

Pour la Science

AOÛT 1997

■ POUR LA

SCIENCE

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

Instruments
à vent

Les secrets
du Soleil

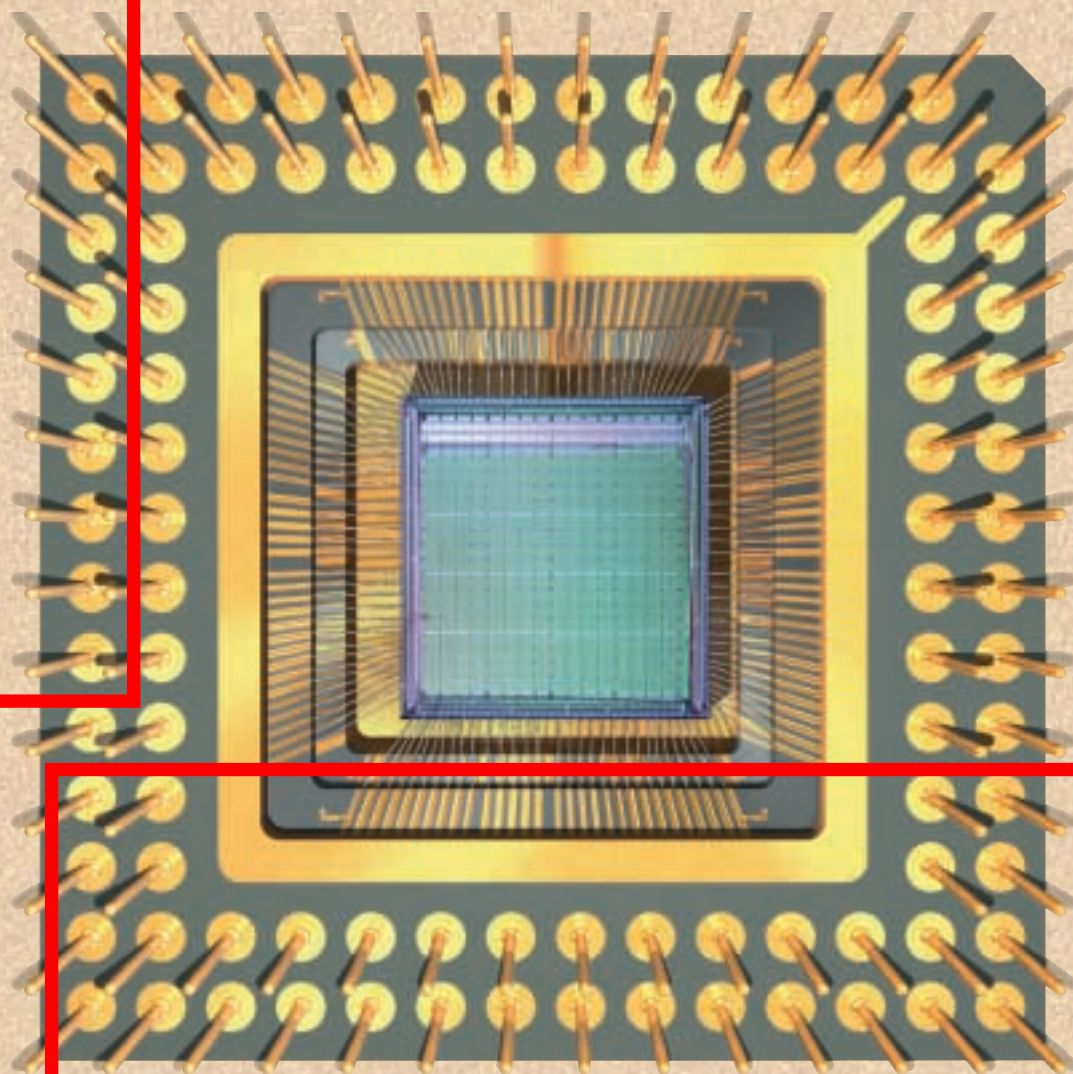
Les fonds
des océans

Les hominidés
d'Afrique

Le nucléaire
en Iran

Tombes royales
en Chine

Recherches
d'images



Des ordinateurs configurables

Canada : \$ 8,75

Bloc-notes de Didier Nordon

5

Jeu-concours

6

Petit puzzle pour les vacances

par Pierre Tougne

Tribune

7

Point de vue

8

Grandes écoles ou Faculté?

par Pierre-Gilles de Gennes



Présence de l'histoire

10

La vie secrète de Lev Landau

par Gennady Gorelik

Science et finance

14

Bridge ou échecs?

par Christian Walter

Science et gastronomie

17

Lentilles aplaties



Perspectives scientifiques

20

Amplification sismique

Le coureur de Marathon

Superdéformation en astronomie

Un dinosaure normand relie les continents

La composition de la Terre

Protéger les plages

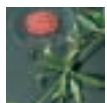
Gyromètre superfluide

Hibernation active

Repoussantes surfaces

Extinctions et territoire

Mélange sans fatigue



L'expérience du mois

94

J'ai descendu dans mon jardin...

par François Percey



Logique et calcul

100

Voyageurs et baguenaudiers

par Jean-Paul Delahaye



Visions mathématiques

106

Des vaches dans le labyrinthe

par Ian Stewart

Savoir technique

108

Les étiquettes contre le vol



Analyses de livres

109

La bosse des maths

– Les atomes existent-ils vraiment?

– L'origine des langues

– Opération Adam

– La chimie supramoléculaire. Concepts et perspectives

– Histoire de la contraception

– Histoire naturelle et artificielle de la procréation

L'Iran construit-il des armes nucléaires?

32

par David Schwarzbach

Riche en pétrole et en gaz naturel, l'Iran mène un programme nucléaire que justifie mal la seule production d'électricité.



Les premiers hominidés en Afrique

36

par Meave Leakey

et Alan Walker

La découverte d'une nouvelle espèce d'hominidés primitifs recule les origines de la bipédie vers quatre millions d'années.



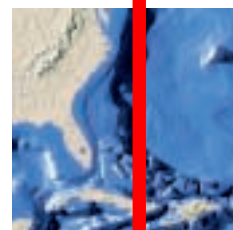
Les reliefs sous-marins

42

par Lincoln Pratton

et William Haxby

Des techniques modernes de sonar fournissent des cartes des fonds sous-marins aux abords des continents.



Guêpes et apprentissage

48

par J. van Baaren,

G. Boivin et J.-P. Nénon

Au cours des quelques jours que dure sa vie, une minuscule guêpe parasitoïde apprend à trouver les meilleurs hôtes pour y pondre ses œufs.



SOHO révèle les secrets du Soleil

54

par Kenneth Lang

L'Observatoire solaire et héliosphérique SOHO est le nouvel engin spatial qui étudie le Soleil sans relâche depuis février 1996. Ses observations révèlent la vie secrète de notre étoile.

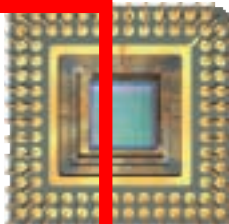


Les ordinateurs configurables

6

par John Villasenor
et William Mangione-Smith

Les nouveaux ordinateurs modifient la configuration de leurs circuits durant leur fonctionnement. Ils excellent dans la reconnaissance de formes, le traitement d'images et le chiffrement des informations.



Les tombes impériales de la dynastie Tang

70

par Alexander Koch

Des archéologues allemands et chinois étudient les imposants mausolées des souverains de la plus grande époque de la Chine impériale. Ils se préoccupent également de préserver ces monuments quasi inconnus.

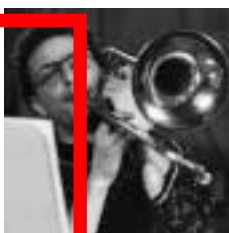


Des instruments à vent harmoniques

78

par J.-P. Dalmont, G. Gilbert
et J. Kergomard

Les physiciens complètent le savoir-faire des facteurs d'instruments en étudiant la production du son dans les instruments à vent.



La recherche d'images numériques

86

par David Forsyth, Jitendra Malik et Robert Wilensky

Les programmes de recherche d'images repèrent les éléments spécifiques d'une personne, d'un lieu ou d'un objet dans les archives photographiques.



Sur notre site Web (<http://www.pourlascience.com>), vous trouverez des compléments bibliographiques à propos des articles de *Pour la Science*.

ÉDITORIAL

La marche vers la bipédie

En science, les plus intéressantes questions sont les plus difficiles. Il en est ainsi de l'origine de la bipédie. L'australopithecus est-il devenu hominidé en marchant? Il y a plus de 4,4 millions d'années répondent Meave Leakey et Alan Walker sur la base des découvertes des restes fossiles d'*Australopithecus anamensis* au Kenya et d'*Ardipithecus ramidus* en Éthiopie (voir *Les premiers hominidés en Afrique*, page 36).

La question nous passionne parce qu'il s'agit de notre parenté (le moi est aimable en paléontologie) et que les premiers frissonnements du moi culturel fascinent. La bipédie a été liée à des pratiques culturelles adaptées à l'environnement. Les paléontologues ont pensé que la station debout réduisait la surface du corps exposée aux rayons du soleil, permettait aux hominidés de vivre dans la savane où ils n'étaient plus protégés par les forêts. Les premiers hominidés récemment découverts vivaient dans des régions boisées! Selon un autre argument, la bipédie libérait les mains pour le transport des aliments; l'hypothèse est moins convaincante si l'australopithèque devait grimper aux arbres, en se servant de ses quatre membres, pour recueillir sa nourriture.

Une autre découverte résulte de l'examen de l'ADN de l'homme de Néanderthal. Il a vécu en Europe pendant 200 000 ans, avant que sa lignée ne disparaisse, il y a 30 000 ans. Avait-il véritablement disparu s'interrogeaient les spécialistes ou s'était-il mélangé à l'homme de Cro-Magnon avec lequel il a «cohabité» pendant 10 000 ans? La réponse des paléogénéticiens est catégorique: l'ADN de Néanderthal est trop séparé de celui des humains pour qu'il ait eu interférence.

L'évolution de l'homme a procédé, semble-t-il, par buissonnement de différentes lignées, dont beaucoup se sont éteintes. Plus nous trouverons de fossiles d'hominidés différents, plus la tâche, délicate mais impérative, sera de distinguer les branches mortes de notre rameau véritable.

Philippe BOULANGER

Par Didier Nordon

Toi, le venin...

Ce qui est merveilleux, avec les grands esprits, c'est que, même lorsqu'ils se mettent en roue libre, ils conservent intacte la puissance de raisonnement qui fait leur gloire. Ainsi Albert Jacquard, à qui *Avantages* (juillet 1997) demande ce que nous pouvons faire pour rendre le monde meilleur, répond : « Regardons l'autre comme une source, pas comme un obstacle. Même Diderot est une source. Avant lui, je n'imaginais pas que ces horreurs puissent exister. Ignorant que c'était possible, je ne pouvais rien faire. Maintenant, je le sais et je peux lutter. »

Voilà qui est raisonnable. Autant que se livrer qui expliquait que les serpents sont utiles, puis que c'est grâce à leur venin qu'on peut fabriquer du sérum.

Il n'y a pas photo ?

Rares sont les romans qui ne proposent pas, en quatrième de couverture, une photo de l'auteur. L'acheteur potentiel feuillette le livre, hésite, hésite encore... Enfin, il tombe sur le visage de l'auteur... C'est fini, plus d'hésitation : à superbe visage, superbe roman. Point conclu ! Une tête d'auteur, ça fait vendre. De même, ceux qui soignent leur promotion personnelle sur Internet accompagnent leur bibliographie d'une photo qui rend plus manifestes encore leurs éminentes qualités intellectuelles.

Pourquoi donc les articles scientifiques ne s'inspirent-ils pas de cet usage ? La photo de l'auteur à côté du titre éviterait bien des soucis au lecteur. Cet auteur-ci a le regard torve ? Méfiance : il a dû trahir les démonstrations et manipulations présentées dans son article. Ne prenons aucun risque inutile, ne le lisons pas. Cet auteur-là a le regard franc et intelligent, l'air puissant ? Son résultat est sûrement important, allons-y.

On tel préfère permettre au lecteur d'utiliser les articles des autres sans avoir à le lire : au moins, du temps gagné pour sa recherche !

Ne soyez pas spontanés !

A-t-on assez glosé sur le paradoxe contenu dans cette injonction ! Sur la situation impossible dans laquelle elle met ceux qui en sont l'objet !

Enfin, l'Université n'est pas au courant. Elle propose aux nouveaux étudiants de commencer par une « Unité de Méthodologie du Travail Universitaire ». Laquelle a pour objectif de « développer en eux l'aptitude à prendre des initiatives personnelles » et de « les amener progressivement à être autonomes ».

Soit. Mais imaginons que l'Université soit attentive à la qualité de ses enseignements : aurait-elle besoin d'ex-

pliciter aux étudiants comment tirer le meilleur profit des cours ?

Le premier acte d'autonomie que l'étudiant doit s'être accompli lorsqu'il arrive à l'université, c'est, bien sûr, de sécher les mauvais enseignements. L'Unité de Méthodologie leur proposera-t-elle un cours sur la façon de se tenir dans une salle de cours ? Si oui, ce cours servira-t-il lui-même assez bien fait pour que les étudiants évitent de le sécher ?

Un paradigme universel

Ce qui est simple est toujours faux. Ce qui ne l'est pas est inutilisable. (Voléry, *Mauvaises pensées et autres*.) Observation simple... et juste !

Plus un concept est élaboré, plus celui qui le manipule incline à lui accorder une confiance excessive et à l'utiliser sans discernement. Les concepts trop savants s'invitent où ils n'ont rien à faire.

J'ai passé ma vie à élaborer ce concept, mon honneur. Je pense, aussi, je l'appliquerai à toutes les sciences plutôt qu'admettre qu'il trouve un terrain correct d'application une fois tous les mille ans. Ce que l'on gagne à affiner les concepts par le langage risque de mésusage. Les concepts tendent des pièges, induisent de fausses lectures. Ils gênent la pensée autant qu'ils l'aident.

Ne, mon trère asine...

« Lorsque tel ou tel savant – nous le connaissons tous – interrompt ses travaux parce que leurs résultats risqueraient de servir des desseins fâcheux ou sinistres, nous pensons qu'il se substitue à la société civile ; à sa façon, il suspend la démocratie et installe le terrorisme individuel ou anarchique. »

Assimiler un refus de la conscience à un coup contre la démocratie, ciel ! Si c'était un âne qui avait écrit cela, l'espèce asine – rougissant de honte – plaiderait : « Ce n'est qu'un accident. Notre collègue raisonne mieux d'habitude. Et nous aussi. Ce n'est pas un âne qui a écrit, mais un humain, le philosophe François Dagognet (*Pourquoi la science ?*, Champ Vallon, 1997). Alors ? Jugerons-nous qu'écrire une bourde de ce calibre suffit à disqualifier toute sa pensée ? Non. Soyons aussi charitables avec les hommes que nous l'aurions été avec les ânes : ils n'en ont, visiblement, pas moins besoin.

