise ensuite en proposant que tout nombre de la forme $F_n = 2^{2^n} + 1$ est premier. Euler montrera que $F_5 = 4294967297 = 641 \times 6700417$, puis en

1. LES PLUS GRANDS MATHÉMATICIENS COMMETTENT DES ERREURS

Srinivasa Ramanujan (1887-1920) est considéré comme le plus formidable créateur de formules mathématiques qui ait jamais existé. Il possédait une invraisemblable capacité d'invention pour les résultats complexes et profonds dont en général il ne prenait pas la peine de donner la preuve. En 1913, Ramanujan qui était un employé inconnu et isolé dans son Inde natale, souhaitant prendre contact avec des mathématiciens européens, adressa une lettre à Godfrey Hardy (1877-1947) célèbre mathématicien britannique. Sa lettre contenait 120 énoncés purs, le plus souvent des formules, qu'il avait extrait de ses notes. Certains étaient déjà connus, mais beaucoup étaient nouveaux. Hardy indique que certaines des formules étaient très étonnantes : « Il suffisait d'un coup d'œil pour se rendre compte qu'elles n'avaient pu être écrites que par un mathématicien de tout premier rang : elles étaient sûrement vraies, car personne n'aurait pu avoir assez d'imagination pour les inventer. » Hardy fit venir Ramanujan en Angleterre où, en 1917, il devint membre de la *Royal Society*. Pourtant, comme Hardy le fait remarquer, certaines des formules de la lettre de 1913 sont fausses (la formule (1.14) par exemple). D'après Hardy, elles « montrent les limites de Ramanujan, mais en même temps constituent un signe de plus de ses dons extraordinaires ». Ailleurs, à propos de l'échec de Ramanujan en théorie des nombres où il commit de nombreuses erreurs, Hardy indique que « cet échec était plus important que n'importe lequel de ses triomphes ».



$$(1.5) \int_0^{\infty} \frac{1 + \left(\frac{x}{b+1}\right)^2}{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2} \cdot \frac{1 + \left(\frac{x}{b+2}\right)^2}{1 + \left(\frac{x}{a+1}\right)^2} \dots dx = \frac{1}{2} \pi^{\frac{1}{2}} \frac{\Gamma(a + \frac{1}{2}) \Gamma(b+1) \Gamma(b-a + \frac{1}{2})}{\Gamma(a) \Gamma(b + \frac{1}{2}) \Gamma(b-a+1)}.$$

$$(1.6) \int_0^{\infty} \frac{dx}{(1+x^2)(1+r^2x^2)(1+r^4x^2)\dots} = \frac{\pi}{2(1+r+r^3+r^5+r^7+\dots)}.$$

(1.7)* Si $\alpha\beta = \pi^2$, on a

$$\alpha^{-1} \left(1 + 4\alpha \int_0^{\infty} \frac{x e^{-\alpha x^2}}{e^{2\pi x} - 1} dx \right) = \beta^{-1} \left(1 + 4\beta \int_0^{\infty} \frac{x e^{-\beta x^2}}{e^{2\pi x} - 1} dx \right).$$

$$(1.8)* \int_0^{\infty} e^{-\alpha x^2} dx = \frac{1}{2} \pi^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2\alpha + \alpha + 2\alpha + \alpha + 2\alpha + \dots}.$$

$$(1.9)* 4 \int_0^{\infty} \frac{x e^{-\alpha x^2}}{\cosh x} dx = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}}}}} \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}}}}$$

$$(1.10)* \text{ Si } u = \frac{x}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}}, v = \frac{x^2}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}},$$

$$\text{alors } v^2 = u \frac{1 - 2u + 4u^2 - 3u^3 + u^4}{1 + 3u + 4u^2 + 2u^3 + u^4}.$$

$$(1.11)* \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}} \frac{e^{-2x}}{e^{-4x}} = \left(\sqrt{\frac{5+\sqrt{5}}{2}} - \frac{\sqrt{5}+1}{2} \right) e^{4x}.$$

$$(1.12)* \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}} \frac{e^{-2x\sqrt{5}} e^{-4x\sqrt{5}}}{e^{-4x\sqrt{5}}} = \left[\frac{\sqrt{5}}{1 + \sqrt{5} \left(\frac{\sqrt{5}-1}{2} \right)^4 - 1} - \frac{\sqrt{5}+1}{2} \right] e^{2x\sqrt{5}}.$$

$$(1.13) \text{ si } F(k) = 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^k k + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^k k^2 + \dots \text{ et } F(1-k) = \sqrt{(210) F(k)},$$

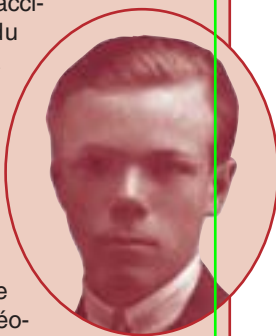
alors

$$k = (\sqrt{2}-1)^4 (2-\sqrt{3})^3 (\sqrt{7}-\sqrt{6})^4 (8-3\sqrt{7})^3 (\sqrt{10}-3)^4 \\ \times (4-\sqrt{15})^4 (\sqrt{15}-\sqrt{14})^3 (6-\sqrt{35})^2.$$

(1.14) Le coefficient de x^n dans $(1 - 2x + 2x^4 - 2x^9 \dots)^{-1}$ est l'entier le plus proche de

$$\frac{1}{4n} \left(\cosh \pi \sqrt{n} - \frac{\sinh \pi \sqrt{n}}{\pi \sqrt{n}} \right).$$

Jacques Herbrand, un des plus profonds logiciens français, mourut en 1931 lors d'un accident de montagne dans le massif du Pelvoux. Il était âgé de 23 ans, mais sa thèse contenait un résultat fondamental qui fit le tour du monde et qu'on appelle aujourd'hui théorème de Herbrand (ce résultat indique que si un ensemble de formules peut être rendu vrai par un ensemble d'objets, alors il existe une façon systématique de construire un tel ensemble d'objets). Le logicien Paul Bernays considérait ce théorème comme le « théorème central de la logique des prédicats ». Kurt Gödel dès 1943, dans des notes personnelles, remarqua que les preuves de Herbrand étaient fausses. Ce n'est cependant qu'en 1963 que B. Dreben, P. Andrews et S. Aanderaa publièrent un article dans *les Proceedings of the American Mathematical Society* intitulé « False lemmas in Herbrand ». Ils y indiquaient que certains lemmes utilisés par Herbrand étaient irrémédiablement faux, et donc la preuve de son théorème était erronée. Heureusement ils proposaient de remplacer les lemmes fautifs par d'autres (plus compliqués) qui permettaient d'arriver au fameux résultat qui pendant plus de 30 ans avait donc été considéré comme juste sans être vraiment démontré : les mathématiques l'avaient échappé belle ! Notons que l'importance du résultat des travaux consignés dans la thèse de Herbrand est telle que celle-ci a été éditée intégralement en 1968 aux *Presses universitaires de France* avec les erreurs originales juste signalées dans la préface qui fournit même des contre-exemples !



Hans Rademaker, de l'Université de Pennsylvanie, pensa un moment avoir démontré l'hypothèse de Riemann (qui concerne la répartition des nombres premiers et est considérée par de nombreux mathématiciens comme la plus grande énigme mathématique actuelle). Il le fit savoir et eut alors droit à divers articles dans la presse dont un dans le prestigieux *Times*... avant qu'on découvre une erreur irrattrapable dans son raisonnement. Aujourd'hui, on attend toujours une preuve de ce qui reste donc l'hypothèse de Riemann.

Le théorème des quatre couleurs indique qu'avec quatre couleurs on peut toujours colorier les pays d'une carte géographique sans que deux voisins portent des couleurs identiques. Ce résultat conjecturé en 1852 par Francis Guthrie ne fut démontré qu'en juin 1976 par Kenneth Appel et Wolfgang Haken à l'aide d'un calcul par ordinateur. Le fait que la démonstration repose sur des calculs informatiques (vérifiés récemment) est remarquable comme l'est le fait que la démonstration de 1976 s'appuie sur des idées qui furent introduites par des mathématiciens ayant proposé des solutions... erronées. La première d'entre elles fut publiée par A. Kempe en 1878 et fut considérée exacte pendant 11 ans, date à laquelle P. Heawood pointa une erreur irrattrapable. En 1880, P. Tait prouva à son tour la conjecture qui fut donc considérée comme résolue jusqu'en 1891, date à laquelle J. Petersen identifia une erreur là encore impossible à corriger. Il n'en reste pas moins que c'est à partir de ces preuves initiales fausses que les méthodes qui conduisirent à la démonstration de 1976 furent élaborées, ce qui prouve une fois encore que disposer d'une preuve, même fausse, est parfois mieux que de ne pas avoir de preuve du tout.

2. LE LAISSER-ALLER TUE UNE ÉCOLE MATHÉMATIQUE

Jamais en mathématiques on ne peut baisser sa garde, car alors l'erreur fond sur vous et vous fait perdre tout crédit. L'école de géométrie algébrique italienne (dont on avait fini par penser qu'elle fournissait simultanément une démonstration d'un résultat et un contre-exemple) est un cas étonnant d'abandon fatal de la rigueur. Le mathématicien David Mumford explique cette histoire étrange :

«Il existe des exemples d'erreurs mathématiques graves du type suivant : une école de mathématiques se détourne du droit chemin, et après avoir donné des preuves rigoureuses se laisse lentement gagner par de mauvaises habitudes, jusqu'à ce que des faussetés évidentes soient publiées. Bien sûr, le reste du monde, après s'être laissé abuser, devient progressivement méfiant, puis finalement met le doigt sur des erreurs dans les textes imprimés par les membres de l'école. Le cas le plus connu de cette situation est celui de l'école italienne de géométrie algébrique, qui produisit d'excellents et profonds résultats pendant 50 ans, mais s'effondra ensuite. Trois noms clefs doivent être cités : Castelnuovo, Enriques et Severi. Castelnuovo le plus ancien était un splendide mathématicien parfaitement rigoureux. Enriques qui vient après lui, autant que je le sache, ne publia jamais rien de faux, quoiqu'il reconnaissait que certaines de ses démonstrations ne traitaient pas vraiment tous les cas possibles. Il avait ses propres critères, mais acceptait volontiers de réexaminer une "démonstration" et de la rendre plus complète. Malheureusement Severi, le troisième, qui était fasciste et possédait un tempérament autoritaire, tua finalement l'école entière, car bien qu'ayant débuté par une série de découvertes brillantes et correctes, il publia dans les années 1930 et 1940 des livres remplis d'erreurs. Le reste du monde devint hésitant sur ce qui avait été vraiment prouvé par toute cette école. Il fallut les efforts de deux grands hommes, Zariski et Weil, pour remettre les choses en ordre.»