Bloc-note ment vôtre

Le comité d'organisation du XVI^e Congrès international des linguistes termine sa circulaire d'information par la salutation : « Linguistiquement vôtre ». Étrange. Lorsque Molière s'adresse au roi, il se déclare son « très humble, très obéissant et très fidèle serviteur et sujet ». Voilà qui est simple et clair. Mais, « linguistiquement vôtre » – connaissant la violence des querelles entre linguistes – que diable est-ce là comme salutation ?

Ma perplexité n'aurait jamais connu de terme si je n'avais lu la lettre circulaire d'un théoricien des nombres qui, s'estimant désavoué par ses collègues, démissionne de ses responsabilités et, pour attirer sa révérence, recourt à la formule finale : « Mathématiquement vôtre ». Là, eureka. J'ai fait assez de théorie des nombres pour savoir ce que c'est que porter des sentiments arithmétiques à quelqu'un. Aucun doute, c'est une formule de paix. Entre mathématiciens, on s'apaise.

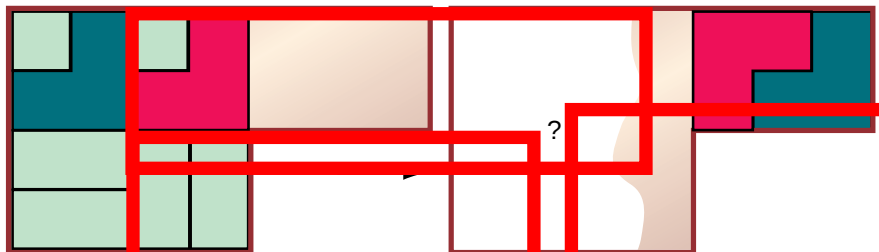
Exploitions ce procédé. Les professions des polémologues et des thanatologues sont comme les autres, je présume : des sympathies y naissent, des hiérarchies y règnent. Alors, j' imagine un vieux polémologue terminant une lettre à un vieux collègue (et néanmoins ami) par ces mots les plus cordiaux du monde : « Très polématiquement à toi », ou un débutant en thanatologie sollicitant un grand professeur : « J'ai l'honneur d'être, Monsieur, votre très humble et très obéissant thanatologue. »

LE JEU-CONCOURS N° 38

PETIT PUZZLE POUR LES VACANCES

S'il pleut en ce mois d'août, nous vous suggérons de réaliser les différents éléments de ce puzzle et de trouver le moyen de réunir par glissement, et sans sortir du cadre, les deux pièces rouge et bleue comme indiqué à droite.

Envoyez la séquence des déplacements sur carte postale à Pour la Science, 8, rue Ferrou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues en septembre 1997, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.



RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°36

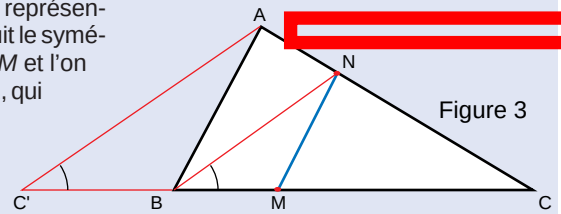
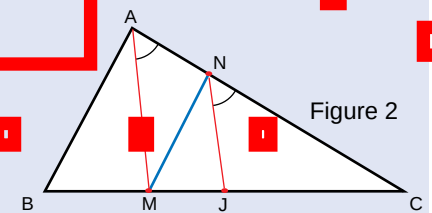
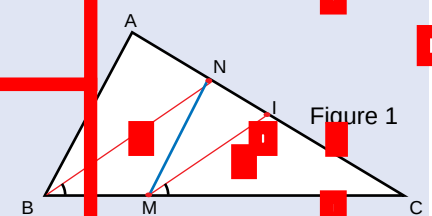
De nombreuses solutions ont été proposées par les lecteurs, dont voici les deux plus fréquentes. On supposera M plus près de B que de C (sinon on échange le rôle de B et de C). La surface du triangle MNC étant la moitié de celle de ABC , il est naturel d'introduire le point I milieu de AC (voir la figure 1) car le triangle BIC a aussi une surface moitié de celle de ABC . L'égalité des surfaces de CMN et CBI s'écrit alors $1/2 CM \cdot CN \sin C = 1/2 CI \cdot CB \sin C$ dont on tire $CM/CI = CB/CM$, relation qui, d'après la réciproque du théorème de Thalès, implique que BN et MI sont parallèles. D'où la construction : par B on trace une parallèle à MI qui coupe AC au point N cherché.

Si l'on note J le milieu de BC , on a une deuxième variante qui consiste à tracer, par A , la parallèle à AM , qui coupe AC en N (voir la figure 2).

La solution qui a ma préférence, en ce sens qu'elle évite la construction du milieu d'un segment, est représentée sur la figure 3. On construit le symétrique C' de C par rapport à M et l'on trace, par B , la parallèle à $C'A$, qui coupe AC en N .

Enfin, voici la solution «à la physicien» de quelques lecteurs : on suspend

par un fil le triangle au point M . Sous l'action du poids du triangle, le prolongement du fil passera par le centre de gravité G du triangle et le point N . Cette solution a l'avantage de s'appliquer quelle que soit la forme de la surface et quelle que soit la position du point M sur cette surface.



Reproduction d'expériences

J'ai été intéressé par l'expérience de Hernán Makse dont *Pour la Science* a rendu compte (voir *Les couches de sable*, *Pour la Science*, juillet 1997) ; les phénomènes de ségrégation sont toujours spectaculaires, surtout lorsqu'ils sont en couleur.

C'est une bonne idée que de reprendre les expériences d'il y a 20 ans et plus. Peut-être est-il même nécessaire de le faire systématiquement. Mais pour cela, il est urgent de réaliser avant tout des travaux bibliographiques sérieux puis d'en extraire une synthèse bibliographique critique. Je l'accorde, ce n'est pas facile dans le cas de la physique des matériaux granulaires car les résultats sont dispersés dans des revues professionnelles disparates. Ceci exige aussi un effort de compréhension des diverses approches (mécanique, génie des procédés, mines, pharmacie,...) qui ont toutes leurs langues propres.

À notre époque où les crédits se raréfient, les équipes ont trop tendance à proclamer que leur sujet est entièrement nouveau. Ceci est dommageable pour la science.

Parce que les jeunes scientifiques ne sont pas incités à faire une recherche bibliographique autrement qu'à l'aide d'un ordinateur ; ils sont très déçus lorsqu'ils découvrent, après coup, dans une revue ancienne, que le sujet de leur long travail est défloré.

Parce que le travail scientifique n'est pas une question de mode ; il s'inscrit dans une continuité. Autrement pourquoi publier des résultats qui seront perdus trois ans après ? Même les ruptures fondamentales supposent la connaissance du ou des points en discussion.

Il ne s'agit pas de mettre en cause une équipe, mais de poser le problème de la responsabilité de l'ensemble de la communauté scientifique. N'est-ce pas à elle (notamment par l'institution des professeurs) de contrôler la diffusion de l'information et de promouvoir les échanges entre scientifiques de domaines différents ? Dans le cas particulier, en laissant s'installer une « physique » des milieux granulaires qui tend à ignorer les résultats de la « mécanique » de ces milieux, elle favorise un ostracisme culturel ou à tout le moins un esprit de chapelle contraire au travail scientifique.

Mais là où cela devient plus grave c'est lorsqu'il y a une mauvaise communication scientifique, où les gens refont le travail des autres,..., car alors quelle est la différence entre le savoir-faire industriel qui se carac-

térise par l'absence de transfert de technologie entre sociétés concurrentes et une science de ce type, sans communication ?

Comme vous l'aurez compris, l'expérience de Makse n'est pas réellement nouvelle. On trouve des expériences analogues dans au moins trois publications dont la première, de 1996, concerne des lessives. Par ailleurs, les problèmes de stratification sédimentaire qui sont abordés à la fin de l'article ont été posés dernièrement par G. Berthault et P. Julien. Ces auteurs montrent que plusieurs strates peuvent se déposer ensemble (au même temps) au même endroit (à la même abscisse) et que deux points d'une même strate à deux abscisses différentes se déposent à des instants différents. Ils remettent donc partiellement en question la datation par stratigraphie.

Je dépose le brouhaha qui existe à l'heure actuelle dans le domaine du « tas de sable ». Il faut qu'il cesse : soit les scientifiques acceptent de faire la bibliographie, d'utiliser un langage commun et nous resterons des scientifiques ; nous pourrions continuer à utiliser les travaux des autres et à communiquer ; sinon nous tombons dans le domaine de la « communication spectacle » et cela ne sert plus à rien de publier ou plus personne ne lit les articles et n'utilise les résultats. Je suis vieux de deux ans. Le travail que j'ai fait ne sert donc plus à rien.

Il est vrai que Pascal a redécouvert sans recherche bibliographique la troisième deuxième proposition d'Euclide à l'âge de neuf ans. Mais celle-ci porte toujours le nom d'Euclide !

Pierre ÉVESQUE, Châtenay-Malabry

Formes et gènes

Dans « Les inattendus du développement » (voir *Pour la Science*, juin 1997), Alain Prochiantz affirme : « Ce sont des gènes qui passent la forme de génération en génération. » et, plus loin, « L'inné étant déterminé par les gènes... » Je le trouve un peu enthousiaste : faut-il faire peser sur certains gènes la lourde responsabilité de nous mener d'une génération à l'autre ? Les secrets de la permanence des formes ? J'ai l'impression que, pour A. Prochiantz, « l'inné » (je suppose qu'il veut dire « l'héréditaire ») se réduit au génome. La théorie cellulaire, selon laquelle une cellule provient d'une autre cellule (et non d'un génome), a toutefois toujours cours en biologie. Or une cellule est un être vivant (au contraire d'une macromolécule, l'ADN y

compris) qui possède une forme, même de considérer que la cellule est, au départ, un amas informe de matière que les gènes de développement viendraient informer au cours de l'embryogenèse : une telle opération ressemblerait davantage à de la magie qu'à un génèse.

René MISSLIN, Strasbourg

Réponse d'Alain Prochiantz

Si on a correctement le contenu des « inattendus », on saura que je n'ai jamais été un adepte du déterminisme génétique absolu. La position que j'ai d'ailleurs défendue dans plusieurs ouvrages est que les gènes déterminent, pour l'essentiel, l'appartenance à l'espèce et jouent au jeu infini des possibles le développement de l'individu. Les mécanismes épigénétiques permettant ce jeu tiennent pour une part importante au fait que les gènes sont exprimés dans les cellules qui constituent la base des organismes vivants en même temps qu'ils les définissent comme vivant, la cellule étant le site d'intégration nécessaire aux interactions entre le génétique et l'épigénétique. Je suis convaincu que dans les propos qui, conservé dans son contexte, puisse être mise en contradiction avec la théorie cellulaire, j'en ai au contraire.

Balance cérébrale

Stanislas Dehaene écrit dans *Le cerveau calcule-t-il ?*, « Pour la science, il faut rendre compte du temps nécessaire à une balance de Roberval pour basculer, d'autant plus long que les valeurs des poids placés sur ses plateaux sont voisines. Je suis convaincu qu'un logarithme intervienne à ce propos. »

Robert RIO, Saint-Nazaire

Réponse de Stanislas Dehaene

Vous avez raison, le temps que met une balance de Roberval à basculer est inversement proportionnel à la racine carrée de la différence des poids. Cette fonction est proche, mais différente, de celle que donne un logarithme.

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. Retrouvez la Tribune sur l'Internet à <http://www.pourlascience.com> et envoyez-nous vos messages.

Grandes écoles ou Faculté?

PIERRE-GILLES DE GENNES

... Quelle angoisse!

Les bacheliers ne sont pas bien informés des spécificités et des rénovations des enseignements scientifiques de l'Université et des classes préparatoires.

Faculté ou classe de préparations scientifiques? Les bacheliers doivent choisir entre deux systèmes différents. Sur quels critères? D'abord sur des caractéristiques et des qualités personnelles. L'Université laisse ouvert un plus grand espace de liberté pour ceux qui savent organiser leur travail. Au contraire, hypotaupé et taupe imposent une contrainte plus grande, et la voie est toute tracée.

La Néhésis de la liberté universitaire est l'illusion. L'étudiant à l'Université doit interroger son miroir chaque matin pour savoir si sa méthode de travail est efficace. L'étudiant des classes préparatoires a la voie toute tracée, mais doit se convaincre de l'intérêt de ce qu'on lui enseigne, de l'utilité de la technique qu'il acquiert à coups de problème répétitifs... Le Chien et le Loup dirait La Fontaine.

Le handicap des prépas est le caractère aléatoire des concours d'entrée. S'il n'est pas exact que l'avenir d'un étudiant se joue sur une méforme lors d'une épreuve ou un concours, la plupart des étudiants le croient. Et les préparatoires naissent de la polytechnique s'angoissent... Les étudiants ont, à l'Université, un plus grand droit à l'erreur passagère.

Ce qui ne semble dramatique dans le système des préparations est que certains élèves (les «5/2») perdent une année à répétition la taupe pour se perfectionner dans la résolution d'exercices techniques sans grand intérêt scientifique. Les classes préparatoires enseignent des techniques utiles, mais qui ne constituent pas l'essence des mathématiques ou de la physique. Il y a autre chose à apprendre.

Plus pénalisant encore que le système des concours me semble l'enseignement dans certaines grandes écoles.

Il y a peu de rapport entre l'intérêt scientifique et l'enseignement pratiqué dans les Écoles et leurs classements dans l'esprit du public. L'étudiant qui désire se consacrer à la gestion doit opter pour l'École des mines ou Centrale, l'imprimant plus tenté par l'apprentissage des technologies nouvelles devrait présenter et choisir Physique-chimie. Le système des concours communs ne valorise pas les vocations, d'autant que les heureux élus qui ont le choix entre différentes écoles ont une vision naïve de leur vie future.

Les professeurs des classes préparatoires de l'Université sont conscients et volontaires. Mais les systèmes et les traditions sont lourds. D'où l'inertie.

Certaines grandes écoles ne dispensent pas un enseignement rigoureux de la qualité des élèves qu'elles ont recrutés. Par laxisme, ils laissent gonfler leurs étudiants dans l'autosatisfaction; par méconnaissance des pratiques industrielles, ils dispensent un enseignement parfois daté; par tradition, ils laissent se perpétuer des traditions de bizutage indignes. Le non-abandon de cours obsolètes et l'empilage de disciplines désuètes est un travers français, pays où le conservatisme est fort.

Les grandes écoles, conscientes de ce handicap, adaptent leur recrutement. Le concours commun Polytechnique-Physique et Chimie a résulté d'une réflexion des deux écoles sur les besoins

de l'industrie. La volonté commune est de former des ingénieurs aux nouveaux métiers issus de la recherche et de sélectionner des élèves ayant le goût de la recherche novatrice. Parallèlement à un meilleur recrutement, les enseignements sont modifiés.

Heureusement les deux systèmes, Université et Grandes écoles, se rapprochent: par l'augmentation des effectifs des Grandes écoles et par les passerelles qui résultent de l'admission aux Grandes écoles sur dossier. Je rêve d'un enseignement universitaire qui suive plus les élèves, les réoriente avec fermeté et souplesse, et ce dès les premières années universitaires. J'ai pratiqué cette aide pédagogique pendant quelques années, alors que j'étais enseignant à Orsay, et la pratique m'est apparue enrichissante, à la fois pour le professeur que j'étais et (j'espère) pour les élèves que j'ai suivis.

Ainsi l'Université s'efforce de mieux suivre les étudiants en sciences, les encourage à travailler en équipe. Cette éducation à l'autonomie est un atout apprécié des industriels. Il faudrait, pour améliorer encore l'enseignement universitaire français, que les enseignants des premières années de faculté soient d'une qualité comparable aux professeurs anglo-saxons, et que cet enseignement soit «primaire» soit «primordial». Les prix Nobel Richard Feynman et Erik Bloch n'ont pas hésité à enseigner la physique aux tout jeunes étudiants. La tentative avait ses défauts, mais un souffle nouveau a renouvelé la pédagogie.

L'industrie, la nation, ont besoin d'ingénieurs inventifs. A-t-on assez glosé sur le paradoxe consistant à inculquer la spontanéité inventive! Il est certes difficile d'enseigner l'innovation. Mais le précepte passe par l'exemple. Et le contre-exemple lorsque trop de poids est mis sur la simulation numérique de phénomènes connus, sur la résolution analytique de problèmes surannés. L'inventivité des étudiants s'estompe. A l'âge critique où l'élève ingénieur doit se cultiver, développer sa créativité et sa confiance en ses capacités techniques, il importe de ne pas l'enrayer par des tâches annexes et stérilisantes.

J'ai l'espoir que les enseignements délivrés par les deux systèmes éducatifs s'améliorent en allant à l'essentiel, scientifiquement pertinent.

Pierre-Gilles de GENNES, prix Nobel de physique, est Directeur de l'École de physique et chimie industrielles.

La vie secrète de Lev Landau

GENNADY GORELIK

D'après les archives du KGB, Landau a cosigné un manifeste contre Staline, qui lui valut d'être emprisonné pendant un an.

La physique de la matière condensée du XX^e siècle repose en grande partie sur les théories de Lev Davidovitch Landau. Il a décrit la superfluidité, la supraconductivité et divers aspects de l'astrophysique et de la physique des particules. Les niveaux de Landau, le diamagnétisme de Landau, le spectre de Landau, la théorie de Landau-Ginzburg restent aujourd'hui des outils essentiels de la physique. Des générations d'étudiants ont lu ses livres : la bibliothèque de l'Université d'Harvard contient quatre fois plus d'ouvrages du physicien soviétique que du physicien américain Richard Feynman.

En 1962, Landau reçut le prix Nobel de physique. On l'a parfois décrit comme un personnage sûr de lui, insolent et charmant, mais on ignore généralement qu'il a été emprisonné par Staline à la fin des années 1930, et qu'il a contribué à fournir la bombe atomique au dictateur, à la fin des années 1940.

On a découvert par hasard que Landau était une personnalité politique suspectée par le KGB. En 1989, une de ses nièces, Maia Besserab, a publié la quatrième édition de la biographie de Landau qu'elle a rédigée. Quand le communisme est tombé, elle a déclaré qu'elle pouvait enfin dire toute la vérité sur l'arrestation de Landau, en 1938. Selon elle, Leonid Pyatigorsky, un ancien étudiant rancunier de Landau avait alors accusé le physicien d'être un espion allemand. Et ceci pendant la Grande Terreur, où Staline fit exécuter sans mobile des millions de personnes.

Malheureusement pour M. Besserab, L. Pyatigorsky était encore en vie. Il était exact que Landau l'avait exclu du groupe de physique théorique de l'Institut de Kharkov. «Dau» comme le surnommaient ses étudiants qui l'adoraient, était parfois très dur, et une pancarte sur la porte de son bureau indiquait : «Attention ! Il mord.» Toutefois, malgré son éviction, L. Pyatigorsky respectait toujours Landau et, bouleversé par l'accusation

de M. Besserab, il la traduisit en justice pendant l'été 1990.

Le juge demanda au KGB de vérifier les informations sur Landau. Aucune mention n'était faite de L. Pyatigorsky, et M. Besserab dut lui présenter des excuses. Je crois que c'est à cette occasion que l'on découvrit que la gloire de la science soviétique n'avait pas été une victime innocente du stalinisme, mais bel et bien un agent antisoviétique.

Or, j'ai eu moi-même accès aux fichiers concernant Landau. Peu après le début de la Perestroïka, à la fin des années 1980, j'ai pu faire des recherches à l'Institut d'histoire des sciences et des techniques de Moscou. Le directeur de l'Institut était le fils du précédent ministre de la défense, Dmitri Ustinov. J'ai alors tenté ma chance en demandant d'avoir accès aux archives du KGB.

J'ai rédigé une lettre prudente signalant que l'on connaissait mal la vie des physiciens soviétiques arrêtés dans les années 1930. Énumérant une dizaine de noms, je demandais l'autorisation d'avoir accès à leurs dossiers. Deux semaines plus tard, ma lettre était sur le bureau d'un dirigeant particulièrement libéral du KGB.

Deux mois plus tard, j'obtenais l'autorisation de consulter les dossiers, au siège du KGB, où tant de prisonniers avaient passé des heures épouvantables.

Il n'y avait pas de salle de lecture, rien qu'une pièce minuscule, où les proches des prisonniers attendaient. On me conduisit dans le bureau d'un agent absent peut-être la pièce même où Landau avait été interrogé.

On me posa aussi des questions, notamment en quoi les dossiers des physiciens morts pouvaient être intéressants. À mesure que je répondais à leurs questions, je me demandais pourquoi j'avais été autorisé à entrer dans l'enceinte du KGB. Les personnes qui m'interrogeaient savaient certainement que mes parents, juifs, avaient fui l'URSS et gagné les États-Unis. Cherchaient-ils à me piéger ? Je compris finalement que le KGB cher-

chait surtout à améliorer son image de marque auprès du public.

Quelques heures plus tard, ils me laissèrent avec cinq dossiers datant de 1930 à 1950. Malheureusement, je n'avais qu'un photocopieur à ma disposition et devais recopier à la main ce qui m'intéressait. Les physiciens Yuri Rumer et Moïseï Koretz ont été arrêtés la même nuit que Landau. Rumer était un des pionniers de la chimie quantique ; Koretz, moins célèbre, était un ami proche de Landau.

Dans le dossier de Rumer, j'ai trouvé trois rapports non signés. L'un n'était pas daté et il était bizarre : il stipulait que Rumer était le fils d'un rabbin, qu'il avait vécu à Berlin et qu'il avait travaillé pour la Gestapo. Le deuxième rapport datait de mars 1938 et rapportait une conversation entre Rumer et Landau au sujet d'officiels soviétiques : selon Landau, on ne pouvait rien espérer de leur «sous-hommes». Dans le troisième, le rapporteur révélait que Landau et Rumer connaissaient l'existence d'un manifeste antisoviétique qui aurait dû être distribué en grand nombre. L'original de ce tract, manuscrit, devait se trouver dans le dossier de Koretz, mais le dossier de Landau en contenait une copie dactylographiée.

Ce texte devait être distribué discrètement pendant le défilé du 1^{er} mai 1938. On lisait : «Camarades, la juste cause de la Révolution d'octobre a été trahie... Des millions de personnes innocentes sont jetées en prison, et chacun craint que son tour n'arrive... Ne voyez-vous pas, camarades, que la clique de Staline aomenté un coup d'état fasciste ! Le reste du socialisme que quelques mots publiés dans les journaux et enveloppés dans des mensonges. Staline avec sa haine féroce du vrai socialisme ressemble aujourd'hui à Hitler et à Mussolini. Pour sauver son pouvoir, Staline détruit le pays et en fait une proie facile pour le fascisme bestial des Allemands. Le prolétariat de notre pays, qui a rejeté le pouvoir des tsars et celui des capitalistes, sera encore capable de renverser un dictateur fasciste et sa clique. Longue vie au 1^{er} mai, le jour du combat pour le socialisme.» Ce document était signé par le Parti des travailleurs antifascistes.

À ma connaissance, ce manifeste est une des trois seules dénonciations explicites écrites durant la Grande Terreur par un citoyen soviétique. La deuxième est une lettre ouverte publiée en 1939 par un diplomate soviétique qui se réfugia à Paris et qui est mort, peu de temps après, dans des circonstances mystérieuses. La troisième était signée de Vladimir Vernadsky, le directeur de l'Institut du radium. Écrire et surtout

essayer de diffuser un écrit contre Staline nécessitait un courage, voire une témérité, sans borne. Pourquoi le KGB n'a-t-il pas réagi immédiatement ?

UN FILS DE LA RÉVOLUTION

Landau est né le 22 janvier 1908 à Bakou, en Azerbaïdjan. Son père, ingénieur dans une industrie pétrolière locale, et sa mère, médecin, étaient juifs. Il n'a que neuf ans au moment de la Révolution d'octobre, en 1917. À 14 ans, il entre à l'Université de Bakou et, deux ans plus tard, à celle de Leningrad. Après avoir obtenu ses diplômes, il continue ses études à l'Institut technique de physique de Leningrad, le berceau de la physique soviétique.

En 1929, il obtient l'autorisation de travailler pendant un an dans l'équipe

de Niels Bohr, à Copenhague, puis à Cambridge, où il rencontre Piotr Kapitsa ; pour répondre à une question qu'il lui avait posée, Landau élabore sa théorie sur le diamagnétisme des électrons dans un métal, sa première publication scientifique importante.

En 1932, il va à Kharkov pour diriger le département théorique de l'Institut technique de physique d'Ukraine. Il commence ses études sur les transitions de phase du deuxième ordre, où une substance passe d'une configuration ordonnée à une configuration désordonnée sans absorber de chaleur. En outre, il étudie le ferromagnétisme, responsable de l'aimantation.

Professeur enthousiaste, Landau commence aussi à écrire, avec un de ses étudiants, Evgenni Lifshitz, les neuf volumes du *Cours de physique théorique*, bien connu des étudiants. Son

institut acquiert bientôt une réputation internationale en physique théorique.

Hendrik Casimir, un physicien qui rencontre Landau à Copenhague, s'en souvient comme d'un communiste convaincu très fier de ses racines révolutionnaires. L'enthousiasme avec lequel il construit la science soviétique fait partie de son idéal socialiste. En 1935, il publie une pièce intitulée *Bourgeoisie et physique contemporaine* dans le quotidien *Isvestia*. Il y attaque la classe bourgeoise, en la taxant de superstition religieuse et en y dénonçant le pouvoir de l'argent. Il vante les « opportunités sans précédent de développement de la physique en URSS, offertes par le Parti et par le gouvernement ».

Malgré sa foi dans le système soviétique, il est attaqué par plusieurs écrivains soviétiques. En 1934, un nouveau



1. SUR CETTE PHOTOGRAPHIE DE 1934, Landau est au premier plan à gauche. Il est, avec ses collègues, sur les marches de l'Institut de physique de Kharkov, en Ukraine.



2. LES «COMPLICES» de Landau, Moissey Koretz (à gauche) et Yuri Rumer (ci-dessous) ont été arrêtés la même nuit que Landau. Koretz a passé 20 ans dans un goulag ; Rumer a été relâché, puis arrêté à nouveau pour espionnage. Piotr Kapitsa (à droite) a sauvé Landau en déclarant qu'il serait le seul à pouvoir expliquer une grande découverte : la superfluidité.



directeur est nommé à la tête de l'Institut de Kharkov ; il a pour mission de réorienter les recherches vers des applications appliquées et militaires. Landau se bat pour que la recherche fondamentale subsiste. Il propose que l'Institut soit divisé en deux et qu'un des départements continue à être celui de la physique théorique. Koretz prend la défense de Landau, tout comme Pyatigorsky, qui ignore que toute opposition aux directives officielles est considérée comme un sabotage de l'entreprise militaire soviétique. Koretz est arrêté en novembre 1935.

Landau tente de défendre son ami en s'adressant aux instances du KGB, en Ukraine. Contre toute attente, Koretz est libéré «faute de preuves». Toutefois, une note dans son dossier indique que l'on doit surveiller «celui dont la culpabilité n'avait pas été prouvée», mais qui reste un «membre d'une organisation contre-révolutionnaire de sabotage dirigée par Landau». En 1937, le KGB arrête plusieurs physiciens allemands qui travaillaient à Kharkov et plusieurs scientifiques. Avant d'être fusillés, deux amis de Landau, Lev Shoubnikov et Lev Rozenkevitch «confessent» que Landau dirigeait une organisation contre-révolutionnaire. Landau en conclut qu'il doit quitter Kharkov. À Moscou, Kapitsa lui propose un poste à la direction du département théorique de l'Institut de physique. Il y arrive en février 1937, suivi par Koretz (Rumer y travaillait déjà). Un an plus tard, le 29 avril 1938, Landau et ses deux amis sont arrêtés, une semaine avant le 1^{er} mai, date à laquelle le tract devait être distribué.

Les étudiants et les collègues de Landau qui ont protesté sont réprimandés pour avoir soutenu le physicien. Il est ensuite établi que Rumer

n'a rien à voir avec le tract, et l'accusation est levée. En revanche, comme il est aussi accusé d'espionnage au profit de l'Allemagne, il est condamné à dix ans d'emprisonnement dans un «institut-prison» scientifique.

EN PRISON

Landau est conduit à la prison Lubyanka. D'après une note griffonnée en hâte, sans doute par un officier du KGB, enregistrée dans son dossier, Landau doit rester debout sept heures par jour et on le menace de le transférer dans la prison de Lefortovo, encore plus terrible. Au bout de deux mois, il finit par rédiger une confession de six pages, le document le plus éloquent de son dossier. Quand il quitte la prison, il signe (comme tous les prisonniers) un pacte du secret, où il s'engage à ne pas parler de cette période ultérieurement, pacte qu'il respectera.

On peut lire dans sa confession : «Au début de 1937, nous avons pris conscience que le Parti avait trahi et que le gouvernement soviétique n'agissait plus pour l'intérêt des travailleurs, mais dans l'intérêt d'un petit groupe ; les intérêts du pays exigeaient le renversement du gouvernement en place et la création d'un État qui privilégierait les kolkhozes et qui posséderait les industries, mais qui serait fondé sur les principes de la démocratie-bourgeoise.»

Bien que ces confessions aient été faites sous la contrainte, je pense qu'elles sont vraies. Landau détestait écrire ; la plupart de ses documents ont été écrits par des collègues, et ses «confessions» sont le plus long manuscrit que l'on ait de lui.

Koretz passa 20 ans dans un Goulag et retourna à Moscou en 1958, où je l'ai rencontré quelques fois avant qu'il ne meure d'un cancer en 1984. Il aimait la science et travailla dans une revue de vulgarisation scientifique. Il me raconta plusieurs anecdotes sur Landau, mais ne me parla jamais de son arrestation. Koretz ne fut jamais réhabilité. Peut-être parce que, contrairement à la plupart des victimes de la Terreur, il avait été arrêté pour quelque raison valable.