1880, le mathématicien Landry montrera que $F_6 = 274177 \times 67280421310721$. On sait aujourd'hui que, de F_5 à F_{30} , tous les F_n sont composés et on conjecture que tous les nombres de la forme $2^{2^n} + 1$ sont composés, sauf les quatre premiers !

Ces erreurs ne sont pas très instructives : une fois repérées, rien n'en découle. Ce n'est pas le cas de celle commise à propos du «petit théorème de Fermat». Ce résultat, énoncé par Fermat en 1640 et démontré par Euler en 1736, indique que si p est un nombre premier, alors pour tout nombre entier a supérieur à 1, le nombre $a^p - a$ est un multiple de p . Ainsi, en particulier, si p est premier, $2^p - 2$ est un multiple de p . Cette affirmation ne doit pas être confondue avec l'affirmation inverse qui est fautive : si $2^p - 2$ est un multiple de p , alors p est premier. Fermat ne commit pas la confusion, pourtant tentante. En effet, les nombres qui font exception, c'est-à-dire qui vérifient que $2^p - 2$ est un multiple de p alors qu'ils sont composés (on les appelle 2-pseudo-premiers) sont très rares. Le plus petit est $341 = 11 \times 13$. En choisissant au hasard un nombre n inférieur à 25 milliards, on constate : (a) que $2^n - 2$ n'est pas multiple de n dans 95,64 pour cent des cas (on sait alors avec certitude qu'il est composé) ; (b) que $2^n - 2$ est multiple de n dans 4,36 pour cent des cas et alors n est un nombre premier dans 99,998 pour cent des cas. Pour un nombre inférieur à 25 milliards, le risque d'établir un diagnostic faux à partir de la croyance (erronée) que « n est premier si et seulement si $2^n - 2$ est multiple de

n » est inférieur à 0,00009 pour cent. La croyance erronée tendait les bras et, en 1886, le mathématicien chinois Li Shan-Lan (1811-1882) a publié ce faux critère. Le plus remarquable est qu'aujourd'hui cette croyance fautive (un peu améliorée pour l'être moins souvent encore) sert de base aux algorithmes probabilistes de test de primalité qui sont utilisés systématiquement en cryptographie. Personne ne commet vraiment d'erreur, cependant c'est bien de la fautive caractérisation qu'est née l'idée des algorithmes probabilistes, si importante aujourd'hui. De l'erreur (contrôlée et consciente), on a tiré une méthode importante et utile.

LES FAUSSES DÉCIMALES DU NOMBRE π

Avant l'ère des ordinateurs, quelques problèmes de calculs ont excité les passions et ont été l'occasion d'erreurs à répétition. Ainsi le calcul à la main des décimales de π a donné lieu à une multitude d'erreurs, dont la plus célèbre laisse des marques aujourd'hui encore.

William Shanks (1812-1882) publie 707 décimales de π en 1874. Au total, il a passé 20 ans de sa vie à mener ce calcul et heureusement... n'a jamais su qu'il était faux à partir de la 527^e décimale. Pendant plus de 50 ans d'ailleurs tout le monde fit confiance au calcul de Shanks. C'est seulement en 1945 que D. Ferguson, travaillant comme Shanks uniquement avec du papier et des crayons, recalcule 539 décimales de π et constate un désaccord avec le calcul de son pré-

décesseur. Le désaccord sera confirmé plus tard, par d'autres calculs utilisant cette fois des machines. Les chiffres faux de Shanks furent utilisés en 1937 pour l'aménagement du Palais de la découverte à Paris. La salle π du Palais vit son plafond décoré par les décimales de Shanks. Les fausses décimales de π restèrent jusqu'en 1949 date à laquelle les bons chiffres furent mis en place. On pourrait croire que depuis les fausses décimales de Shanks ont été oubliées. Ce n'est pas le cas : l'éditeur français Hermann en 2001 vend toujours le merveilleux livre de François Le Lionnais *Les grands courants de la pensée mathématique*, livre qui, page 99, reproduit sans indiquer qu'elles sont fausses, les 707 décimales de Shanks. Ne les apprenez pas par cœur !

L'erreur de Shanks est sans importance matérielle puisque l'on sait bien qu'en physique 40 décimales de π seront toujours suffisantes. Il n'empêche que suite aux erreurs répétées dans la course aux décimales de π (aujourd'hui on en connaît 206 milliards), les règles du jeu sont maintenant qu'un calcul doit être réalisé deux fois par deux méthodes différentes pour être pris en considération. Ici l'erreur a incité à la prudence.

LES MATHÉMATIQUES ERRONÉES DU JEU

Les erreurs mathématiques ne sont pas toujours aussi indolores. On raconte que le Chevalier de Méré (1607-1684), qui était philosophe et curieux des sciences, possédait un goût prononcé pour les jeux de hasard. Il recherchait des règles astucieuses et en tirait des paris qu'il proposait à tous. L'une des règles qu'il inventa consiste à faire rouler quatre dés et à parier à un contre un sur l'apparition d'au moins un 6. La probabilité de perdre est $(5/6)^4 = 625/1296$, soit 48,225 pour cent, ce qui donne donc un léger avantage à celui qui propose le jeu et l'assurance à la longue de gagner... beaucoup d'argent. Méré inventa une autre règle : lancer deux dés 24 fois de suite et parier que le double 6 apparaîtra au moins une fois. Cette fois, le calcul, que nous savons faire aujourd'hui, donne que la probabilité de perdre pour celui qui offre le pari, est $(35/36)^{24} = 50,859$ pour cent (pour que l'avantage soit à celui qui propose le pari, il faudrait changer le 24 en 25). Le Chevalier était donc condamné à la longue à perdre de l'argent avec ce second jeu.

La légende veut que le Chevalier de Méré après avoir gagné une fortune grâce au premier jeu, la perdit en pratiquant le second. Cette erreur d'appréciation et quelques autres du même type eurent des conséquences plus importantes que celles, pécuniaires, que subit le Cheva-

lier de Méré, car elles amenèrent la théorie des probabilités qui naquit, à cette époque, des échanges épistolaires entre Pascal, Fermat et Roberval.

Contrairement aux autres domaines des mathématiques où le plus souvent se tromper ne coûte rien, les erreurs dans le domaine de la combinatoire probabiliste ont des conséquences graves pour celui qui les commet : comme Méré l'a compris à ses dépens, les mathématiques sont parfois une science très concrète ! Aujourd'hui, pour élaborer les tableaux des primes de leurs contrats, les compagnies d'assurances sont encore grandes utilisatrices de la théorie des probabilités (et même de ses aspects les plus subtils) et elles aussi doivent éviter à tout prix les erreurs pour rester à flot.

POINCARÉ S'ACQUITTE DE SON ERREUR

L'erreur mathématique peut ruiner son auteur pour d'autres raisons. On m'a raconté qu'une université américaine avait engagé des poursuites contre l'un de ses enseignants mathématiciens qui avait commis une erreur dans une démonstration faite devant les étudiants. Je ne sais pas si l'histoire est vraie et ce qu'il en a réellement coûté au professeur fautif, mais ce n'est pas la première fois qu'un mathématicien doit payer de sa poche une erreur pour un théorème que pourtant il n'a pas même essayé d'appliquer.

En janvier 1889, les quotidiens parisiens annoncent avec fierté que le jeune mathématicien français Henri Poincaré vient de remporter le prix international de mathématiques que le roi de Suède Oscar II avait organisé pour son soixantième anniversaire. Le prix consiste en une médaille d'or d'une valeur de 1 000 francs accompagnée d'une somme de 2 500 couronnes. Charles Hermite, dans une lettre à Mittag-Leffler qui était chargé de l'organisation du prix, indique que « dans ce travail comme dans presque toutes ses recherches, M. Poincaré montre la voie et donne des indications, mais laisse considérablement à faire pour combler les lacunes ». Pire, quelques mois plus tard, le mathématicien Edward Phragmén, qui devait préparer le manuscrit de Poincaré, découvre des passages gênants dont Poincaré réalise qu'ils remettent en question l'ensemble même du mémoire pour lequel il a remporté le prix du roi Oscar.

Poincaré avait gagné un prix pour un mémoire fautif ! Mittag-Leffler reprit possession des exemplaires imprimés du mémoire et demanda à Poincaré d'en rembourser les frais d'impression. La somme que Poincaré payait ainsi dépassait de 1 000 couronnes le prix qu'il avait reçu... Poincaré retravailla soigneusement son

mémoire, le modifiant, le réorganisant et le complétant. La version finalement publiée en novembre 1890 avait pris sensiblement du volume mais, et c'est là tout le charme de l'histoire, constitue un des textes les plus importants des mathématiques modernes : Poincaré, à propos du *Problème des trois corps*, introduit des idées et des méthodes qui fondent la théorie des systèmes dynamiques chaotiques et mettent en évidence que le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité.

Après quelques péripéties, sans doute douloureuses, et, même si cela l'avait plutôt appauvri, Poincaré avait, en fin de

compte, largement mérité son prix : l'erreur de Poincaré fut donc fructueuse. Cette édifiante histoire n'est pas le seul cas d'erreur mathématique cruciale : un peu plus tôt, au XIX^e siècle, une autre faute commise par un grand mathématicien avait déjà été à l'origine de progrès et d'éclaircissements en analyse.

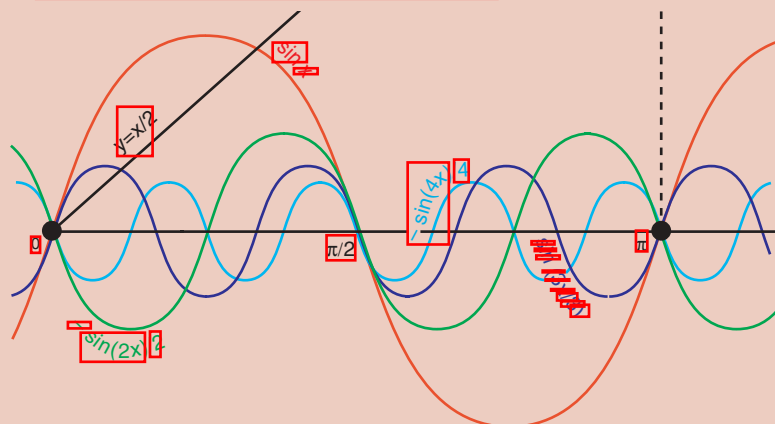
MÊME LE PLUS RIGOUREUX...

Cette erreur fut commise par un des plus grands mathématiciens du XIX^e siècle, Augustin Cauchy (1789-1857), et dans l'un

3. LA CONVERGENCE UNIFORME

Dans son *Cours d'analyse algébrique* de 1821, Louis Augustin Cauchy (1789-1857) affirme et « démontre » que la somme d'une série de fonctions continues est continue. Dans une lettre de 1826, Abel propose à Cauchy le contre-exemple :

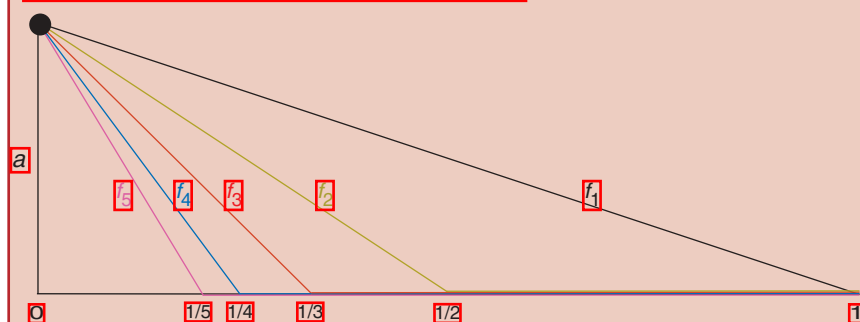
$$\sin(x) - \sin(2x)/2 + \sin(3x)/3 - \sin(4x)/4 + \dots$$



La somme de cette série est la fonction qui vaut $x/2$ pour $0 < x < \pi$ et 0 en π (cette somme n'est pas continue en π). Bien qu'averti par la lettre d'Abel et bien qu'Abel ait publié son contre-exemple, Cauchy en 1833 répète dans un article son théorème inexact. Chose étrange aussi, dans l'article même où il donne son contre-exemple, Abel énonce à son tour un théorème faux sur la convergence des séries. Nous sommes dans une période de mise au point des concepts...

Le contre-exemple le plus simple montrant qu'une suite de fonctions continues n'a pas nécessairement une limite continue est le suivant :

$f_n(x) = a - nx$ si $0 \leq x \leq a/n$ et $f_n(x) = 0$ si $a/n < x \leq 1$, dont la limite est la fonction f définie par $f(0) = a$ et $f(x) = 0$ pour $0 < x \leq 1$

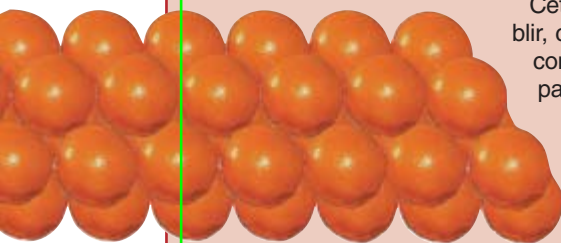


Pour qu'une limite de fonctions continues sur E soit continue, il faut non seulement demander que, en chaque point x de E , $\lim_{n \rightarrow \infty} |f_n(x) - f(x)| = 0$ (convergence ponctuelle), mais, ce qui est plus fort, que $\lim_{n \rightarrow \infty} \max_{x \text{ dans } E} (|f_n(x) - f(x)|) = 0$ (convergence uniforme). L'erreur de Cauchy permet de distinguer entre deux types de convergence pour les fonctions. Elle conduit à un progrès mathématique.

4. LA CONJECTURE DE KEPLER EST-ELLE RÉSOLUE?

La conjecture de Kepler énonce que lorsque vous voulez ranger des sphères, la plus grande densité de rangement est obtenue :

- en composant un réseau triangulaire de sphères sur un même plan ;
- en plaçant sur ce plan un second réseau triangulaire occupant soigneusement un trou sur deux des trous créés par le premier plan ;
- et en recommençant, etc.



Cet énoncé simple est en fait très difficile à établir, car un grand nombre de configurations plus complexes doivent être envisagées et qu'il n'est pas du tout évident que certaines d'entre elles ne sont pas meilleures : toute la difficulté est de proposer un raisonnement qui élimine proprement toutes les autres dispositions.

On considère que la conjecture a été démontrée en 1998 par Thomas Hales de l'Université du Michigan à Ann Harbor. Pourtant plusieurs faits troublants liés aux erreurs en mathématiques accompagnent l'histoire de cette démonstration qui pendant un moment encore restera sans doute suspecte. Voici pourquoi.

Un autre mathématicien Wu-Yi Hsiang a prétendu avoir prouvé la conjecture avant T. Hales en 1990. Ce mathématicien n'est pas un amateur puisque W.-Y. Hsiang est titulaire d'un doctorat de l'Université de Princeton et a été professeur à l'Université de Berkeley en Californie, l'une des plus prestigieuses universités des États-Unis. Nous ne sommes pas dans le cas des passionnés aux compétences incertaines qui clament par exemple avoir démontré le théorème de Fermat avant Andrew Wiles et qui refusant de voir que leur preuve est fautive ou incomplète se persuadent qu'ils sont victimes d'une cabale destinée à les déposséder d'un prix et de la gloire que leur génie mérite.

En 1992, l'*Encyclopaedia Britannica* écrivait dans sa mise à jour annuelle que «Sans aucun doute, l'événement mathématique de l'année est la résolution de la conjecture de Kepler par W.-Y. Hsiang.» En 1993, à une réunion de l'*American Mathematical Society*, W.-Y. Hsiang était invité à donner une conférence plénière sur sa démonstration. En 1993, il publiait sa preuve : *On Sphere Packing Problems and the Proof of Kepler Conjecture* dans l'*International Journal of Mathematics*.

On aurait pu croire que l'affaire était réglée. Pourtant des voix s'élevèrent alors pour contester la preuve de W.-Y. Hsiang. Dans la seconde édition de leur livre *Sphere Packing, Lattices and Groups* paru en 1993, J. Conway et N. Sloane qui sont d'éminents mathématiciens spécialistes de ces questions de géométrie indiquent que «des insuffisances persistent dans la preuve de W.-Y. Hsiang, et donc, la question de la conjecture de Kepler ne peut pas être considérée comme réglée». En 1994, un article de T. Hales fut publié par la revue la plus lue par la communauté mathématique *The Mathematical Intelligencer*. Cet article intitulé «Le statut de la conjecture de Kepler» était entièrement consacré à dénoncer les insuffisances de la preuve de W.-Y. Hsiang. L'année suivante, W.-Y. Hsiang publia un article réponse, mais semble-t-il, la communauté des spécialistes était tombée d'accord pour juger sa démonstration définitivement insatisfaisante. Après avoir été acceptée et même acclamée, la démonstration de W.-Y. Hsiang était condamnée, «faute de preuve». Les reproches qu'on lui fait sont graves : dans sa preuve, il admet implicitement certains résultats aussi difficiles à prouver que la conjecture elle-même.

La démonstration proposée finalement par T. Hales en 1998, – qui avait dénoncé les insuffisances de la preuve de W.-Y. Hsiang – est fondée sur des idées assez différentes et a nécessité pour certaines de ses parties l'utilisation d'ordinateurs. Aujourd'hui, malgré l'avis de J. Conway qui a indiqué que «la preuve de T. Hales semblait bonne», certains hésitent à considérer que l'affaire de la conjecture de Kepler est définitivement réglée. Les spécialistes, T. Aste et D. Weaire, affirment prudemment que «d'après la situation en 2000, il apparaît que le crédit de la démonstration de cette conjecture vieille de plusieurs siècles pourrait bien aller à Hales».

Indiquons que la preuve de T. Hales comporte 250 pages et que les logiciels qui l'ont aidé occupent un espace de 3 gigaoctets (soit environ l'équivalent de 3 000 ouvrages de 200 pages). On peut craindre, et même juger certain, que quelque part dans ces logiciels, une erreur au moins se trouve terrée ! Celle-ci ne se reportera pas forcément sur la preuve de T. Hales, mais le risque ne peut être négligé et donc, en attendant des confirmations ou des simplifications qui éviteraient l'utilisation de l'ordinateur, la prudence s'impose.

des plus importants livres qui soit, son cours d'analyse paru en 1826. L'erreur fit naître la notion de convergence uniforme qui joue aujourd'hui un rôle capital dans toute l'analyse. Ce livre prétend, à juste titre, introduire plus de rigueur dans ce domaine en développement accéléré depuis un siècle : «Quant aux méthodes, j'ai cherché à leur donner toute la rigueur qu'on exige en géométrie» écrit Cauchy fier d'avoir su mettre un peu d'ordre dans un domaine bouillonnant, mais parfois incertain ; il critique les méthodes de son prédécesseur Lagrange, et admet à regret que les séries divergentes n'ont pas de somme (plus tard, on saura donner un sens à certaines sommes de séries divergentes ; voir l'article de janvier de cette rubrique). Cauchy énonce des règles de convergence des séries et, en particulier, «le critère de Cauchy». Pourtant dans ce monument de l'histoire des mathématiques, Cauchy y démontre, que si une série de fonctions continues est convergente dans le voisinage d'un point, alors sa somme est une fonction continue dans le même voisinage !

Aujourd'hui cette affirmation vaudrait un zéro pointé à un étudiant de mathématiques, car il est faux en général qu'une limite de fonctions continues le soit. Pour que le résultat devienne vrai, il faut introduire la notion de convergence uniforme : ce n'est pas séparément en chaque point du voisinage autour d'un point x que la convergence doit avoir lieu, mais globalement. Le concept d'uniformité avait échappé à Cauchy.

Dès 1826, le mathématicien norvégien Niels Abel (1808-1829) attira l'attention des autres mathématiciens en proposant un contre-exemple au résultat de Cauchy. Remarquons que la découverte de l'erreur de Cauchy ne vint pas de l'étude de la démonstration, mais de la mise à jour d'un contre-exemple. Cela s'explique par l'état immature de la logique de cette époque : la maturité de la logique ne viendra qu'avec le calcul des quantificateurs et l'extension de la logique aristotélicienne, à la fin du XIX^e siècle. Précisément l'erreur était due à une confusion dans l'ordre des quantificateurs : dire «pour tout a , il existe b tel que $b > a$ » n'équivaut pas à dire «il existe un b tel que pour tout a , $b > a$ ». Outre les conséquences sur l'analyse, l'erreur de Cauchy obligea à un approfondissement des concepts logiques.

Cet exemple prouve que, même le mathématicien le plus soucieux de rigueur et le plus compétent, peut, lors de la naissance d'un domaine mathématique nouveau, se prendre les pieds dans le tapis. Ni l'intuition exceptionnelle d'un génie comme Poincaré ni le souci minutieux de rigueur d'un Cauchy, ne suffisent pour éviter la faute mathématique.