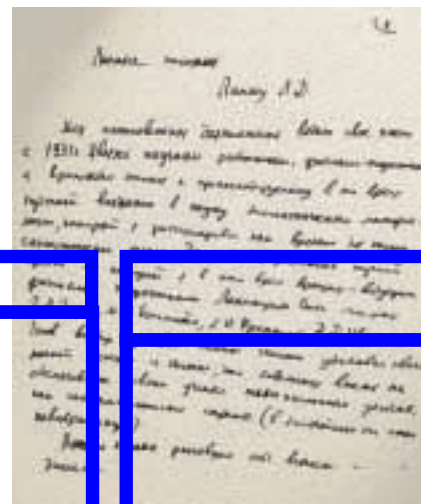
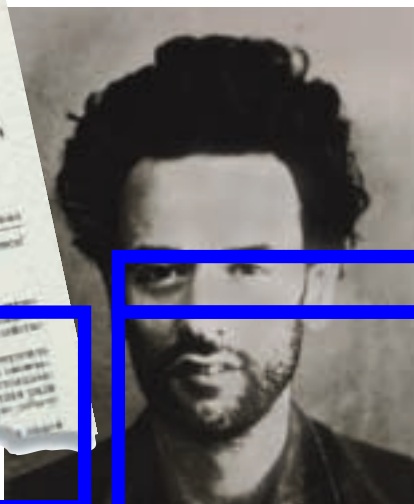
LA BOMBE H

Kapitsa a sauvé Landau. Ayant inventé une nouvelle méthode de production de l'oxygène, essentiel pour la métallurgie, et donc pour l'industrie, Kapitsa a d'excellentes relations avec le gouvernement. Il est aussi particulièrement habile avec les autorités (il écrivit plus de 100 lettres au Kremlin en matière de politique des sciences ou pour intervenir en faveur de physiciens).

En 1933, le chef du KGB «disparaît» et est remplacé par Lavrenti Beria. Après deux ans de carnage, Staline a éliminé tous ses rivaux, réels ou imaginaires. Kapitsa en profite pour écrire au premier ministre Vyacheslav Molotov, lui disant qu'il avait fait une découverte dans «le champ le plus étonnant de la physique moderne», et que seul Landau était capable de l'expliquer.

Au soir du 1^{er} mai 1939, après une année de prison, Landau est libéré sous caution. En quelques mois, il explique à Kapitsa la superfluidité en utilisant sa théorie des transitions de phase du deuxième ordre : l'hélium subit une transition du deuxième ordre, passant de son état normal à un état superfluide par l'intermédiaire d'un roton, une excitation confirmée depuis, mais dont la

3. LANDAU A ÉTÉ ARRÊTÉ à cause d'un pamphlet qu'il avait rédigé avec Koretz. La version dactylographiée (à gauche) a été publiée par le KGB en 1991. Au bout de deux mois d'emprisonnement, Landau a rédigé une «confession» (à droite) où il avouait ses désillusions politiques. En 1991, le KGB fournit une photographie de Landau en prison (au centre) au journal *Piroda*, qui refusa de la publier, la jugeant trop sinistre.



nature reste encore mystérieuse. Il introduit également un paramètre d'ordre, une sorte de fonction d'onde à grande échelle, qui décrit le comportement des atomes dans leur état quantique fondamental. Pour ce travail, Landau et Kapitsa recevront le prix Nobel.

Quelques années après la libération de Landau, Staline lance le projet d'une bombe atomique soviétique. Le projet s'accélère après Hiroshima. L'institut de Kapitsa est réquisitionné, et Staline nomme Beria comme officier responsable du projet. Kapitsa n'est pas un pacifiste, mais ne supporte pas de travailler sous les ordres d'un gendarme-chef. Il écrit à Staline que Beria n'est pas l'homme qu'il faut pour superviser le projet.

Initiative risquée. Le général Andreï Khroulev, un ami de Kapitsa, lui rapporte une conversation qu'il a entendue entre Beria et Staline. Beria veut la tête de Kapitsa, mais Staline lui répond que s'il pouvait démettre Kapitsa de toutes ses fonctions, il ne pouvait le faire disparaître en raison de sa réputation internationale : il était notamment membre de la *British Royal Society*.

Kapitsa échappe à la mort, mais est astreint à résidence jusqu'à la mort de Staline. Simultanément, Landau est engagé pour participer à l'élaboration de la bombe. Avec ses collègues, il calcule les équations de la dynamique de la bombe thermonucléaire. Une partie de ces calculs seront publiés en 1958, lors du premier «dégel nucléaire». Dans un des articles publiés sur ces recherches, il utilise de nombreux concepts novateurs tels que la supraconduction,

la physique des particules élémentaires et les lois de symétrie.

Pour sa contribution à la bombe atomique et à la bombe à hydrogène, il reçoit deux «prix Staline», en 1949 et en 1953. En 1954, on lui décerne le titre de Héros du travail socialiste. En 1957, il demande au Parti l'autorisation d'émigrer. Le KGB fournit alors des transcriptions de conversations de Landau avec ses amis, enregistrées entre 1947 et 1951. Landau s'y décrit comme un scientifique-esclave. Étant donné son antistalinisme des années 1930, ce n'est pas très étonnant. Ces documents témoignent aussi d'une profonde désillusion vis-à-vis du socialisme. Il vitupère, par exemple : «Je sais depuis 1937 que notre régime est un régime fasciste. Tant que ce régime existera, on ne peut espérer une évolution favorable... Sans fascisme, il n'y aurait pas de guerre... Lénine fut le premier fasciste.»

Tous ses collègues de Landau étaient soviétiques, notamment Igor Tamm, le premier prix Nobel soviétique de physique, et Andreï Sakharov, le premier prix Nobel soviétique de la paix. Même ceux qui reconnurent finalement les mérites de Staline continuèrent à considérer Lénine comme un héros.

À ma connaissance, seuls deux physiciens exprimèrent leur dégoût de travailler sur le projet de bombe de Staline : Landau et Mikhail Leontovich qui, en 1951, devint le directeur de la recherche théorique du programme fusion. Le travail que Landau mena sur la bombe lui servit de bouclier contre les autorités soviétiques. Il chercha à limiter sa participation et, un jour, injuria le physicien Yakov Zeldovich qui voulait au contraire lui donner davan-

tage de responsabilités. À la mort de Staline, Landau abandonna sa collaboration au projet.

Une question reste ouverte : étant donné que Landau disait ne pas vouloir travailler sur la bombe, pourquoi sa contribution a-t-elle été si importante ? Selon moi, les élèves qui devinrent le directeur de l'Institut Landau de physique théorique créé en 1965, Landau était incapable de faire du mauvais travail. Ainsi, Landau avait compris la nature du régime soviétique et avait été assez courageux pour exprimer sa pensée. Sa position était d'autant plus périlleuse qu'il savait parfaitement entre quelles mains il mettrait la bombe quand elle serait prête.

En 1962, Landau eut un accident de voiture. Il survécut, mais avec de graves lésions cérébrales, qui changèrent sa personnalité et le privèrent de son génie scientifique. Il mourut le 1^{er} avril 1968.

Après avoir étudié pendant deux semaines les archives du KGB, j'abandonnai mes lectures, bouleversé par tant de vies brisées. Après la chute de l'Union soviétique en 1991, le KGB fut restructuré et, à ma connaissance, aucun historique n'a été publié des archives depuis cette restructuration.

Gennady GORELIK est chercheur au Centre de philosophie et d'histoire des sciences de l'Université de Boston.

D. HOLLOWAY, *Staline and the Bomb : The Soviet Union and Atomic Energy, 1939-1956*, Yale University Press, 1994.

G. GORELIK, *Meine Antisowjetische Tätigkeit... : Russische Physiker unter Staline*, Vieweg, Braunschweig, 1995.

Bridge ou échecs?

CHRISTIAN WALTER

La bourse est-elle un jeu à information parfaite, comme les échecs : la dernière valeur d'une action contient-elle toute l'information nécessaire?

Les échecs sont un jeu à information parfaite : toute l'information nécessaire à la prise de décision est condensée dans la dernière position des pièces sur l'échiquier. Un joueur d'échecs peut entrer dans le jeu à tout instant. Au bridge, la situation est différente : il est nécessaire de connaître les annonces et la totalité des données passées pour « bien » jouer. Le bridge n'est pas un jeu à information parfaite.

Sur les marchés boursiers, au moment de prendre une décision d'achat ou de vente, l'investisseur est dans la situation du joueur qui entre dans le jeu. Mais de quel jeu s'agit-il? Bridge ou échecs? Si le marché est comparable au jeu d'échecs, il est inutile d'examiner les cours passés pour prendre une bonne décision. Le prix du jour du baril de pétrole est de 17,70 dollars : dans un marché jeu d'échecs, ce prix reflète l'état économique du marché du pétrole.

La tonne de cuivre est cotée à 2 333 dollars. Dans un marché-jeu de bridge, cette information n'est pas suffisante. Il faut aussi savoir qu'elle a baissé de 131,5 dollars par rapport à la veille et, plus généralement, combien cotait le cuivre avant ce jour. « Le marché a beaucoup monté : n'est-il pas trop tard pour acheter? » s'interroge l'investisseur. Consi-

dérer le passé avant de prendre une décision, c'est assimiler le marché au jeu de bridge.

Ce sont les informations nouvelles qui font varier les prix. L'économiste autrichien Friedrich von Hayek estimait que « Nous devons regarder le système de prix comme un mécanisme pour communiquer l'information si nous voulons comprendre sa fonction réelle. Par une sorte de symbole, seulement l'information la plus essentielle est transmise ».

Entre l'information et prix, il y a ainsi plus qu'une relation de cause à effet : le prix reflète l'information et constitue l'information. Mais l'information est-elle bien assimilée par le prix? La livre sterling s'échange à 16,618 francs français. La parité de change traduit-elle les différences de pouvoir d'achat? Le CAC 40 progresse de 0,71 pour cent en un jour : cette hausse est-elle fondée?

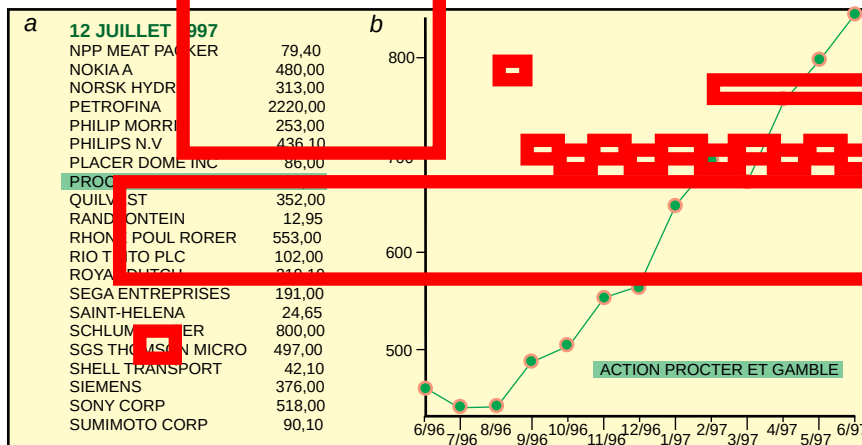
Selon la théorie économique, lorsque le prix agrège la totalité de l'information disponible et pertinente, le marché est efficient : les acheteurs et les vendeurs peuvent prendre de bonnes décisions sur la base de l'observation du prix du jour. Le marché efficient correspond au marché-jeu d'échecs. C'est un marché sans mémoire.

Dans un marché efficient, comment varient les cours? Imaginons une source d'informations qui diffuse de manière permanente des nouvelles, bonnes ou mauvaises, sur l'économie. Les opérateurs de salle de marché devant leurs écrans Reuter intègrent à tout instant les informations économiques nouvelles. Ce flux d'informations nouvelles est quasi continu : il ne se passe pas une minute sans affichage d'une nouvelle ligne d'information sur l'écran. Les opérateurs de salle de marché sont bombardés par de l'information nouvelle (nombre de mises en chantier, taux de chômage, balance des paiements, résultats des entreprises, ceci en France et dans le monde entier...). Les petites nouvelles successives sont des particules élémentaires d'information économique, et le marché est percuté en permanence par des chocs d'information.

Certains chocs ont plus d'effet que d'autres. Par exemple, des rachats importants de fonds de pension étrangers à la bourse de Paris, un ouragan qui dévastait la récolte potentielle... L'environnement est considéré comme imprévisible : comment prévoir l'avenir d'une entreprise, les évolutions sociales d'une branche professionnelle, le temps qu'il fera dans un mois? L'opérateur de marché voit surgir l'information nouvelle sans pouvoir la prévoir. Cette information détermine donc les fluctuations des prix avec une modélisation probabiliste de type « marche au hasard » : à l'imprévisibilité des nouvelles économiques correspond l'imprévisibilité des variations des cours. Si les cours d'un marché efficient contiennent tout le connu, les variations ultérieures relèvent de l'imprévisible.

Comment savoir si le marché est efficient? En testant la réaction du marché à l'annonce d'une nouvelle économique. Les cours s'ajustent-ils adéquatement et rapidement à cette information nouvelle? Pour le déterminer on effectue des tests statistiques sur les séries boursières. Quel est le résultat? Les marchés sont-ils efficient? Malgré un nombre considérable d'études, la réponse n'est pas claire. Il est admis que les grands marchés mondiaux sont à peu près efficient : les bourses de Paris, Londres, New-York, Tokyo, etc. Pourtant, beaucoup d'opérateurs continuent d'analyser le passé des marchés avant de prendre des décisions d'achat ou de vente.

Les marchés sont-ils plutôt comparables au jeu de bridge ou au jeu d'échecs? Et si les joueurs changeaient eux-mêmes le jeu en y entrant?



L'évolution temporelle d'un marché informationnellement efficient est comparable au déroulement d'une partie d'échecs : toute l'information est contenue dans la dernière valeur du cours (a). Si le marché n'est pas informationnellement efficient, il faut tenir compte, comme au bridge, de l'évolution passée de la valeur de l'action (b).

Lentilles amollies

HERVÉ THIS

Les vertus du bicarbonate de sodium.

Faut-il encore démontrer que la chimie est utile en cuisine ? Et que son utilisation ne viole pas des traditions gastronomiques dont les Français sont si fiers ? Commençons par l'examen d'une pièce ancienne, tirée du *Cuisinier parisien*, un ouvrage anonyme publié en 1838 : «Les haricots, les pois et les lentilles et beaucoup d'autres légumes ne cuisent bien que dans l'eau très pure et très légère ; celle des rivières et des ruissaux est toujours la meilleure ; celle des puits ne vaut rien. Dans les endroits où il n'y a que de l'eau de puits, on peut la rendre propre à cuire les légumes en y versant un peu de carbonate de soude, dissous dans l'eau jusqu'à ce qu'il ne la fasse plus blanchir. Il se fait un petit dépôt ; on prend le clair et on s'en sert pour cuire les légumes».

En quoi la qualité de l'eau déterminerait-elle la tendreté des légumes ? Et de quel usage seraient le carbonate de soude ou la cendre de bois, également préconisés par le même auteur ?

La cendre et le bicarbonate ont comme point commun de rendre l'eau basique. Pour savoir si cette alcalinisation agit sur les légumes, commençons par cuire des lentilles dans trois casseroles identiques, sur trois feux identiques : dans la première casserole, le milieu de cuisson sera l'eau distillée ; dans la deuxième nous utiliserons de l'eau rendue basique par du bicarbonate de sodium ; et dans la troisième, nous utiliserons, au contraire, de l'eau rendue acide par un peu de vinaigre.