UNE ÉPISTÉMOLOGIE DE L'ERREUR

Bien d'autres exemples d'erreurs commises par de grands mathématiciens peuvent être cités, si bien d'ailleurs que certains philosophes des mathématiques ont proposé l'idée que le développement mathématique se fait grâce aux erreurs commises puis corrigées. C'est en effet la thèse soutenue par le philosophe Imre Lakatos, disciple de Karl Popper, dont la position appelée parfois *faillibilisme* peut être résumée ainsi :

- l'erreur est une caractéristique essentielle de la connaissance mathématique qui, contrairement à ce que soutiennent les *infaillibilistes*, ne progresse pas par une simple accumulation continue de vérités ;
- les théories mathématiques sont empiriques, c'est-à-dire confrontées aux expériences que constituent contre-exemples et calculs ; comme les physiciens, les mathématiciens passent d'une théorie à une autre sans que jamais aucune ne puisse être considérée comme ultime.

Les principaux exemples sur lesquels Lakatos appuie sa thèse sont celui de la convergence uniforme et celui de la formule d'Euler qui lie les nombres associés à un polyèdre. Cette formule donna lieu à toute une série d'énoncés faux pendant plus d'un siècle (car utilisant des définitions inappropriées de la notion de polyèdre).

Cependant pour la grande majorité des mathématiciens, l'épistémologie faillibiliste n'est adaptée qu'à la description des périodes courtes de l'histoire des mathématiques où une théorie élabore ses concepts et ses méthodes de preuve. Cela s'est produit pour l'analyse et la topologie au XIX^e siècle (d'où l'exemple de Cauchy et celui de la formule d'Euler), mais ne se produit plus aujourd'hui depuis la mise au point de la logique du calcul des prédicats et la formulation de cadres formels généraux qui sont aptes à la représentation de toutes les mathématiques.

Depuis l'invention du formalisme ensembliste au début du XX^e siècle, les erreurs qu'on rencontre en mathématiques ne sont non plus dues à des théories fausses ou à des concepts en cours d'élaboration, mais de « vraies belles erreurs » dues à l'étourderie, la paresse de donner tous les détails, la complication d'une situation, l'insuffisance des contrôles.

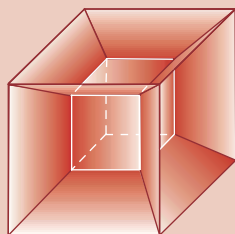
Non, les mathématiques ne sont pas comme la physique, soutiennent la majorité des mathématiciens et ce qui a été démontré avec soin il y a 100 ans ou 2 000 ans reste vrai et le restera. Le mathématicien John Conway précise : « Il est trompeur de considérer l'exemple de la formule d'Euler comme caractéristique du développement des mathématiques. La plu-

5. LA FORMULE D'EULER ET LA THÈSE FAILLIBILISTE

Imre Lakatos (1922-1974) s'est servi de l'exemple de la formule d'Euler pour expliquer sa conception faillibiliste des mathématiques : les mathématiques progressent par corrections d'erreurs. La formule d'Euler (énoncée en 1750) indique que pour tout polyèdre donné, si on désigne par S le nombre de sommets, A le nombre d'arêtes et F le nombre de faces alors :

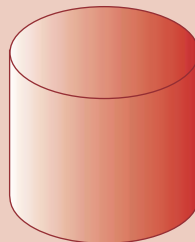
$$F - A + S = 2 \quad (\text{pour le cube on a } S = 8, A = 12, F = 6).$$

L'énoncé semble juste, pourtant des contre-exemples existent :

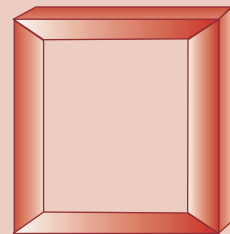


$$12 - 24 + 16 = 4$$

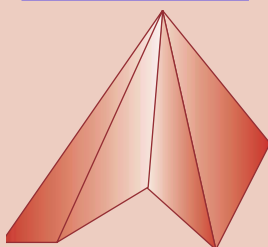
Faces - Arêtes + Sommets



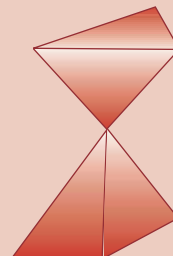
$$3 - 2 + 0 = 1$$



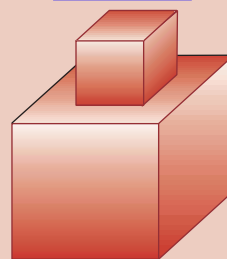
$$12 - 24 + 12 = 0$$



$$3 - 11 + 6 = 3$$



$$3 - 12 + 7 = 3$$



$$11 - 24 + 16 = 3$$

Comme Euler n'avait pas donné de définition précise de ce qu'il appelait polyèdre, les contre-exemples amènent à en rechercher une qui exclurait le contre-exemple. C'est seulement en 1895 que Poincaré proposera une définition convenable après que de nombreuses tentatives imparfaites amènent une succession d'énoncés faux, rectifiés par d'autres énoncés faux. Ces contre-exemples provoquant un processus d'ajustements successifs sont vus par Lakatos comme une caractéristique du développement mathématique. Ce point de vue n'est guère partagé aujourd'hui où on considère que seules les périodes de mise au point de nouveaux domaines (ici la topologie) sont sujettes à ce type d'hésitation.

part des résultats mathématiques une fois prouvés le restent définitivement. Si la preuve originale ne satisfait plus tout à fait les critères de rigueur adoptés ensuite, les adapter est en général facile. Bien souvent, il y a eu des omissions importantes ou des erreurs dans les premières tentatives de preuve de résultats importants, mais elles sont vite corrigées, et au total il existe très peu de cas analogues à la formule d'Euler.»

ENSEMBLE TOUT S'ARRANGE !

Finalement, si l'on est étonné du nombre important d'erreurs commises par chaque mathématicien et par la gravité de certaines d'entre elles, jusqu'à présent, jamais un théorème faux et important n'est passé inaperçu longtemps ou n'a été utilisé comme base pour formuler et développer une théorie fautive qui aurait berné toute la communauté. Collectivement les mathématiciens ne semblent pas être faillibles.

L'image d'une science qui, en dehors de quelques périodes courtes, progresse continûment et sans remise en cause profonde est pour l'essentiel confirmée par l'examen des faits historiques. L'erreur est fréquente et gênante, mais aussi fructueuse et stimulante et en définitive toujours rapidement effacée.

U. BOTTAZZINI, Poincaré, philosophe et mathématicien, Collection Les génies de la science, Pour la Science, 2000.

T. C. HALES, The Kepler Conjecture. <http://www.math.lsa.umich.edu/~hales/countdown/>

J. HERBRAND, Écrits logiques, Presses Universitaires de France, Paris, 1968.

W.-Y. HSIANG, A Rejoinder to Hales's Article, in Math. Intel. 17, 35-42, 1995.

C. PÖPPE, La conjecture de Kepler, in Pour la Science, n° 259, mai 1999.

I. LAKATOS, Preuves et réfutations, Essai sur la logique de la découverte mathématique, Hermann, Paris, 1984.



Le fond et l'informe

IAN STEWART

Les mathématiques modifient notre perception du monde animal, des micro-organismes aux tigres en passant par les poissons.

Lors d'un colloque sur les mathématiques de la genèse des formes, et notamment lors d'une des conférences, un de mes animaux favoris me revint à la mémoire. Mon préféré est le tigre pour sa magnifique fourrure rayée, mais l'autre, s'il n'a pas l'élégance d'un félin, a pourtant une apparence remarquable : il s'agit d'une moisissure visqueuse de l'embranchement des acrasiomycètes, nommée *Dictyostelium discoideum*.

Ces organismes fascinent les biologistes, car ils sont à la frontière entre les animaux unicellulaires et pluricellulaires. Ils illustrent également une vérité que les nouveaux explorateurs du génome se doivent de garder en mémoire : ce ne

sont pas seulement les gènes qui importent, mais ce que l'on en fait.

Malgré son humble position dans l'arbre des espèces, *Dictyostelium discoideum* rivalise avec les animaux dits supérieurs par les belles structures spiralées qu'il crée (voir la figure 2). Dans quelle mesure ces formes sont-elles inscrites dans les gènes ? Y a-t-il un gène des spirales ? À l'inverse, doit-on voir dans ces formes le résultat de lois physiques et d'équations mathématiques ?

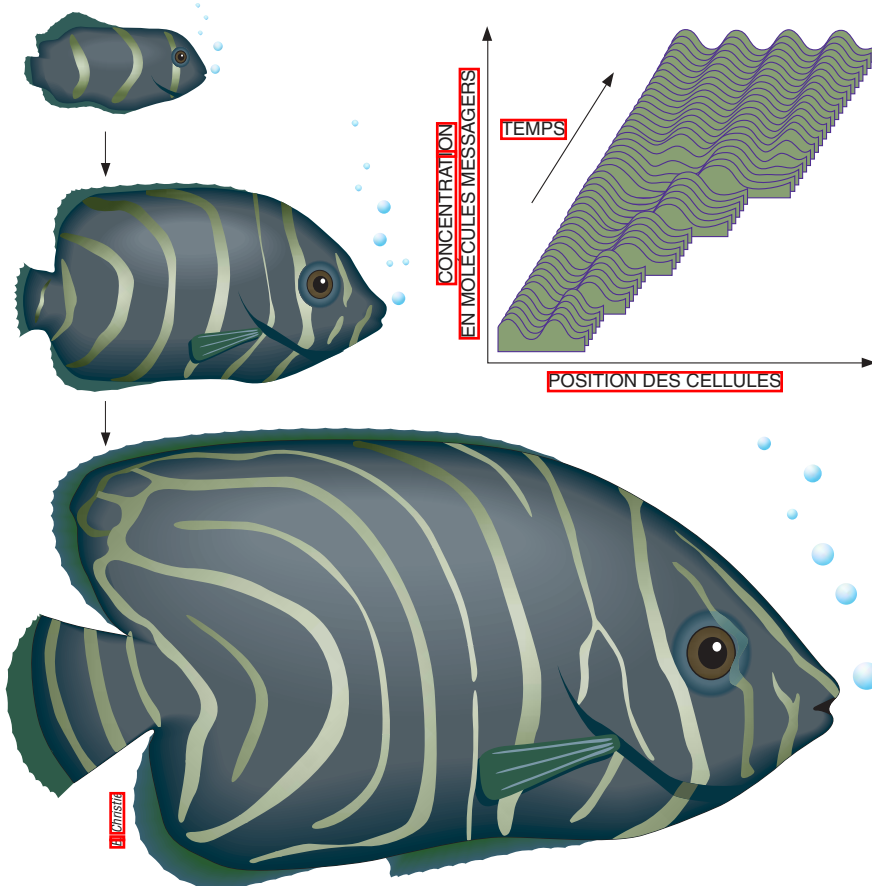
Afin de répondre à ces questions, examinons le cycle de vie de *Dictyostelium discoideum*. Ces organismes sont issus de spores transportées par le vent en un lieu propice, humide et riche en nour-

riture (principalement des bactéries et des levures qu'ils phagocytent). Les spores germent et donnent naissance à des cellules, semblables à des amibes, qui partent en quête de nourriture. Lorsque ces cellules sont suffisamment grosses, elles se reproduisent en se divisant en deux cellules identiques. Quand la nourriture abonde, elles aussi. Elles conservent un mode de vie autonome : elles ne se préoccupent pas de leurs voisines !

De même que certains artistes ne sont talentueux qu'en période de bohème, l'expression artistique de ces organismes apparaît lorsque la nourriture se raréfie. Dans ces conditions, les cellules sécrètent de l'adénosine monophosphate cyclique (une molécule messager). Attirées vers la source de cette molécule, les autres cellules sécrètent à leur tour de l'adénosine monophosphate cyclique : chaque cellule «clame» sa présence à ses voisines en émettant cette molécule. De ce mouvement de foule naît parfois une élégante spirale. La population devient de plus en plus dense, tandis que la spirale se resserre jusqu'à se transformer en une structure arborescente qui rappelle les racines ou les branches d'un arbre. Ces ramifications s'épaississent et les cellules s'agglutinent. L'ensemble s'entoure alors d'une gaine visqueuse et prend finalement la forme d'une «limace» (à ne pas confondre avec le gastéropode du même nom).

La «limace» est une colonie de cellules autonomes, cependant elle se déplace à la manière d'un organisme pluricellulaire unique. Parvenue dans une zone sèche, la colonie s'ancre solidement au sol, puis certaines des cellules «se sacrifient» et forment une longue tige à l'extrémité de laquelle les autres cellules s'agencent en une masse arrondie, nommée sporocarpe. Les cellules s'y transforment en spores qui, libérées à maturité et transportées par le vent, commencent un nouveau cycle.

Thomas Höfer, biophysicien à l'Université de Berlin, a découvert un système d'équations mathématiques dont les solutions reproduisent les formes spiralées et arborescentes de *Dictyostelium discoideum*. Par ailleurs, Cornelis Weijer, de



1. Le scalaire se pare de nouvelles rayures à mesure qu'il grandit. Dans une simulation sur un ordinateur, les pics des ondes représentent les rayures.

L'Université de Dundee, a montré que des équations très similaires modélisent les déplacements de la «limace». Les principaux paramètres qui déterminent la structure sont la densité de la population, la quantité d'adénosine monophosphate cyclique sécrétée et la sensibilité des organismes à cette molécule.

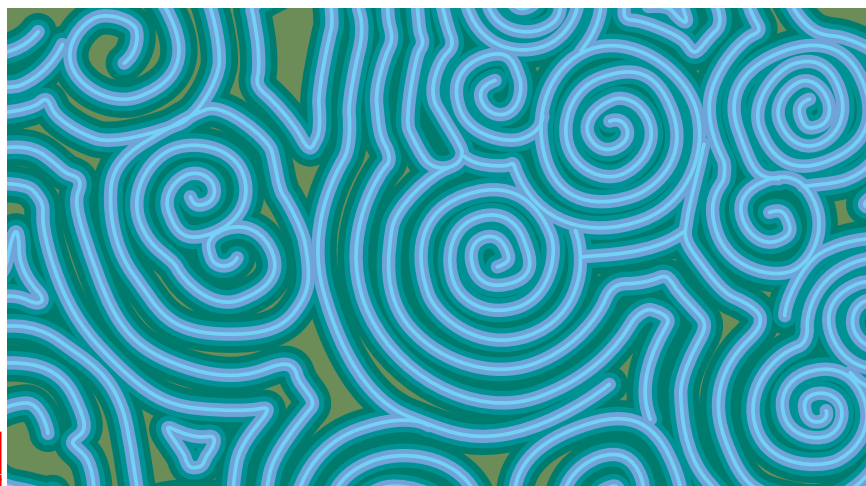
Ainsi, les gènes de *Dictyostelium discoideum*, à l'origine notamment de la synthèse de l'adénosine monophosphate cyclique et des récepteurs de cette molécule, sont responsables du comportement de chaque organisme, mais ne contiennent aucune instruction sur la forme spiralee de la colonie. Cette forme résulte des lois mathématiques auxquelles obéissent ces organismes. En d'autres termes, cette idée, chère à d'Arcy Thompson qui voyait dans la forme de nombreux organismes le résultat de lois physiques, signifie que les mathématiques définissent le cycle vital de *Dictyostelium discoideum* autant que la génétique.

Les équations qui mènent à cette conclusion importante, mais controversée, sont proches de celles établies il y a environ 50 ans par le mathématicien anglais Alan Turing, plus connu comme l'un des pères de l'informatique. Il s'intéressait aussi à la morphogenèse – la formation et la différenciation des tissus et des organes biologiques. En 1952, il a postulé que les structures ordonnées d'êtres vivants n'exigeaient pas de précurseur ordonné. Selon lui, ces structures naissent parfois de substances chimiques, dites morphogènes, qui régissent l'ensemble en diffusant dans les tissus.

Lorsque Turing publie pour la première fois ses idées, elles ne sont que théoriques. Cependant, elles sont bientôt étayées par un saisissant exemple : la réaction chimique de Belousov-Zhabotinsky, du nom de deux chimistes russes, où le simple mélange de quelques substances chimiques usuelles, tels le bromure de sodium, l'acide sulfurique et l'acide malonique, dans une boîte de pétri, fait apparaître des anneaux concentriques et des spirales semblables à celles de *Dictyostelium discoideum*. De telles réactions engendrent des rayures, des taches, des mouchetures et d'autres motifs fréquents dans le monde animal.

Les idées de Turing ont néanmoins été rejetées par les biologistes qui opposaient la dynamique des structures de la réaction de Belousov-Zhabotinsky et de toutes les autres structures de Turing découvertes par les chimistes à la fixité des motifs observés dans le monde animal : il n'y a pas de zèbres à rayures mobiles, ni de léopards à taches mouvantes !

Pourtant Turing a montré que ses équations ont également des solutions stationnaires, mais les chimistes n'en ont



2. Les cellules de la moisissure visqueuse *Dictyostelium discoideum* forment des spirales, comme sur cette vue d'artiste.

jamais obtenues, jusqu'à ce que l'on découvre pourquoi : quand les réactions sont effectuées dans un gel plutôt que dans un liquide, les motifs sont fixes. Or les organismes vivants sont plus proches de gels que de liquides. Toutefois, le temps que ce résultat soit acquis, les biologistes avaient cessé de s'intéresser à la question... mais pas les mathématiciens !

Bien que les équations de Turing soient trop simples pour décrire un phénomène biologique réel, elles engendrent les mêmes types de structures que celles observées chez les animaux. Des pigments déposés selon les pics (ou les creux) d'ondes parallèles forment des bandes (voir la figure 1). Des ondes plus complexes modélisent un réseau tacheté. Les mathématiciens ont ensuite étoffé le schéma de Turing et mis au point des modèles plus proches du monde vivant.

En 1995, Shigeru Kondo et Rihito Asai, de l'Université de Tokyo, ont découvert des

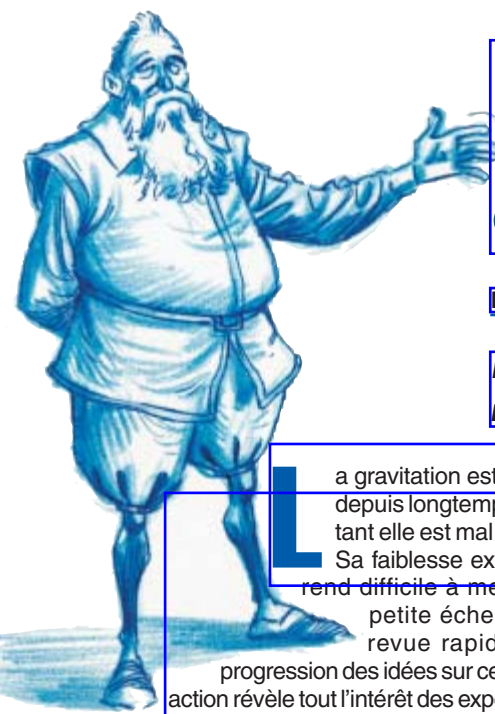
structures de Turing chez des poissons du genre scalaire (des poissons d'Amazonie, aplatis et rayés de jaune et noir). Ils ont observé la croissance de ces poissons et remarqué le réarrangement graduel de leurs rayures. Chez les mammifères, les motifs cutanés ne font que grandir avec l'animal. En revanche, chez les scalaires, à mesure que l'animal croît, de nouvelles rayures apparaissent par division des anciennes. Ces modifications sont décrites par des équations très proches de celles de Turing. Simulées sur un ordinateur, les interactions moléculaires d'un réseau unidimensionnel de cellules adoptent une structure ondulée bien adaptée au réarrangement des rayures des scalaires observés (voir la figure 1).

La lenteur du déplacement des rayures explique sans doute pourquoi on ne le remarque pas, néanmoins, pour paraphraser Galilée : «et pourtant, elles bougent !»

Réactions

Dans l'article *Simple pavés* (voir *Pour la Science*, juin 2000), j'indiquais que personne n'avait encore proposé de classification de l'ensemble E des pavages qui, convenablement assemblés, forment des répliques d'eux-mêmes. Selon Aaron Meyerowitz, de l'Université de Floride, ce problème est certainement difficile au sens de la complexité algorithmique, c'est-à-dire qu'un ordinateur requiert énormément de temps pour traiter une solution.

Restreignons-nous aux polyominos, des polygones formés de carrés joints par leurs côtés. On sait que le problème du pavage d'un rectangle par un ensemble donné de polyominos est «insoluble» : tout algorithme utilisé pour le résoudre demanderait un temps rédhibitoire pour donner une réponse. Le pavage d'un rectangle avec une forme unique de polyominos est vraisemblablement de même ordre. De plus, nous savons qu'un polyomino qui peut paver un rectangle appartient à E : on peut toujours assembler ces rectangles (tant que le rapport de leur longueur sur leur largeur est un nombre rationnel) pour former un carré, puis réunir des copies de ce carré pour dupliquer le polyomino initial. Aussi, il semble intuitif que la classification des seuls polyominos de l'ensemble E soit une tâche impossible.



La gravité à très courte distance

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-PHILIPPE UZAN

La force de gravitation est bien connue à grande distance, mais reste un mystère en dessous du millimètre.

La gravitation est étudiée depuis longtemps, pourtant elle est mal connue. Sa faiblesse extrême la rend difficile à mesurer à petite échelle. Une revue rapide de la progression des idées sur cette interaction révèle tout l'intérêt des expériences entreprises aujourd'hui pour mieux comprendre cette force.