Aucun instrument de laboratoire n'est nécessaire pour mesurer la différence d'amollissement entre les trois échantillons tant elle est nette : quand les lentilles à l'eau pure sont juste cuites, celles qui ont cuit dans de l'eau acidifiée sont encore dures comme des cailloux, tandis que les lentilles cuites dans l'eau rendue basique par le bicarbonate de sodium se délitent. Ainsi l'acidité du milieu de cuisson détermine l'amollissement des légumes.

Par quel effet ? Les végétaux sont composés de cellules jointes par une lamelle pariétale, composée de pectine et de cellulose. Pour atténuer le tissu végétal, on doit donc modifier le ciment pectique. En milieu acide, les molécules de pectine sont neutralisées : leurs

groupes carboxylate $-COO^-$ captent les atomes d'hydrogène, de sorte que les groupes résultant $-COOH$ sont électriquement neutres. Les molécules de pectine n'exercent pas de répulsion électrique les unes sur les autres : elles restent associées, et les lentilles restent dures. En revanche, le bicarbonate de sodium provoque l'ionisation des groupes acide carboxylique $-COOH$ en $-COO^-$ de sorte que les répulsions électrostatiques entre molécules de pectine favorisent leur séparation et la dégradation des parois végétales ; les lentilles sont amollies.

LA DURETÉ DE L'EAU

La modification d'acidité de l'eau est-elle le seul effet dû au bicarbonate de sodium ? Le *Cuisinier parisien* suggère indirectement les effets de la dureté de l'eau, liée à la présence d'ions calcium. Pour tester les effets de ces ions, utilisons à nouveau deux casseroles identiques, sur deux feux identiques, avec des lentilles ; versons de l'eau distillée dans la première casserole, et de l'eau rendue artificiellement dure par l'ajout de carbonate de calcium, dans l'autre



Pour préparer un plat qui vaut aussi cher qu'un droit d'aînesse (ici Jacob devant son père, Isaac, avec le plat de lentilles qu'il échangea à Esau contre son droit d'aînesse), il faut savoir cuire les lentilles : dans l'eau pure, entre 80 et 90 °C.

casser. Quand les lentilles de l'eau pure sont cuites, après 45 minutes, les lentilles de l'eau calcaire étaient encore dures comme du bois. Cette fois, l'effet est dû aux ions calcium, qui, avec leur deux charges positives, peuvent se lier à deux des molécules d'acide phytique (du cytoplasme) ou de pectine, renforçant la cohésion moléculaire, au lieu de l'affaiblir. Avec les ions monovalents tel le sodium, de telles liaisons ne s'établissent pas.

Ces phénomènes intéressent l'industrie agro-alimentaire et, notamment, les producteurs de lentilles, qui voudraient faciliter l'utilisation de leurs produits. Ne pourrait-on trouver un moyen de précuire les lentilles ? À la Station INRA de Montfavet, Patrick Varoquaux, Pierre Offret et Françoise Varoquaux ont étudié cette question, cherchant les conditions optimales pour obtenir un amollissement des graines, sans libération de l'amidon qu'elles contiennent ni dissociation du tégument qui libérerait des débris cellulaires. Une cuisson à la vapeur serait un bon moyen pour atteindre ce but, mais la durée de cuisson serait excessive.

Cuisant des lentilles à différentes températures, pendant des temps différents, et mesurant la fermeté des graines, les chercheurs de Montfavet ont d'abord observé que la fermeté diminuait avec la durée de cuisson, en raison inverse de la température. Une telle observation est de bon sens, mais la quantification des résultats est instructive : les courbes montrant la fermeté des graines en fonction du temps, pour chaque température, présentent un coude, qui révèle que l'amollissement résulte de deux phénomènes. Le premier, rapide, est très probablement la diffusion de l'eau vers l'intérieur des lentilles ; le second, plus lent, semble être la gélicification de l'amidon dans l'eau chaude (formation d'un empis).

D'autre part, le pourcentage de lentilles brisées augmente exponentiellement en fonction du temps de cuisson quand la température est supérieure à 80 °C. La température optimale pour l'intégrité des lentilles que sur leur fermeté : la perte d'intégrité est plus importante que l'amollissement pour les températures de cuisson supérieures à 86 °C. D'où la règle culinaire dégagée de ces études fondamentales : il faut cuire les lentilles à température inférieure à 90 °C... mais cela prend du temps.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 28 août 1997, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt

Amplification sismique

La géologie explique la concentration des dégâts du séisme de Kobe.

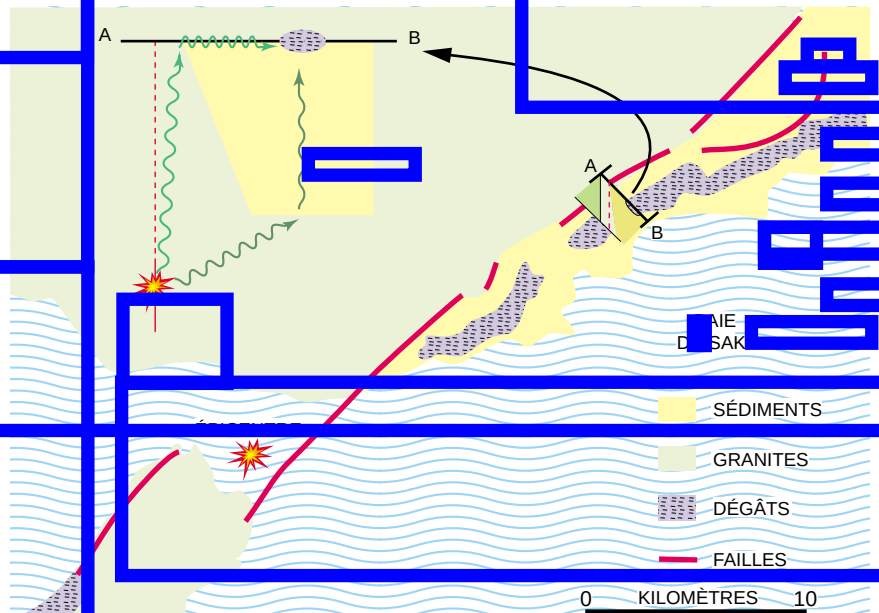
Le 16 janvier 1995, un séisme de magnitude 7,2 a frappé la ville de Kobe, au Japon, l'une des plus grandes catastrophes de ces dernières années : plus de 5 000 morts et 500 milliards de francs de dégâts. L'ampleur de ces pertes humaines et matérielles tient à la conjonction malheureuse de deux phénomènes sismologiques : une rupture survenue sous la ville et une amplification locale des mouvements du sol.

La localisation du sinistre est étonnante. Pourquoi la majorité des destructions sont-elles concentrées dans une zone large d'un kilomètre et longue d'une cinquantaine de kilomètres, au milieu de la ville ? Les constructions et la densité de la population dans cette bande sont similaires à celles que l'on trouve ailleurs. En outre, alors qu'au Sud de l'épicentre les deux lèvres de la faille de Nojima se sont déplacées en surface de plus d'un mètre l'une par rapport à l'autre, aucune rupture de surface n'est visible dans la bande de dégâts. Plus étonnant encore, cette bande s'allonge parallèlement aux failles actives connues, à un kilomètre au Sud.

En analysant les enregistrements de 19 stations sismologiques situées dans un rayon de 50 kilomètres autour de la faille, nous avons reconstitué le glissement des failles en tout point. Sous la ville de Kobe, les deux lèvres de la faille ont glissé d'un mètre l'une par rapport à l'autre, à une profondeur de dix kilomètres. Même s'il n'a pas laissé de rupture visible en surface, le séisme a donc relâché une part importante de son énergie juste sous la ville.

Les failles de cette rupture profonde s'est produite sont parallèles à la bordure du bassin sédimentaire où Kobe est construite. Les modifications réalisées après le séisme par plusieurs équipes ont mis en évidence une amplification locale des ondes sismiques due à la géologie de cette bordure de bassin. Cette amplification explique la répartition spatiale des destructions.

Les ondes de choc produites en profondeur par le séisme se propagent dans toutes les directions. D'un côté, elles mon-



Les destructions provoquées par le séisme de Kobe au Japon, en janvier 1995, sont concentrées dans une bande d'un kilomètre de large, dans le bassin sédimentaire, entre la côte et les failles actives. Les ondes sismiques provenant de la rupture de la faille, à dix kilomètres de profondeur, se propagent à des vitesses différentes selon qu'elles se déplacent dans les roches granitiques qui bordent le bassin sédimentaire (flèches vert clair sur la coupe A-B) ou dans le bassin lui-même (flèches vert foncé) : leurs interférences constructives amplifient les vibrations du sol et accroissent les dégâts sur une bande étroite.

tent rapidement à la verticale de la faille, à l'extérieur du bassin, dans des roches granitiques. Puis, arrivées en surface, ces ondes se propagent horizontalement vers l'intérieur du bassin. Une autre partie des ondes se propagent verticalement à l'intérieur du bassin, dans les roches sédimentaires à vitesse plus faible. Lorsque les ondes

se rencontrent, elles interfèrent et leurs amplitudes s'ajoutent : les mouvements du sol sont deux fois plus importants dans une bande étroite, parallèle aux failles et au bord du bassin, là où les dégâts les plus notables se sont produits.

Fabrice COTTON, IPSN,
Michel CAMPILLO,
Université Grenoble 2

Le coureur de Marathon

Il serait mort à cause d'une trop forte élévation de la température de son cerveau.

Après la victoire des Athéniens sur l'armée des Perses, débarquée sur les côtes grecques en -490, le coureur de Marathon, envoyé par le général Miltiade, se hâta d'annoncer la bonne nouvelle à Athènes, éloignée de 42 kilomètres. Selon Lucien de Samosate, au II^e siècle de notre ère, il se nomme Philippidès,

mais pour Plutarque (I^{er} siècle), il porte le nom d'Euclys. Après avoir prononcé les mots « Réjouissez-vous, nous sommes vainqueurs », Philippidès-Euclys s'écroule et meurt.

Selon Hérodote, la bataille eut lieu pendant la saison chaude lorsque les marais de la plaine de Marathon étaient à sec. La victoire se déroula seulement vers le soir. Les Athéniens, nombreux en nombre avaient tous dû combattre, sans doute le coureur aussi, qui n'entreprit sa course qu'après la bataille. Ainsi, c'est vraisemblablement un homme déshydraté qui partit pour Athènes.

Est-ce la cause de sa mort? Une longue course entraîne un épuisement des réserves énergétiques, une déshydratation due à la sudation et une hyperthermie. D'après les observations des marathoniens d'aujourd'hui, l'épuisement des réserves énergétiques ne peut être mortelle : le coureur épuisé est contraint de s'arrêter, mais ne meurt pas.

Une déshydratation poussée aurait pu être fatale, mais elle se serait accompagnée de symptômes qui auraient interdit la poursuite de la course, notamment d'incoordination motrice et de désorientation. L'homme était certainement déshydraté, mais non au point d'en mourir. En revanche, la déshydratation aurait favorisé une hyperthermie. Normalement, l'eau qui traverse les pores de la peau et se trouve en contact avec l'air s'évapore ; ce passage de l'état liquide à l'état vapeur absorbe de la chaleur, laquelle est prélevée dans la peau. Ainsi, la sudation diminue la température corporelle. Chez le sujet déshydraté, tout se passe comme si les divers mécanismes de régulation concourent à préserver au maximum l'eau de l'organisme, notamment par inhibition de la sudation. Toutefois, la peau du crâne ne subit pas cette inhibition : le visage et le scalp sont des zones à forte capacité sudorale et, chez le sujet déshydraté, la sudation corporelle est inhibée, mais celle de la tête reste normale. Dans ces conditions, la température intracrânienne, mesurée sur le tympan, reste normale, inférieure à la température du tronc, enregistrée dans l'œsophage.

Le refroidissement du cerveau est particulièrement nécessaire pendant l'exercice musculaire prolongé. L'énorme quantité de chaleur libérée dans les muscles augmente la température corporelle profonde qui peut atteindre, voire dépasser, 42 °C. Ainsi, lors d'un exer-

cice prolongé, la température élevée du sang artériel menace le cerveau, voire la survie du sportif. L'hyperthermie prolongée entraîne un « coup de chaleur », caractérisé par des signes neurologiques tels que confusion et coma, des signes circulatoires liés à l'hypertension et des signes d'intoxication (dus à l'acidification du sang).

L'élévation de la température du cerveau est limitée quand la ventilation de la tête assure un refroidissement sélectif suffisant. Le mouvement crée un « courant d'air » artificiel qui favorise l'évaporation de la sueur et le refroidissement associé.

À l'arrêt de la course, la température œsophagienne s'effondre rapidement, mais la température intracrânienne continue à croître. La chaleur accumulée dans les muscles et dans le tronc diffuse, véhiculée par le sang artériel jusqu'au cerveau, où l'évacuation de la chaleur cesse dès que le sujet est immobile. L'élévation de la température intracrânienne peut atteindre 0,4 °C pendant plusieurs minutes. Quand une telle augmentation survient chez un sportif dont la température du tronc est déjà de 42 °C, la mort peut être foudroyante.

Ainsi le coureur aurait quitté Marathon hyperthermique et déshydraté. Le refroidissement du cerveau a été suffisant pour que le message s'envoie. De la chaleur s'est accumulée dans le tronc et dans les muscles, d'autant plus que la sudation avait cessé. Au moment où le coureur s'est arrêté, la température du cerveau a brusquement augmenté, au-delà des limites compatibles avec la vie. Philippides ne serait pas mort si les Athéniens lui avaient aspergé la tête.

M. CABANAC
et M.-Cl. BONNIOT-CABANAC,
Faculté de médecine, Université Laval

BRÈVES

L'ADN de Néandertal

L'homme fossile découvert en 1846 dans la vallée de Néander n'est pas l'un de nos ascendants. Deux équipes, allemande et américaine, ont réussi indépendamment à lire quelques éléments du code génétique de l'homme fossile. Les mitochondries, qui produisent de l'énergie, de l'humérus de cet homme de Néandertal. Les différences avec les séquences équivalentes de l'homme moderne indiquent que la lignée de Néandertal et la nôtre se seraient séparées il y a environ 600 000 ans.



Combien de Chinois?

Selon des démographes, la population chinoise, qui dépassait un milliard de personnes en 1995, serait sous-évaluée de environ 100 millions. Les familles dissimuleraient les naissances excédentaires par rapport aux contraintes du plan de limitation, mais aussi les premières naissances, lorsque les enfants sont des filles, afin de conserver le droit d'avoir au moins un garçon.

Vaccin désensibilisant

Comment peut-on prévenir les violentes réactions allergiques déclenchées par les piqûres d'abeille? Giampetro Corradin, à l'Université de Lausanne, a isolé la protéine d'origine allergénique. L'a découpé en peptides, qui ne sont plus des venins, mais que le système immunitaire reconnaît comme faisant partie de la protéine entière. En injectant de grandes quantités de ces peptides aux personnes sensibles, on habitue le système immunitaire à les tolérer et, par là même, à tolérer la protéine entière allergisante.

Vitres autonettoyantes

Une couche ultrarince d'oxyde de titane déposée sur une vitre brûle les salissures. L'oxyde de titane, sous l'action des rayons ultraviolets oxyde et élimine les composés organiques tels que les traces de doigts, la fumée de tabac ou les résidus de combustion des hydrocarbures. La couche organique est dégradée, puis éliminée. Le procédé, mis au point dans le laboratoire de Pierre Pichat, à l'ENS de Lyon est évalué par les sociétés Saint-Gobain et Rhône-Poulenc.

Suite page 22



Jean-Loup Charrier

Champignons de croissance

Des champignons qui vivent en symbiose avec des arbres favorisent la pousse de ceux-ci dans des terrains peu fertiles, en protégeant les racines ou en favorisant l'assimilation d'éléments nutritifs. Un groupe de chercheurs européens a étudié pour la reforestation en milieu méditerranéen. Dans le Languedoc, la présence d'un bolet sur les racines de pins pignons stimule la croissance initiale des arbres. Ces derniers atteignent vite une taille supérieure à celle des herbacées qui poussent naturellement, et leur entretien est facilité.

Maladie d'Alzheimer

On sait dépister aujourd'hui cette maladie chez les personnes âgées. Une équipe de chercheurs a étudié des patients atteints de la maladie d'Alzheimer une diminution de l'activité d'un enzyme, l'acétylcholine estérase, dans certaines zones du cortex cérébral. Cette diminution dénote la dégénérescence d'un système neuronal de communication, le système cholinergique central.

Enclos néolithique?

Clive Waddington de l'Université de Durham et ses collègues ont fouillé le site du henge de Coupland, dans le bassin de Milfield. Ce monument circulaire vieux de 6 000 ans.



être faudra-t-il reconsidérer la fonction de Stonehenge, sanctuaire présumé d'un culte solaire.

Arbres à puces

Pour gérer les espaces verts, on plante au cœur des arbres une puce électronique dont les 512 bits de mémoire stockeront 13 paramètres de l'arbre : sa taille, sa circonférence et la position de l'arbre. À l'aide d'un terminal portable, les agents en charge des espaces verts lisent ou mettent à jour ces informations sur les puces. Après la mise en place du système sur 13 500 arbres du département de Seine Saint-Denis, la Ville de Paris utilisera cette haute technologie pour gérer les 100 000 arbres parisiens.

Suite page 24

Superdéformation en apesanteur

Les oscillations de gouttes en microgravité.

Le capitaine Haddock avait bien du mal à rattraper sa boule de whisky dans la fusée lunaire, mais savait-elle que cette boule pouvait osciller? Lors d'un vol de la navette spatiale Columbia, Robert Apfel et ses collègues de l'Université Yale ont étudié la déformation d'une goutte d'eau en apesanteur.

L'étude de la déformation des gouttes d'eau remonte au XIX^e siècle avec John Rayleigh. En raison de leur simplicité apparente, les gouttes liquides ont été utilisées pour modéliser des objets complexes comme la Terre liquide et, aujourd'hui, elles servent à comprendre les noyaux atomiques très déformés ou les étoiles qui explosent.

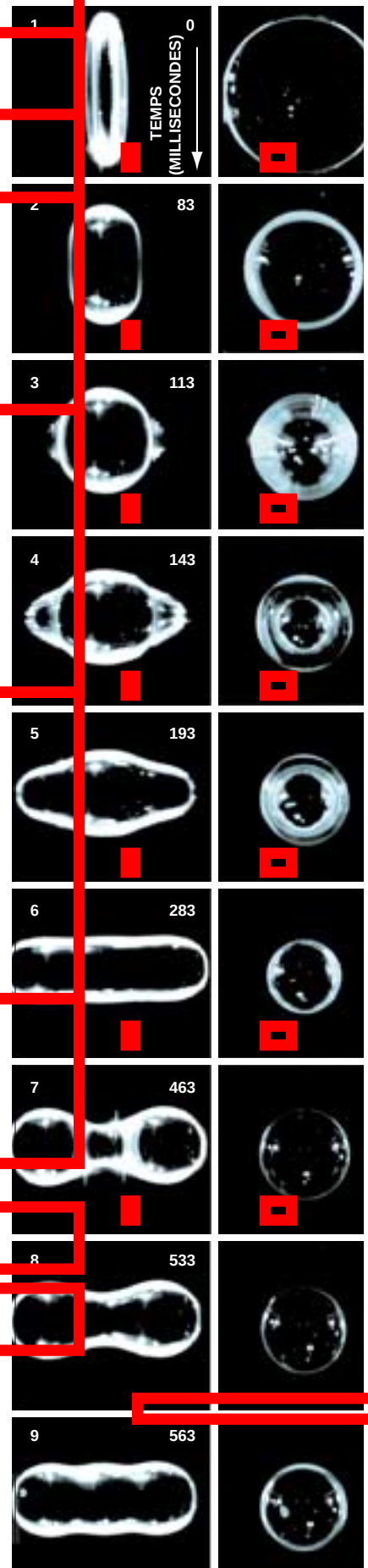
Les déformations de faible amplitude des gouttes liquides sont maintenant si bien comprises théoriquement que l'on prédit les conséquences de l'introduction d'une petite quantité de molécules tensioactives (qui donnent leur pouvoir détergent au savon) à une goutte d'eau pure. En revanche, les déformations de grandes amplitudes sont plus difficile à calculer et leur étude expérimentale nécessite une goutte en équilibre sphérique, dont l'obtention sur Terre est malaisée.

En apesanteur, l'équipage de Columbia a donc placé, dans un récipient rempli d'air à la pression atmosphérique, une goutte d'eau de la taille d'une balle de ping-pong. Celle-ci est d'abord aplatie par deux ondes sonores émises face à face (*photographie n°1*). Lorsque l'on supprime les ondes sonores, la goutte oscille librement durant 20 cycles. L'ajout de molécules tensioactives diminue la tension de surface du liquide et la goutte ne se brise pas lors des déformations extrêmes (comme sur la photographie n°1).

Ces déformations, impossibles à calculer analytiquement, sont comparées à un modèle numérique. En prenant en compte un champ acoustique externe et une tension de surface constante, les physiciens obtiennent des formes comparables à celles observées lors des expériences.

Une goutte d'eau de la taille d'une balle de ping-pong oscille librement en apesanteur. La colonne de droite représente la vue de côté.

On trouvera une animation de cette oscillation sur notre site Web à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>



R. Apfel

Un dinosaure normand relie les continents

Dryosaurus a traversé l'Europe pour passer d'Afrique en Amérique.

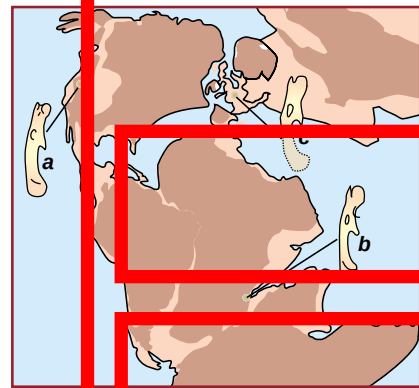
Depuis le XVIII^e siècle on connaît l'existence de reptiles fossiles dans les calcaires du Jurassique supérieur du Cap de la Hève, près du Havre ; le Muséum du Havre en possédait une grande collection – qui fut hélas détruite lors des bombardements de 1944. Les collections de fossiles du Cap de la Hève se reconstituent lentement, tant par les efforts du Muséum que par l'apport des paléontologues amateurs.

L'un d'entre eux, Emmanuel Cacheux, a découvert un petit fémur, peu spectaculaire mais d'un intérêt scientifique indéniable. Ce fémur a été trouvé dans les calcaires argileux du Kimmeridgien, étage du Jurassique supérieur daté de –146 à –141 millions d'années, qui constituent la base des imposantes falaises de la Hève. Ce fossile, dont son inventeur a fait don au Muséum du Havre, appartient à un petit dinosaure du groupe des ornithomypes, dont un des représentants les plus connus est sans doute *Iguanodon*, l'un des premiers dinosaures à avoir été décrits. Le fémur, par chance, est un os assez caractéristique chez les ornithomypes, et les caractères de ce fossile, notamment l'aspect des insertions musculaires sur l'os, permettent de l'attribuer au genre *Dryosaurus*. L'animal, beaucoup plus petit qu'*Iguanodon*, ne dépassait guère 2 à 3 mètres de longueur (l'animal adulte, sans doute un juvénile, était plus petit encore), et se déplaçait principalement en position bipède. Le fémur du Cap de la Hève est le premier reste

provenant d'un des principaux gisements du Jurassique supérieur exploités par ses assistants, Como Bluff, dans le Wyoming. En 1894, il nomme *Dryosaurus*, le « reptile des chênes », l'un de ces animaux. *Dryosaurus altus* devient alors la première espèce, Nord-américaine, du genre *Dryosaurus*.

Au début du XX^e siècle, bien loin du Wyoming, les paléontologues du Muséum d'histoire naturelle de Berlin fouillent sur une grande échelle les gisements de dinosaures du Jurassique supérieur du Tendaguru, dans ce qui est alors l'Afrique orientale allemande (aujourd'hui la Tanzanie). Les fouilles prennent fin en 1912, mais ce n'est qu'après la Première Guerre mondiale, une fois l'Afrique orientale perdue pour l'Allemagne (mais pas pour les Anglais, qui y firent aussi des fouilles dans les années 1920), que l'étude scientifique des innombrables fossiles recueillis commence vraiment. Le paléontologue Virchow, en 1919, signale un petit dinosaure ornithomype du Tendaguru sous le nom de *Dysalotosaurus lettowvorbecki*. L'espèce est dédiée, ce n'est pas un hasard, au général Paul von Lettow-Vorbeck, qui pendant la guerre a commandé les troupes allemandes en Afrique orientale, et n'a déposé les armes qu'au début de 1919, après la fin de la guerre en Europe. À son retour à Berlin, il est non seulement accueilli en héros, mais on lui dédie un dinosaure. Ce dinosaure Est-africain ne sera finalement décrit en détail qu'en 1955 par Werner Janensch, le chef des excursions allemandes au Tendaguru, après quelques péripéties, dont la moindre n'est pas le bombardement du Musée de Berlin pendant la Seconde Guerre mondiale.

En 1977, le paléontologue Peter Galton parvient à une conclusion surprenante, compte tenu de la grande distance qui sépare les sites du Wyoming de ceux de Tanzanie : il s'agit en fait d'un seul et même genre, qui doit prendre le nom de *Dryosaurus*, conformément aux règles de priorité de la



Le monde au Jurassique supérieur, il y a environ 145 millions d'années. *Dryosaurus* a été retrouvé dans l'Ouest américain (a), en Tanzanie (b) et depuis peu en Normandie (c). Il existait une voie de passage, l'Europe, entre l'Amérique du Nord et l'Afrique.

nomenclature zoologique. Au Kimmeridgien, il y a quelque 145 millions d'années, existait donc une espèce de *Dryosaurus*, *Dryosaurus altus*, en Amérique du Nord, et une autre, assez similaire *Dryosaurus lettowvorbecki*, en Afrique. Comment expliquer ces similarités entre deux régions du Globe aujourd'hui bien éloignées, et séparées l'une de l'autre par l'océan Atlantique ?

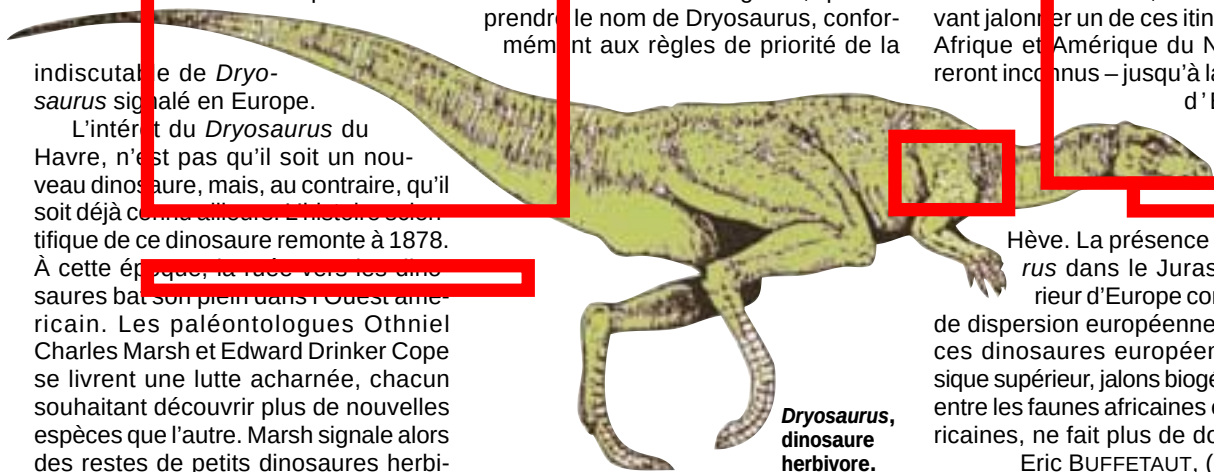
On sait qu'au Jurassique supérieur l'océan Atlantique commençait à s'ouvrir. L'Afrique et l'Amérique du Nord n'étaient déjà plus en contact direct, mais il devait y avoir des communications possibles entre ces deux continents via d'autres régions émergées. *Dryosaurus* n'est d'ailleurs pas le seul dinosaure à être connu à la fois dans l'Ouest américain et en Afrique orientale à cette époque : le énorme saurope *Brachiosaurus* présente la même répartition géographique. Galton envisage deux voies de passage possibles pour *Dryosaurus* entre l'Amérique du Nord et l'Afrique, qui n'obligent qu'à des traversées de bras de mer limitées : soit via l'Amérique du Sud, soit via l'Europe.

Pendant 20 ans, les fossiles pouvant jaloner un de ces itinéraires entre Afrique et Amérique du Nord demeureront inconnus – jusqu'à la découverte

d'Emmanuel Cacheux dans les

calcaires du Cap de la Hève. La présence de *Dryosaurus* dans le Jurassique supérieur d'Europe confirme la voie de dispersion européenne. L'intérêt de ces dinosaures européens du Jurassique supérieur, jalons biogéographiques entre les faunes africaines et Nord-américaines, ne fait plus de doute.

Eric BUFFETAUT, (CNRS, Paris)



Dryosaurus, dinosaure herbivore.