L'étude moderne de la gravitation commence avec Galilée au XVII^e siècle. Le savant italien (1564-1642) étudie le premier la chute des corps en détail, et montre que le mouvement d'une bille sur un plan incliné s'accélère uniformément. Il remarque aussi que la résistance de l'air ralentit plus les corps légers que les corps lourds. Qu'en est-il dans le vide? Galilée se pose la question, et réalise de cette façon que l'accélération d'un corps en chute libre ne dépend ni de sa masse, ni de sa forme, ni de sa composition chimique. Un kilogramme de fer tombe aussi vite qu'un kilogramme de plume ou d'acide sulfurique... Toutefois, à l'époque de Galilée, la découverte est d'importance. En fait, elle traduit un principe physique essentiel toujours mal compris aujourd'hui : le principe d'équivalence. Il stipule que la masse gravitationnelle, celle qui intervient dans le calcul du poids d'un corps, et la masse inertielle, celle qui quantifie la résistance d'un corps à une accélération, sont une seule et même grandeur.

Isaac Newton (1642-1727) est le premier à publier une véritable théorie de la gravitation en 1687. Il y énonce la «loi d'attraction universelle», selon laquelle l'intensité de la force que deux corps exercent l'un sur l'autre est proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance. Newton fonde ainsi la théorie de la gravitation sur le principe d'équivalence et sur la loi d'attraction universelle. Deux lois qui, aujourd'hui encore, n'ont pas été vérifiées dans toutes les situations.

Au début du XX^e siècle, Albert Einstein généralise la théorie de la gravitation. Il fait du principe d'équivalence le fondement de la nouvelle théorie, la relativité

générale. La gravitation change de statut : elle est réinterprétée comme la conséquence de la géométrie de l'espace-temps, elle-même déterminée par son contenu matériel et énergétique. Ainsi la géométrie de l'espace n'est pas la même dans le voisinage d'une grande masse (étoile) et à distance de cette étoile. En relativité générale, la théorie de Newton correspond à un cas limite, celui où le champ de gravitation a une faible intensité, comme c'est le cas par exemple loin d'une étoile.

La gravitation a d'abord été testée grâce à l'observation des mouvements planétaires. Dans la nature, il n'y a que deux forces qui agissent sur de grandes distances : la gravitation et la force électrostatique. Dans la pratique, cette dernière n'a cependant qu'une portée limitée. Les charges électriques sont disposées de façon à créer des ensembles neutres, c'est-à-dire sans charge électrique. Le champ électrique produit par une charge est masqué dans la plupart des cas par celui d'une charge voisine, de signe opposé. Puisqu'il n'existe pas de masses négatives, il en va tout autrement avec la gravité. Cette force n'est jamais répulsive, et pour cette raison, domine toutes les autres à grande distance, où elle est la seule qui subsiste : c'est pourquoi elle a été établie, puis vérifiée aux grandes échelles.

En fait, Newton avait formulé la loi d'attraction universelle afin d'expliquer les lois du mouvement des corps célestes. Trois lois que l'astronome Johannes Kepler avait établies au début du XVII^e siècle grâce aux observations de l'astronome danois Tycho Brahe. Toutefois, le triomphe de la théorie newtonienne ne fut vraiment assuré que le jour où la loi d'attraction universelle expliqua aussi des phénomènes plus compliqués. Le calcul du passage au périhélie de la comète de Halley par Alexis Clairaut en 1759 en fut un ; il démontra toute la puissance de la théorie newtonienne, laquelle fut ultérieurement confirmée par d'autres

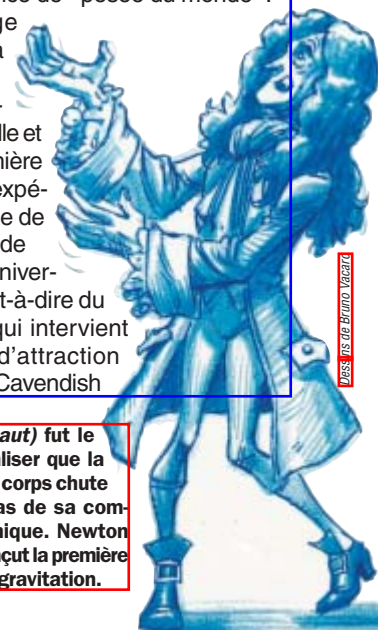
succès. Urbain le Verrier (1811-1877) prédit par exemple l'existence de Neptune, avant que la planète ne fut découverte en 1846. Plus récemment, l'étude par télémétrie laser de l'orbite lunaire (mesure du temps d'aller-retour d'une impulsion laser entre la Terre et la Lune) raffina notre connaissance de la trajectoire du satellite de la Terre, au point que sa position est aujourd'hui connue à un centimètre près!

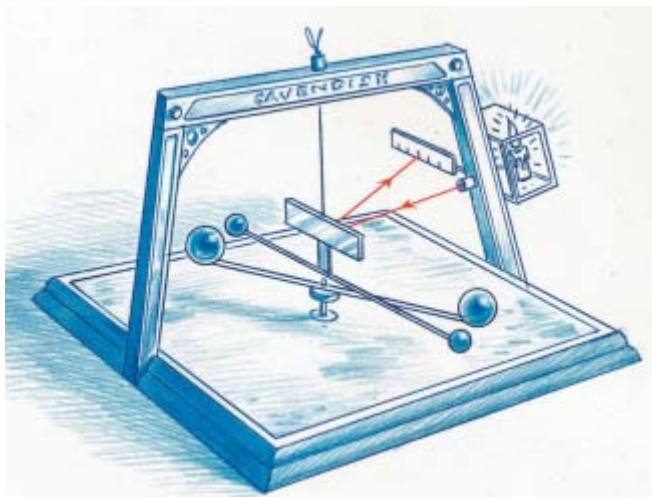
Ainsi, la loi de Newton est vérifiée dans toutes les interactions gravitationnelles à grandes distances. Que se passe-t-il lors des interactions à très courtes distances, inférieures au millimètre. À cette échelle, d'autres forces courantes dans la matière – de nature électrostatique ou quantique – ne sont plus négligeables vis-à-vis des forces de gravitation. Il devient alors difficile de différencier les rôles joués par chacune de ces forces. C'est Henri

Cavendish (1731-1810), qui fit la première tentative pour mesurer la gravitation à petite échelle. Il publia en 1798 les résultats de son expérience de «pesée du monde».

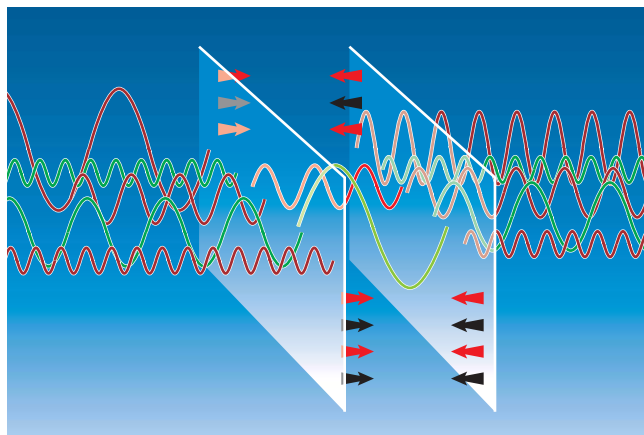
Le montage confirmait la validité de la loi d'attraction universelle et livrait la première estimation expérimentale fine de la constante de gravitation universelle G , c'est-à-dire du coefficient qui intervient dans la loi d'attraction universelle. Cavendish

Galilée (en haut) fut le premier à réaliser que la façon dont un corps chute ne dépend pas de sa composition chimique. Newton (ci-contre) conçut la première théorie de la gravitation.





1. Cette machine, inventée il y a 200 ans par Cavendish, livra la première estimation expérimentale de la constante de gravitation universelle : les sphères, suspendues à un pendule de torsion sont attirées par des boules placées à proximité. L'attraction entre les masses s'oppose à la torsion du fil. Le pendule oscille et la mesure de sa période d'oscillation conduit à la constante de gravitation.



2. Entre deux plaques proches s'exercent les forces de Van der Waals, l'attraction gravitationnelle et la force de Casimir due aux fluctuations quantiques du vide. Entre les deux plaques, seules les longueurs d'onde égales à la distance des plaques ou à des sous-multiples de cette distance sont tolérées. La pression de radiation créée par les ondes extérieures aux plaques tend à les rapprocher.

utilisait un pendule de torsion à l'extrémité duquel sont accrochées deux petites sphères pesantes (voir la figure 1). Lorsque deux boules massives identiques sont placées à proximité de chacune des deux sphères, celles-ci sont attirées et le pendule tourne. Le système est conçu de telle façon que l'attraction gravitationnelle entre les grandes et les petites sphères s'oppose à la torsion du fil. L'attraction des masses fait tourner le pendule d'un très petit angle, et influe sur sa période d'oscillation ; la mesure de la période conduit notamment à G . Pour comprendre quelle virtuosité expérimentale Cavendish déploya, il faut réaliser que, dans ce montage, la force d'attraction entre les corps est 500 millions de fois plus petite que leur poids !

VAN DER WAALS ET CASIMIR

Aller plus loin était difficile. Un problème est la nature cumulative de la gravité à petite échelle. Ainsi, quand un corps interagit par la gravitation avec un autre, chacune de ses particules est concernée ; leur position dans l'espace joue un rôle essentiel dans la force d'attraction résultante. Une difficulté que le cas de deux sphères quasi tangentes illustre bien. Proportionnelle au produit de leurs masses (et donc à R^3 au carré, soit R^6) divisé par le carré de leurs distances (R^2), leur attraction gravitationnelle varie selon la puissance quatrième de leur rayon (R^4). Cette dépendance implique que l'attraction gravitationnelle entre deux sphères est très petite à courte distance. Pour pallier cette difficulté, on choisit des dispositifs, où la plupart des particules des deux corps sont à la même distance, par exemple en utilisant des plaques parallèles. Malheureusement, une autre difficulté gêne l'étude de la gravitation entre

deux plaques : deux forces s'ajoutent à l'attraction gravitationnelle. La première, la force de Van der Waals, est une force intermoléculaire d'origine électrostatique, qui apparaît entre particules proches. La seconde, la force de Casimir, est d'origine quantique.

Le physicien théoricien Hendrick Casimir montra en 1948 que les fluctuations quantiques du vide électromagnétique engendrent une force à courte portée entre deux plaques conductrices (voir la figure 2). Quelle pourrait en être la cause ? Représentons-nous le vide comme une mer agitée de clapot : des vaguelettes apparaissent à la surface, au hasard, semble-t-il, mais toujours de sorte que le niveau moyen de la mer reste le même. Ces fluctuations du vide correspondent à la superposition d'oscillateurs (photons, paires particules-antiparticules...) de toutes longueurs d'onde. Comme le clapot à la surface de la mer, ces fluctuations apparaissent et disparaissent sans cesse, et assurent au vide un niveau d'énergie constant.