Nids daturs

Comment dater les œuvres rupestres gravées ou peintes avec des pigments minéraux? Les évaluations stylistiques sont imprécises et toujours relatives. Une équipe d'archéologues a évalué les âges de deux nids de guêpes fixés sur deux peintures murales de la région du Kimberley du Nord Australie. Les nids, depuis com-
 101
 102
 103
 104
 105
 106
 107
 108
 109
 110
 111
 112
 113
 114
 115
 116
 117
 118
 119
 120
 121
 122
 123
 124
 125
 126
 127
 128
 129
 130
 131
 132
 133
 134
 135
 136
 137
 138
 139
 140
 141
 142
 143
 144
 145
 146
 147
 148
 149
 150
 151
 152
 153
 154
 155
 156
 157
 158
 159
 160
 161
 162
 163
 164
 165
 166
 167
 168
 169
 170
 171
 172
 173
 174
 175
 176
 177
 178
 179
 180
 181
 182
 183
 184
 185
 186
 187
 188
 189
 190
 191
 192
 193
 194
 195
 196
 197
 198
 199
 200
 201
 202
 203
 204
 205
 206
 207
 208
 209
 210
 211
 212
 213
 214
 215
 216
 217
 218
 219
 220
 221
 222
 223
 224
 225
 226
 227
 228
 229
 230
 231
 232
 233
 234
 235
 236
 237
 238
 239
 240
 241
 242
 243
 244
 245
 246
 247
 248
 249
 250
 251
 252
 253
 254
 255
 256
 257
 258
 259
 260
 261
 262
 263
 264
 265
 266
 267
 268
 269
 270
 271
 272
 273
 274
 275
 276
 277
 278
 279
 280
 281
 282
 283
 284
 285
 286
 287
 288
 289
 290
 291
 292
 293
 294
 295
 296
 297
 298
 299
 300
 301
 302
 303
 304
 305
 306
 307
 308
 309
 310
 311
 312
 313
 314
 315
 316
 317
 318
 319
 320
 321
 322
 323
 324
 325
 326
 327
 328
 329
 330
 331
 332
 333
 334
 335
 336
 337
 338
 339
 340
 341
 342
 343
 344
 345
 346
 347
 348
 349
 350
 351
 352
 353
 354
 355
 356
 357
 358
 359
 360
 361
 362
 363
 364
 365
 366
 367
 368
 369
 370
 371
 372
 373
 374
 375
 376
 377
 378
 379
 380
 381
 382
 383
 384
 385
 386
 387
 388
 389
 390
 391
 392
 393
 394
 395
 396
 397
 398
 399
 400
 401
 402
 403
 404
 405
 406
 407
 408
 409
 410
 411
 412
 413
 414
 415
 416
 417
 418
 419
 420
 421
 422
 423
 424
 425
 426
 427
 428
 429
 430
 431
 432
 433
 434
 435
 436
 437
 438
 439
 440
 441
 442
 443
 444
 445
 446
 447
 448
 449
 450
 451
 452
 453
 454
 455
 456
 457
 458
 459
 460
 461
 462
 463
 464
 465
 466
 467
 468
 469
 470
 471
 472
 473
 474
 475
 476
 477
 478
 479
 480
 481
 482
 483
 484
 485
 486
 487
 488
 489
 490
 491
 492
 493
 494
 495
 496
 497
 498
 499
 500
 501
 502
 503
 504
 505
 506
 507
 508
 509
 510
 511
 512
 513
 514
 515
 516
 517
 518
 519
 520
 521
 522
 523
 524
 525
 526
 527
 528
 529
 530
 531
 532
 533
 534
 535
 536
 537
 538
 539
 540
 541
 542
 543
 544
 545
 546
 547
 548
 549
 550
 551
 552
 553
 554
 555
 556
 557
 558
 559
 560
 561
 562
 563
 564
 565
 566
 567
 568
 569
 570
 571
 572
 573
 574
 575
 576
 577
 578
 579
 580
 581
 582
 583
 584
 585
 586
 587
 588
 589
 590
 591
 592
 593
 594
 595
 596
 597
 598
 599
 600
 601
 602
 603
 604
 605
 606
 607
 608
 609
 610
 611
 612
 613
 614
 615
 616
 617
 618
 619
 620
 621
 622
 623
 624
 625
 626
 627
 628
 629
 630
 631
 632
 633
 634
 635
 636
 637
 638
 639
 640
 641
 642
 643
 644
 645
 646
 647
 648
 649
 650
 651
 652
 653
 654
 655
 656
 657
 658
 659
 660
 661
 662
 663
 664
 665
 666
 667
 668
 669
 670
 671
 672
 673
 674
 675
 676
 677
 678
 679
 680
 681
 682
 683
 684
 685
 686
 687
 688
 689
 690
 691
 692
 693
 694
 695
 696
 697
 698
 699
 700
 701
 702
 703
 704
 705
 706
 707
 708
 709
 710
 711
 712
 713
 714
 715
 716
 717
 718
 719
 720
 721
 722
 723
 724
 725
 726
 727
 728
 729
 730
 731
 732
 733
 734
 735
 736
 737
 738
 739
 740
 741
 742
 743
 744
 745
 746
 747
 748
 749
 750
 751
 752
 753
 754
 755
 756
 757
 758
 759
 760
 761
 762
 763
 764
 765
 766
 767
 768
 769
 770
 771
 772
 773
 774
 775
 776
 777
 778
 779
 780
 781
 782
 783
 784
 785
 786
 787
 788
 789
 790
 791
 792
 793
 794
 795
 796
 797
 798
 799
 800
 801
 802
 803
 804
 805
 806
 807
 808
 809
 810
 811
 812
 813
 814
 815
 816
 817
 818
 819
 820
 821
 822
 823
 824
 825
 826
 827
 828
 829
 830
 831
 832
 833
 834
 835
 836
 837
 838
 839
 840
 841
 842
 843
 844
 845
 846
 847
 848
 849
 850
 851
 852
 853
 854
 855
 856
 857
 858
 859
 860
 861
 862
 863
 864
 865
 866
 867
 868
 869
 870
 871
 872
 873
 874
 875
 876
 877
 878
 879
 880
 881
 882
 883
 884
 885
 886
 887
 888
 889
 890
 891
 892
 893
 894
 895
 896
 897
 898
 899
 900
 901
 902
 903
 904
 905
 906
 907
 908
 909
 910
 911
 912
 913
 914
 915
 916
 917
 918
 919
 920
 921
 922
 923
 924
 925
 926
 927
 928
 929
 930
 931
 932
 933
 934
 935
 936
 937
 938
 939
 940
 941
 942
 943
 944
 945
 946
 947
 948
 949
 950
 951
 952
 953
 954
 955
 956
 957
 958
 959
 960
 961
 962
 963
 964
 965
 966
 967
 968
 969
 970
 971
 972
 973
 974
 975
 976
 977
 978
 979
 980
 981
 982
 983
 984
 985
 986
 987
 988
 989
 990
 991
 992
 993
 994
 995
 996
 997
 998
 999
 1000

Anti-rhume social

Faites-vous des relations : vous éviterez les rhumes. Selon une équipe de l'Université Caen, les personnes qui ont le plus de relations sociales sont le mieux protégées des virus du rhume et le disséminent moins. La diversité des types de relations (familiales, amicales, professionnelles...) est plus déterminante que le nombre de personnes rencontrées. D'autres études avaient déjà montré qu'un réseau de relations étendu et diversifié augmente l'espérance de vie.

Colle à la peau

Les agrafes utilisées en chirurgie légère seront bientôt périmées. Un essai clinique a montré que l'octyl-cyanoacrylate était une colle de choix pour les tissus animaux. Les chairs ainsi raboutées s'infectent moins facilement et leur aspect est grandement amélioré. La colle est éliminée par la cicatrisation.

Un cofacteur du VIH

Le VIH a besoin d'auxiliaires pour pénétrer dans les cellules qu'il infecte. Il y a quelques mois, on a découvert une des serrures nécessaires, un récepteur des chémokines. Marc Alizon, à l'Institut Cochin et Michel Seman à l'Université Paris 7, en ont identifié une autre : une protéine synthétisée par le cytomégalovirus, que l'on soupçonne depuis longtemps d'être un cofacteur du VIH. Cette protéine, nommée US28, favoriserait l'infection des cellules où le VIH ne parvient normalement pas à pénétrer. Toutefois ces résultats ont été obtenus sur des cultures de cellules et on ignore si cette protéine joue le même rôle *in vivo*.

La composition de la Terre

La Terre s'est formée par accretion de météorites particulières.

Tous les géophysiciens admettent aujourd'hui que la Terre s'est formée par agrégation de petits corps célestes, les planétoïdes. Les planétoïdes qui sont restés libres sont les météorites dont certaines frappent la Terre. Pour connaître la nature de la Terre initiale, les météorites sont donc des matériaux de choix. En se fondant sur des similitudes de composition isotopique, Marc Javoy et François Guyodo de l'Institut de physique du Globe de Paris et de l'Université Paris 7 ont montré que la Terre se serait formée à partir de météorites particulières, les chondrites à enstatite. Dans ce modèle, du silicium aurait été incorporé en grande quantité dans le noyau de la Terre durant sa formation. Les expériences de physique des hautes pressions corroborent cette hypothèse.

Dans la recherche des météorites ressemblant à la Terre, les géophysiciens sont gênés par la transformation de cette dernière en un noyau, un manteau et une croûte : la Terre, au contraire des météorites, est une planète dont la composition superficielle diffère de la composition moyenne. Pourtant, certaines propriétés sont conservées lors des phénomènes de différenciation, notamment la répartition des isotopes de l'oxygène. D'où un moyen d'identification.

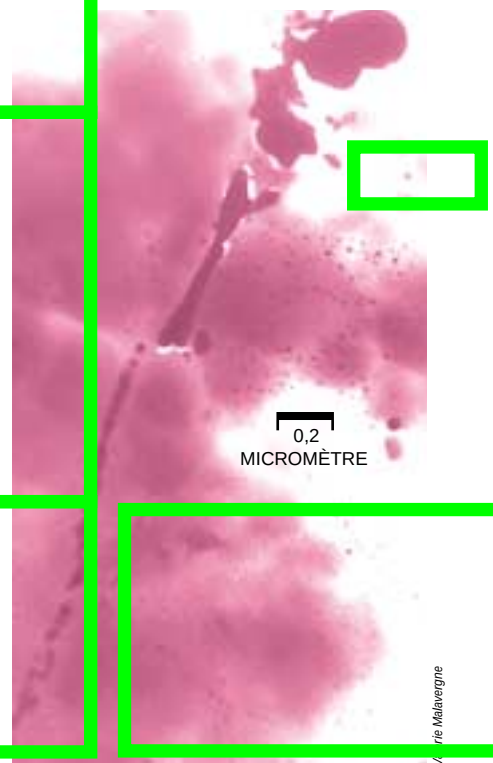
Quelles sont les météorites dont la composition isotopique de l'oxygène est proche de celle du manteau terrestre? Uniquement les chondrites à enstatite, mélanges d'alliage de fer et de nickel, de pyroxène enstatite (un silicate de magnésium), de sulfures et de silice. Ces météorites ont une composition isotopique de l'oxygène qui est, à 0,1 pour cent près, celle des roches du manteau terrestre et de la Lune. L'oxygène représentant la moitié des atomes constituant la Terre, la parenté semble indiscutable.

Toutefois, les chondrites à enstatite ont une composition chimique très différente de celle du manteau supérieur, l'enveloppe « visible » de la Terre : il faudrait donc que la composition des enveloppes cachées (manteau inférieur, noyau) soit distincte des estimations classiques. Le manteau inférieur devrait être plus riche en silicium et en fer, plus

pauvre en calcium que le manteau supérieur. De surcroît, le noyau devrait contenir plus de silicium que dans les modèles classiques. Comment cette ségrégation a-t-elle pu s'effectuer?

En mesurant le volume d'un alliage fer-silicium sous haute pression et à haute température, les chercheurs ont montré que la compression d'un mélange de silicates et de fer dissout le silicium dans le fer. Cette réaction chimique est maximale à une pression de 15 milliards de pascals (150 000 atmosphères), pression atteinte à 450 kilomètres de profondeur dans la Terre. Toutefois, au-dessus de 24 milliards de pascals (240 000 atmosphères), les silicates adoptent une structure différente, ce qui stabilise le silicium sous forme de silicate et inverse le transfert.

Lors de la formation de la Terre, la pression augmenta avec le rayon de matière accrétée. Dans les régions où la pression était proche de 15 milliards de pascals, du silicium, mais aussi du soufre et de l'oxygène, s'incorporèrent au métal en train de migrer vers le centre. Durant cette migration, le métal a été soumis à de très haute pres-



La composition chimique des météorites qui ont formé la Terre est différente de celle du noyau terrestre, différence résultant de la ségrégation. En particulier, le noyau terrestre s'est enrichi en silicium, ce que confirment les analyses de la veine métallique (sombre), observée par microscopie électronique en transmission, d'échantillons de silicate et de métal, traités à haute pression et à haute température.

sion et une partie du silicium est alors retournée dans les silicates. Cependant, au total, le métal s'est enrichi en silicium : alors qu'il comprenait jusqu'à 17 pour cent de silicium à la naissance d'incorporation maximale, il en contient encore neuf pour cent lorsqu'il est au

centre, dans le noyau. Ce modèle de formation rend inutile des scénarios de formation de la Terre où plusieurs types de matériaux auraient été successivement accrétés : la proto-Terre reçoit toujours le même matériau primitif et la différenciation des enveloppes

se fait au cours de la formation, par des réactions chimiques qui évoluent en fonction de la pression et de la température. Cependant, vers la fin de l'accrétion, des comètes ont dû tomber pour expliquer la formation de l'atmosphère et des océans.

Protéger les plages

L'ensablement est plus efficace que les enrochements.

L'érosion des plages menace les activités touristiques associées au littoral. Des deux remèdes couramment employés, la mise en place d'enrochements et l'alimentation artificielle en sédiments, le second, peu pratiqué en France, est pourtant le plus efficace.

Dans notre pays, les enrochements placés sur le haut des plages, parallèlement au rivage, ont toujours la faveur des services techniques de l'État et des collectivités locales. Ils protègent les aménagements de bord de mer, mais ils accélèrent l'érosion : d'abord, ils isolent les plages de la réserve de sable, les dunes qui les bordent ; ensuite ils renforcent le pouvoir érosif des vagues, qui déferlent sur un obstacle au lieu de perdre progressivement leur énergie sur le plan incliné de la plage. À Oahu, une des îles Hawaï, la plage de Mokuleia est large de seulement 13 mètres là où elle est bordée d'enrochements, contre 27 mètres là où elle ne l'est pas.

Les enrochements dénaturent les rivages, mais surtout ils ne remédient pas à la cause fondamentale de l'érosion des plages, une carence en sédiments. L'alimentation artificielle en sédiments, au contraire, corrige cette carence. Elle maintient des plages larges qui, tout en conservant leur aspect de nature, mettent les aménagements de bord de mer hors de l'atteinte des vagues et peuvent accueillir des activités balnéaires. Aux États-Unis, depuis le début des années 1960, plus de 650 kilomètres linéaires de plage, surtout sur le littoral atlantique, ont été ainsi rechargés. Aux Pays-Bas, où le gouvernement a décidé le maintien de la ligne de côte sur la position qu'elle occupait en 1990, l'alimentation artificielle en sédiments est la seule méthode utilisée : on y déplace cinq à sept millions de mètres cubes de sable par an.

On extrait le plus souvent les sédiments de gisements sous-marins proches de la plage à reconstituer : leur nature, en particulier leur granulométrie, a toute chance d'être similaire à celle des sédi-

ments déjà en place. Le transport est aussi simplifié : on peut aspirer le sable par une drague flottante et le refouler sur les plages par une conduite immergée. Les prélèvements doivent être faits à des profondeurs suffisantes, en général à plus de 20 mètres, pour que les granulats ne participent pas aux mouvements sédimentaires littoraux.