Que se passe-t-il lorsque l'on plonge dans ce vide agité deux plaques infinies, parfaitement conductrices et parallèles ? Dans l'intervalle qu'elles délimitent, seuls les oscillateurs dont la longueur d'onde est un sous-multiple de la distance séparant les plaques, peuvent exister. On peut les comparer à des cordes de guitare fixées aux deux extrémités, et qui ne vibrent qu'avec des fréquences bien précises. La « pression de rayonnement » engendrée par les fluctuations électromagnétiques est plus faible à l'intérieur qu'à l'extérieur des plaques. Ainsi, une force d'attraction à courte portée règne entre les plaques : à température ambiante, elle varie comme l'inverse du cube de la distance entre plaques. Le calcul montre que pour des plaques carrées en cuivre d'un millimètre d'épaisseur, à

300 kelvins, et éloignées d'un micromètre, la somme des forces de Van der Waals et de Casimir est égale à la force d'attraction gravitationnelle. Longtemps, l'absence de mesures fiables de la force de Casimir a empêché l'étude de la gravitation à petite échelle. Ce n'est plus le cas depuis qu'en 1997, le physicien américain Steven Lamoreaux mesura la force de Casimir avec précision.

Le principe d'équivalence devait être aussi testé. Les succès des théories qui se fondent sur lui constituent, certes, une sorte de vérification *a posteriori*. Le baron Roland von Eötvös fut le premier à vouloir aller plus loin en 1886. À l'aide d'une version modifiée du dispositif de Cavendish, il montra que l'écart relatif entre masse gravitationnelle et masse inertielle est inférieur à un milliardième. Cette expérience fut reprise et améliorée par Robert Dicke en 1966 et par Vladimir Braginsky en 1972 ; ils en augmentèrent notablement la précision. La future expérience spatiale STEP (*Satellite Test of the Equivalence Principle*) devrait atteindre la précision fabuleuse d'un centième de milliardième de milliardième (10^{-17}) !

Ainsi l'extrême difficulté de réaliser des expériences à très petites distances explique pourquoi la gravité est si mal testée en deçà du millimètre. Y varie-t-elle par rapport à la loi de Newton ? Le vérifier serait précieux : un écart serait un indice de nouvelles structures de l'espace.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au service d'astrophysique du CEA. Jean-Philippe UZAN, chargé de recherche au CNRS, travaille au laboratoire de physique théorique de l'Université d'Orsay.

Les enfants d'Einstein, Clifford Will, 1988. Y.T. CHEN et A. COOK, *Gravitational Experiments in the Laboratory*, Cambridge University Press, 1993.

Paléontologie

Dinosaures. Enquête sur une disparition

Eric Buffetaut, Éditions Phare, 2000 (128 pages, 58 francs).

Les dinosaures réconcilieront-ils Charles Darwin, le père de l'Évolution, et Georges Cuvier, l'apôtre des « révolutions du Globe » ? On oppose souvent le fixisme rétrograde de Cuvier, qui évoquait des créations successives d'organismes suivant de grandes catastrophes, à l'évolutionnisme de Darwin. Aujourd'hui, et depuis longtemps déjà, l'évolutionnisme est universellement accepté par le monde scientifique (seules quelques sectes « créationnistes » s'y opposent encore) : on admet que le monde vivant que nous connaissons aujourd'hui résulte de l'évolution des espèces depuis 3 500 millions d'années, et on pense que cette lente évolution découle de la sélection de caractères qui favorisent l'adaptation des êtres vivants à leur milieu. La spéciation, c'est-à-dire l'évolution de nouvelles espèces, est donc un phénomène relativement lent, tout comme la plupart des phénomènes géologiques (sédimentation, dérive des continents, etc.). C'est l'action de ces phénomènes durant de très longues durées géologiques qui provoque des modifications considérables.

Ce gradualisme des phénomènes géologiques et biologiques, mis en évidence au milieu du XIX^e siècle, relégua aux oubliettes le catastrophisme de Cuvier et de quelques uns de ses successeurs. C'est dans ce contexte qu'ont longtemps été appréhendés les phénomènes d'extinction de masse de l'histoire de la vie.

Toutefois les nombreuses hypothèses échafaudées depuis des décennies pour expliquer la disparition des dinosaures

ont la plupart du temps un défaut majeur : elles n'expliquent que la disparition des dinosaures. Or ces animaux, qui ont constitué environ 95 pour cent des animaux terrestres (au sens de « vivant sur les terres émergées ») moyens et grands pendant 100 millions d'années, n'ont pas disparu tout seuls. Ne peuvent être testées raisonnablement que les hypothèses qui expliquent aussi les innombrables disparitions d'animaux terrestres et marins il y a 65 millions d'années. L'étude scientifique de cette question a réellement commencé en 1980, lors de la découverte, par une équipe américaine, d'une couche géologique enrichie en iridium, élément abondant dans les météorites.

La découverte d'anomalies d'origine cosmique exactement à la limite Crétacé-Tertiaire, dans le monde entier, puis la découverte d'un énorme cratère d'impact dans la péninsule du Yucatan sont des indications de l'écrasement sur la Terre d'un astéroïde dont le diamètre devait être voisin d'une dizaine de kilomètres, il y a 65 millions d'années. Aussi suppose-t-on que cet impact aurait perturbé l'atmosphère au point de bloquer temporairement la photosynthèse ; le bouleversement des chaînes alimentaires qui en aurait découlé aurait eu des répercussions en chaîne avec, notamment, les disparitions sélectives de la fin du Mésozoïque.

Comment tester l'hypothèse ? Les lacunes de l'enregistrement fossile ne donnent pas une résolution chronologique de l'ordre de l'année ni de la décennie, mais de seulement quelques dizaines de milliers d'années en milieu marin, de quelques centaines de milliers d'années (au mieux) en milieu continental. On ne peut donc affirmer avec certitude que les extinctions de la limite Crétacé-Tertiaire se sont réellement produites en un an plutôt qu'en 100 000 ans, ou en un million d'années. En revanche, on sait qu'elles s'achèvent avec la chute de la météorite. Cet impact a-t-il porté un « coup de grâce » à des écosystèmes affaiblis par d'autres phénomènes, telles de grandes éruptions volcaniques ? Ou bien les extinctions antérieures à la limite Crétacé-Tertiaire ne sont-elles que des phénomènes apparents, dus à la mauvaise qualité de l'enregistrement fossile ?

Les récentes approches statistiques montrent que l'enregistrement fossile ne permet pas de réfuter l'hypothèse météoritique, et de nouvelles études de terrain s'imposent. Une autre voie de recherche est le perfectionnement du scénario de ces extinctions et, notamment, l'étude de la biologie des animaux survivants (amphibiens, crocodiles, etc.) : on donne ainsi des limites biologiques raisonnables au scénario météo-

ritique. Non, la surface de la Terre n'a pas été transformée en four à micro-ondes pendant quelques heures, comme cela a parfois été écrit...

On le voit, cette histoire n'est pas terminée. « Reconstituer dans ses détails une crise écologique qui s'est produite il y a 65 millions d'années est une entreprise passionnante, mais qui n'a rien d'aisé », note justement Eric Buffetaut dans son nouveau livre. Ces avancées considérables dans notre connaissance de la limite Crétacé-Tertiaire ont néanmoins suscité une prise de conscience de l'importance des épisodes d'extinctions de masse dans l'histoire de la vie. Cette dernière s'est construite lentement, selon les processus évolutifs décrits par Darwin, mais elle a aussi été le théâtre des événements violents postulés par Cuvier.

En mêlant l'histoire des sciences et les plus récentes connaissances acquises sur la fin de l'ère secondaire par des disciplines aussi variées que la géochimie, la planétologie ou la paléontologie, E. Buffetaut, l'un des rares acteurs français de cette aventure scientifique, présente sans fard l'état des lieux d'un problème enfin en cours de résolution. La disparition des dinosaures n'est plus un poétique mystère aux explications pittoresques, mais une question traitée scientifiquement, dont le mécanisme bouscule certaines de nos certitudes biologiques.

Tous ceux qui s'intéressent à la façon dont la science se construit liront avec profit cette enquête passionnante, qui relate une des plus importantes avancées scientifiques de cette fin de millénaire.

Jean LE Lœuff

Biochimie

Le grain de blé, composition et utilisation

Pierre Feillet. INRA Éditions, 2000 (312 pages, 330 francs).

Les enfants des écoles comprendraient le miracle du pain s'ils en faisaient, et ils seraient mis sur la voie de son « intelligence » s'ils répétaient l'expérience faite en 1745 par Jacopo Beccari : après avoir malaxé de la farine de blé avec un peu d'eau, il passa le pâton obtenu sous un petit filet d'eau ; une poudre blanche s'écoula avec l'eau – c'est l'amidon – et une masse élastique lui resta dans les doigts, c'est le gluten.



Peter Truska

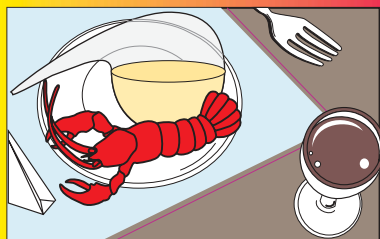
Dinosaures du Crétacé inférieur.

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 27 février 2001.



L'opération est éclairante : c'est la graine à partir de laquelle toute la physico-chimie du pain a poussé. Elle est rudimentaire, mais Joseph-Louis Gay-Lussac, qui la cite dans son *Cours de chimie*, admettait son principe – la séparation de fractions – qui est celui de toute l'analyse chimique.

La science des aliments a considérablement progressé, depuis Beccari. Par exemple, après avoir séparé les diverses protéines en les extrayant successivement à l'eau, à l'eau salée ou à l'alcool, les biochimistes qui avaient ainsi distingué les albumines, les globulines, les gliadines et les gluténines ont utilisé des techniques d'analyse moderne (chromatographie, électrophorèse...) pour distinguer, dans chaque fraction, des types de molécules variés. Et le travail qui a été fait pour les protéines a naturellement son pendant dans le cas des polysaccharides, des lipides, et des constituants minéraux.

Toutefois, la farine et le pain ne se réduisent pas aux tables de composition chimique, même affinées. Pour comprendre le pain, il fallait simultanément explorer la structure du grain de blé, des farines et des sons, et identifier les interactions des divers constituants moléculaires.

Ce travail est loin d'être achevé, parce que les constituants sont nombreux, et P. Feillet écrit même que « L'analyse des constituants des farines et des pâtes, aussi élaborées que soient les méthodes utilisées, ne permet pas de prédire de manière satisfaisante les propriétés physiques de celles-ci ».

Pourquoi tant de pessimisme, alors que, du grain de blé naît aujourd'hui un livre passionnant, qui mêle la technique, la chimie, la physique, la biologie, la génétique ? Après avoir examiné la morphologie du grain, l'auteur considère les farines, qu'il classe et qu'il décrit du point de vue chimique, examinant au passage les procédés de transformation ou de stockage. Puis il révèle l'intimité chimique du grain : ce dernier étant essentiellement composé de protéines et d'amidon, l'auteur examine d'abord les divers types de protéines présentes, puis il explore l'amidon, les pentosanes et les lipides.

Il revient ensuite à des protéines, actives cette fois, avec les enzymes, et passe de la farine à la pâte et de la pâte au pain, en examinant successivement les étapes de pétrissage, de fermentation, de façonnage et de cuisson. Les dernières parties du livre examinent les biscuits, les pâtes alimentaires (pourquoi l'auteur donne-t-il, à propos de l'intérêt de l'huile dans l'eau de cuisson, une indication contraire à celle qu'ont publiée d'autres membres de son laboratoire ?)

et autres produits dérivés du blé, les produits utilisés comme régulateurs des farines et agents de levée des pâtes. Enfin P. Feillet conclut en présentant les méthodes d'appréciation de la qualité, la valeur nutritionnelle des produits à base de blé et les problèmes économiques de la filière blé.

Un tel livre est un tour de force : le monde du blé est si vaste, et les connaissances à son sujet si nombreuses, que l'on admire l'agencement des parties ; le point de vue retenu conduit à mêler harmonieusement des connaissances amassées par les boulangers, les agronomes, les technologues, les biochimistes ou les biophysiciens qui, depuis des décennies, voire des siècles, se préoccupent de ce matériau qui fait vivre l'humanité.

Doit-on admirer le livre sans réserve ? Le gastronome Jean-Anthelme Brillat-Savarin évoquait « l'âme humaine, cause toujours active de perfectibilité » : cherchons comment le livre pourrait être perfectionné. Remarquons, tout d'abord, qu'il ne sera pas abordable par les boulangers, et que les physico-chimistes ou les biologistes manqueront de références exactes (chaque chapitre s'achève sur une vingtaine de références seulement, ce qui est peu, vu l'étendue considérable des matières traitées). Autrement dit, le livre est trop lourd pour être une initiation et trop léger pour être un ouvrage de référence. À qui s'adresse-t-il ? À des étudiants ? Pourquoi pas. À des industriels ? Peut-être, mais lesquels ?

Le livre a aussi son lot d'étrangetés qui pourraient être corrigées. Parfois, des amphibologies gênent la lecture, et quelques abstractions sont inutiles (« si l'on élève la température (apport de thermies) ») ; parfois la langue est un peu lourde. Et par endroits, le texte comporte des « coquilles » chimiques (l'auteur mentionne de l'eau qui serait liée de façon « covalente ») ou physiques (contrairement à ce qu'écrit l'auteur, une transition de phase, même du second ordre, n'est pas une dérivée d'ordre 1 de l'enthalpie par rapport à la température ; c'est un phénomène). Enfin, dans certaines parties, les hypothèses sur les mécanismes moléculaires sont si nombreuses qu'on perd un peu le fil.

Ne nous appesantissons pas mesquinement sur ces imperfections et admirons la quantité enthousiasmante de connaissances ici regroupées. Elle sont le fruit d'un double travail : celui des agriculteurs, qui ont progressivement domestiqué le blé que nous utilisons aujourd'hui, et celui des femmes et des hommes de science, qui ont patiemment exploré les détails moléculaires du monde que les agriculteurs leur forgeaient.

Hervé THIS

OGM, le vrai débat

Gilles-Éric Séralini.
Éditions Flammarion, 2000
(128 pages, 41 francs).

Gilles-Éric Séralini est biologiste moléculaire. C'est en spécialiste qu'il fait, dans une première partie de cet ouvrage, une présentation claire et accessible du code génétique et de la démarche scientifique qui a conduit au transfert volontaire de gènes et à la fabrication d'organismes génétiquement modifiés (OGM).

S'il reconnaît l'intérêt des applications de la transgénèse, notamment dans le domaine médical qui est le sien,

l'auteur ne trouve aucune vertu aux premières variétés transgéniques de plantes déjà cultivées (essentiellement en Amérique du Nord), qu'il qualifie de «brouillons génétiques». Beaucoup de remarques pertinentes émises à ce sujet font l'objet d'études qui doivent être poursuivies, mais les arguments systématiquement négatifs de l'auteur ne prennent pas en compte les connaissances et l'expérience des biologistes-agronomes, habitués à replacer une telle innovation dans le contexte agronomique, comme l'illustrent quelques exemples.

Peut-on considérer, comme indiqué dans le préambule du livre, que l'intégration volontaire de quelques gènes supplémentaires dans une plante cultivée conduit à une nouvelle «sous-espèce» végétale? Non, car les plantes modifiées obtenues (OGM) demeurent interfertiles avec l'espèce d'origine (ce qui est considéré par certains comme

un inconvénient). De surcroît, de nombreuses variétés classiques correspondent à des mutations (naturelles ou provoquées par traitement mutagène); ces plantes mutantes ne sont pas considérées comme des «sous-espèces», bien qu'elles aient subi des modifications incontrôlées et aléatoires de leur génome.

Les biologistes effectuent des «transformations» génétiques des plantes cultivées, notamment parce qu'ils veulent obtenir des végétaux plus rustiques, par intégration d'un gène provenant d'autres organismes. C'est ainsi, par exemple, que l'on a utilisé un gène d'origine bactérienne (Bt) pour rendre des variétés transgéniques (maïs, cotonnier, pomme de terre) résistantes à un insecte parasite. L'auteur tente de développer, à ce sujet, l'image de «plantes à pesticides», mais cette idée n'a pas de sens biologique : les parasites des plantes (insectes, micro-

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-05
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, Emmanuel Leclerc, Laurence Plévert, Marie-Neige Cordonnier (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet, Céline Lapert, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault. 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 : Sylvie Gillet, assistée de Nathalie Choplain. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Conseiller scientifique : Hervé This.

Ont également collaboré à ce numéro : Paul Decaix, André Delacourte, Daniel Desbruyères, Jean-Paul Foucher, Élodie Hardouin, Marie-Thérèse Landousy, Michel Le Bellac, Valérie Martin-Rolland, Jean-Michel Mazin, Alexis Michel, Thierry Montmerle, Christophe Pichon, Philippe Poulin, Jean-Pierre Reverseau, Marc Sauvage, Daniel Tacquenet, Brigitte Vigolo.

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.

PUBLICITÉ 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 RÉSEAU 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).

organismes) sont sélectifs. Ainsi, les larves de pyrale attaquent le maïs (et quelques autres plantes cultivées comme le houblon), mais elles n'attaquent ni la pomme de terre ni le chou, par exemple. Par manque d'appétence ? En raison d'un effet répulsif ? D'un effet toxique ? Au cas où cette dernière hypothèse se vérifierait, devrions-nous conclure que la pomme de terre et le chou sont des plantes à pesticides ? La démonstration est du même type pour les variétés cultivées classiques qui résistent à un herbicide sélectif. Par exemple, le blé produit naturellement une enzyme (nitrilase) qui inactive certaines molécules herbicides (oxinyls) et le rend insensible à l'herbicide, qui détruira beaucoup d'autres plantes adventices concurrentes ; le blé n'est pas devenu pour autant une plante à pesticides.

G.-E. Seralini conteste la démarche de résistance à un parasite par l'introduction d'un seul gène dans une plante. Il considère que le parasite, dont le temps de génération est plus court que celui de la plante, aura l'avantage de muter pour surmonter ce mécanisme simple de résistance. Toutefois les généticiens savent que la réalité est plus complexe... sinon leurs travaux depuis un demi-siècle, dans ce domaine, n'auraient pas eu de sens. Les sources naturelles de résistance transmissibles par croisement n'étant pas nombreuses, ils adaptent des stratégies de lutte. Lorsqu'ils étudient les plantes à cycle de reproduction long (arbres fruitiers), ils cherchent plutôt des formes complexes de résistance : elles sont plus durables, mais généralement d'une efficacité relative. Lorsqu'ils veulent protéger des plantes à cycle de reproduction court (maïs, tomate...), ils explorent des formes de résistance qui mettent en jeu un ou quelques gènes, si la protection est efficace, même si elle ne doit durer que quelques années. La transgénèse permet d'aborder les deux stratégies en élargissant considérablement les sources de résistance au-delà de l'espèce cultivée.

La troisième partie du livre examine les réglementations des OGM. Le monde de la recherche et la société en général demandent que les études et utilisations des OGM soient réglementées. La demande initiale est d'ailleurs venue des biologistes, dès les premières réussites de transferts de gènes (Congrès d'Asilomar, en 1975). L'auteur décrit positivement les instances françaises responsables du contrôle : la Commission du génie génétique, qui traite des applications

en milieu fermé, la Commission du génie biologique (milieu ouvert), l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (contrôle alimentaire), le Comité de biovigilance (contrôle en culture). Les éventuels effets indésirables de l'intégration d'une construction génétique nouvelle dans un génome complexe le conduisent à réclamer des tests préalables nouveaux, dont il ne fixe pas les limites d'exigence et pour lesquels nous manquons de méthodes éprouvées.

Les qualités (ou défauts) alimentaires des variétés classiques actuellement cultivées ne font pas l'objet (sauf quelques exceptions) d'analyses systématique «d'alimentarité» avant leur mise sur le marché, même lorsque ces variétés résultent de croisements interspécifiques avec des espèces botaniques proches des espèces cultivées (exploitation de la diversité des ressources génétiques). Le chantier dépasse les OGM ; il est ouvert, mais il conviendrait de planifier les objectifs de façon réaliste.

Pour terminer, l'auteur soulève deux questions importantes trop souvent négligées. Il se préoccupe, à juste titre, des éventuelles applications militaires de la transgénèse, champ explicitement écarté de la réglementation française. Il conviendrait, en effet, que la société soit informée des possibles menaces et que des instances soient chargées de contrôle, afin que «bio-terrorisme» et «biodéfense» restent des scénarios de films. Pour les recherches et l'expertise scientifique, il propose que les chercheurs s'engagent sous une sorte de serment d'Hippocrate, sans toutefois rappeler que Michel Serres a déjà proposé concrètement un tel serment, qui apporterait une garantie éthique supplémentaire.

Vrai débat ? Ou plutôt état des lieux pour une contribution au débat, l'ouvrage est d'une lecture facile. Les lecteurs qui sont *a priori* opposés à la culture de plantes transgéniques trouveront un argumentaire solide pour étayer leur position. En revanche, ceux qui veulent construire leur opinion devront, avant de se prononcer, chercher d'autres lectures pour compléter l'argumentaire.

Jean-Pierre PRUNIER

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de **Pour la Science** est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>