Quelle est la longévité des rechargements ainsi opérés ? Sur la côte orientale des États-Unis, la moitié du volume de matériaux apportés sur la partie émergée de la plage a disparu en moins d'un an dans 20 pour cent des cas, en un à cinq ans dans 62 pour cent des cas et en

plus de dix ans dans 12 pour cent des cas. Ces durées dépendent des caractéristiques des sédiments utilisés, de la longueur du rivage aménagé, de la période de l'année pendant laquelle l'opération est effectuée.

Les plages de fond de baie, bien délimitées par des promontoires rocheux qui réduisent les fuites latérales des sédiments, se prêtent bien à des rechargements de longue durée. Ainsi, la plage de Cannes, alimentée artificiellement en sable dans les années 1960, a nécessité ensuite peu d'entretien. Inversement, la longue côte d'Aquitaine, fortement érodée, frappée par de grosses houles du Nord-Ouest qui emportent une dérive littorale puissante vers le Sud, convient mal à des rechargements.

Le coût de l'alimentation artificielle des plages en sédiments est souvent mis en avant par ceux qui lui préfèrent les enrochements. À Châte-

laillon, en Charente-Maritime, le mètre linéaire traité est revenu à environ 16 700 francs, tandis que le prix moyen d'un enrochement est de 5 000 à 7 000 francs pour la même longueur. Ce calcul est tempéré par la plus grande valeur touristique d'une large plage et d'un aspect naturel, attractive pour le public. De plus, si les coûts de réalimentation sont importants, n'y faut-il pas les analyser en valeur relative ? Aux Pays-Bas, le coût annuel de l'entretien d'un kilomètre de plage rechargée est inférieur à celui de la maintenance d'un kilomètre d'autoroute.

Roland PASKOFF,
Université Lumière, Lyon



La plage de Châtelailon, en Charente-Maritime, a été reconstituée par l'apport de 300 000 mètres cubes de sable entre 1989 et 1991. La construction de digues et d'épis entreprise dès la fin du XIX^e siècle n'avait pas empêché son érosion. Les courants littoraux ont partiellement déplacé vers le Sud (en bas) le sable apporté sur la zone centrale.

Éditions Pierron - S. Aguermines

Gyromètre superfluide

Un anneau d'hélium superfluide pour mesurer la vitesse de rotation de la Terre.

En 1851, Léon Foucault montra la rotation de la Terre à l'aide de son célèbre pendule, aujourd'hui visible sous la coupole du Panthéon. L'année suivante, cette étude l'amena à inventer le gyroscope. Une coupole sur un ensemble de cadres mobiles. Pendule et gyroscope de Foucault permettent tous deux de mesurer des rotations, ce sont des gyromètres. L'étude des propriétés de l'hélium superfluide a débouché sur un gyromètre d'un nouveau genre : nous avons mesuré la vitesse de rotation de la Terre en mesurant la vitesse de déplacement de l'hélium superfluide continu dans un anneau.

Lorsque la température est supérieure à 2,17 kelvins (-271°C), l'hélium 4 liquide est, comme l'eau, un liquide visqueux ordinaire. Au-dessous de cette température, son comportement change : tous les atomes sont dans le même état quantique et ne subissent donc aucune dissipation de frottement. De plus, la circulation de la vitesse, qui est la vitesse du fluide multipliée par la longueur du chemin parcouru, est quantifiée : elle est égale à un multiple (n) du quotient de la constante de Planck par la masse d'un atome d'hélium. Peut-on utiliser cette propriété quantique, donc microscopique, pour mesurer un effet macroscopique ?

Considérons un anneau rempli d'hélium superfluide. La vitesse de rotation de l'hélium dans cet anneau ne peut prendre que des valeurs précises correspondant aux valeurs entières de n . Dans l'état $n = 0$, par exemple, l'hélium est immobile, et il le reste indéfiniment, indépendamment des rotations du récipient. Alors que le récipient est entraîné par la rotation de la Terre, l'hélium à l'intérieur reste immobile par rapport aux étoiles et se déplace donc par rapport aux parois du récipient. La valeur de cette vitesse de déplacement relative est une mesure de la vitesse absolue de rotation de la Terre dans l'espace. Tel est le principe du gyromètre superfluide.

Tout le problème consiste à mesurer la vitesse de l'hélium dans l'anneau, car elle est extrêmement faible (quelques micromètres par seconde). Pour contourner ce problème, on augmente d'abord localement la vitesse en plaçant dans la boucle un goulet d'étranglement. Avec un orifice micrométrique, on multiplie la vitesse par un million, car la vitesse est inversement proportionnelle à la sec-

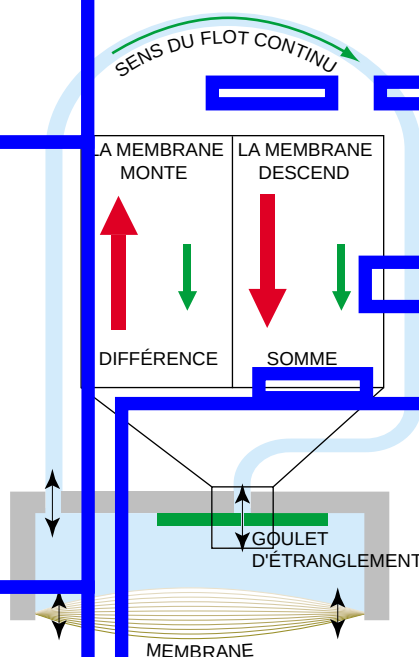
tion de passage. Un écoulement superfluide sans dissipation subsiste qu'au-dessous d'une vitesse critique, laquelle, pour un petit orifice, est de l'ordre de quelques mètres par seconde. Lorsque cette vitesse est dépassée, il se crée un tourbillon au passage de l'orifice, qui détruit localement la superfluidité. La dis-

sipation qui en résulte ralentit brusquement l'écoulement, qui change d'état quantique.

À l'aide d'une pompe à membrane, on superpose au flot continu produit par la rotation de la Terre un flot alternatif dont on augmente progressivement l'amplitude. Dès que la vitesse dépasse la vitesse critique, l'écoulement ralentit et l'amplitude d'oscillation de la membrane diminue brutalement. En notant l'amplitude critique à laquelle cette brusque diminution se produit, on mesure la vitesse critique dans le goulet d'étranglement. Comment la vitesse critique est-elle liée à la vitesse de rotation de la Terre ?

Lorsque la membrane se déplace alternativement dans un sens et dans l'autre, elle produit un écoulement qui tantôt s'ajoute, tantôt se retranche à l'écoulement continu dû à la rotation de la Terre. On mesure ainsi la vitesse critique pour les deux sens de passage du flot (membrane vers le haut et membrane vers le bas). En soustrayant ces vitesses critiques, on réduit la vitesse du flot continu et donc celle de la rotation de la Terre.

À l'issue de notre expérience, nous avons mesuré la vitesse de rotation de la Terre avec une précision absolue de l'ordre de 0,5 pour cent et la direction du Nord géographique à 0,5 degré près. Une équipe américaine vient de mettre au point un appareil similaire dans lequel une différence de conception ne permet pas les mesures absolues, à l'inverse de notre appareil. La sensibilité de ces prototypes sera grandement améliorée. Reste à savoir s'ils pourront rivaliser avec d'autres gyromètres comme les gyro-lasers ou les interféromètres atomiques. Olivier AVENEL et Éric VAROQUAUX, SPEC, Saclay



Pour mesurer la vitesse d'un flot continu d'hélium superfluide, on lui superpose un flot alternatif à l'aide d'une membrane oscillante. Lorsque la membrane monte, la vitesse du fluide dans le goulet d'étranglement est la différence de la vitesse alternative (en rouge) et de la vitesse du flot continu (en vert). Lorsque la membrane descend, ces deux vitesses s'ajoutent. En mesurant la différence de vitesse critique dans les deux cas, on élimine la vitesse de rotation de la Terre.

Hibernation active

Le manchot économise l'énergie en abaissant la température de certains organes.

Le manchot royal est un plongeur remarquable. Il pêche jusqu'à 300 mètres de profondeur et reste immergé jusqu'à sept minutes et demie. En outre, il enchaîne les plongées pendant plusieurs heures, en les espaçant de deux minutes en moyenne. À titre de comparaison, l'homme atteint péniblement 100 mètres de profondeur et ne résiste pas à plus de quatre minutes d'apnée. La supériorité du manchot réside dans sa gestion de l'énergie : les organes inutiles pendant la

plongée sont refroidis à des températures exceptionnellement basses pour un animal à sang chaud.

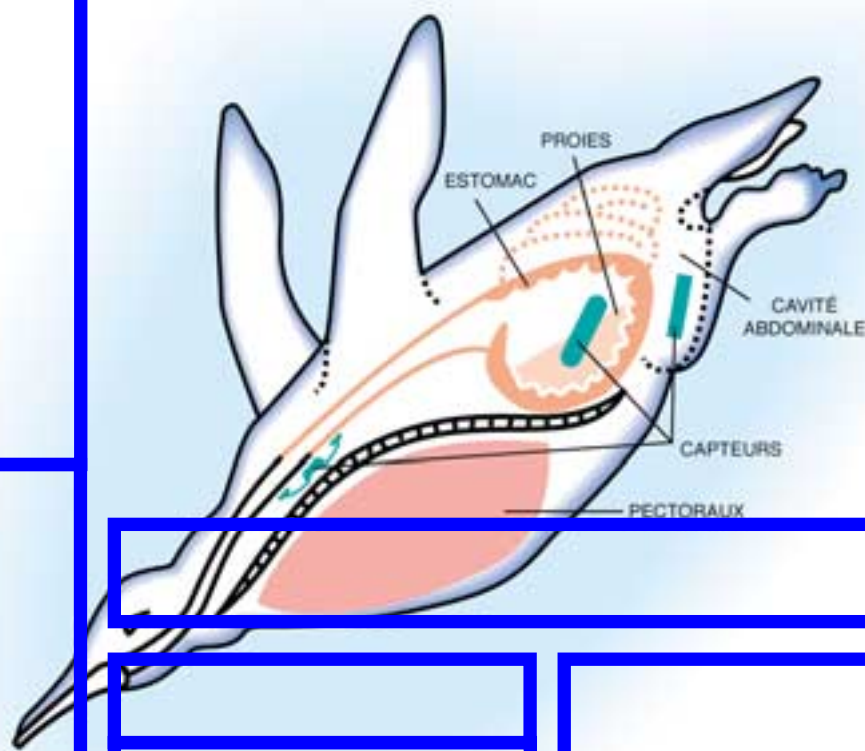
Selon les observations du métabolisme de animaux captifs, le manchot royal devrait épuiser ses réserves d'oxygène en deux minutes d'apnée. Comme chez tous les animaux plongeurs, un réflexe réoriente la circulation sanguine, donc l'apport d'oxygène, vers les tissus vitaux, qui doivent fonctionner à plein rendement pendant la plongée : les muscles propulseurs, le cerveau, le cœur. Les autres tissus, moins vasculaires, sont plus ou moins privés d'oxygène. Fonctionnent-ils en mode anaérobie ? L'acide lactique produit devrait ensuite être éliminé par un apport important d'oxygène : le temps de récupération indispensable entre deux plongées serait

beaucoup plus long que celui que nous observons. Un ralentissement du métabolisme semblait la seule possibilité, sachant néanmoins que le manchot nage à neuf kilomètres à l'heure.

Afin de résoudre ce paradoxe, nous avons étudié les flux caloriques des manchots pendant qu'ils pêchent, à l'aide d'enregistreurs de température et de profondeur implantés en plusieurs endroits du corps. Le jour, la température de la cavité abdominale diminue de plus de 15 degrés. Ce refroidissement s'établit progressivement, plongée après plongée ; il est d'autant plus important que les plongées sont profondes. La nuit, le manchot nage au voisinage de la surface, et l'abdomen revient à la température normale de 38 °C. La température diminue à l'intérieur de l'estomac, à chaque ingestion de proies (la température de l'eau est voisine de 3 °C), mais elle reste supérieure de plusieurs degrés à celle de la cavité abdominale : l'hypothermie de cette dernière est donc bien liée à la plongée elle-même.

Les muscles propulseurs du manchot sont les pectoraux, placés à l'avant, et aucune fonction essentielle n'est assurée dans la partie postérieure du corps pendant la plongée, excepté la digestion. La forte baisse de température observée dans l'abdomen indique une « mise en sommeil » de cette partie du corps : des mécanismes cellulaires réduisent la dépense énergétique, donc la production de chaleur.

Ainsi les organes actifs sont correctement oxygénés, tandis que les organes inactifs sont placés en vie ralentie et produisant peu d'acide lactique.



Lorsque le manchot royal plonge pour pêcher, la température de sa cavité abdominale baisse d'une quinzaine de degrés : il économise ainsi l'oxygène. Son estomac se refroidit par l'ingestion de proies, mais, comparativement, il reste plus chaud grâce à la digestion. Les muscles propulseurs, actifs pendant la nage, sont aussi plus chauds.

Yvan Robert-Coudert/CP

Il n'y a donc pas de dette importante en oxygène, et la récupération est rapide après la plongée.

Les manchots royaux pêchent par campagnes d'une dizaine de jours. Lors du voyage de retour vers la colonie, où les parents les attendent, ils accumulent des proies dans leur estomac, sans

les digérer : ils les régurgiteront presque intactes. Les températures de l'abdomen et de l'estomac descendent alors au-dessous de 15 °C : toute la zone peut entrer en vie ralentie, économisant encore les ressources de l'animal.

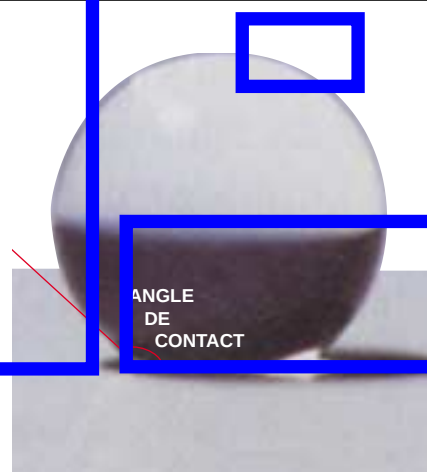
Yves HANDRICH, CEPE, CNRS, Strasbourg

Repoussantes surfaces

Les chimistes créent des surfaces que ne mouillent ni l'eau ni l'huile.

Une surface que mouille l'eau se tache : les matières colorantes dissoutes dans l'eau s'y déposent. Aussi les industriels ont-ils au point des surfaces que l'eau ne mouille pas : les nappes traitées sont parmi les innovations qui ont facilité la vie quotidienne. Toutefois ces surfaces qui évitent le Charybde de l'eau tombent généralement dans le Scylla de la matière grasse, contre laquelle on a peu lutté : des matières plastiques qui ne sont pas mouillées par l'eau le sont par l'huile. Des chimistes japonais ont résolu le problème.

Leur idée de base est limpide : un matériau qui est peu mouillé par un liquide l'est encore moins quand sa surface est rugueuse. Pourquoi ? Imaginons un matériau qui ne soit pas mouillé par un liquide, c'est-à-dire un couple surface-liquide tel qu'il faille apporter de l'énergie pour établir un contact. Si une goutte de ce liquide est déposée sur une surface plane, elle reste sphérique, ne mouillant la surface qu'en un disque de diamètre inférieur au sien (l'énergie de contact est apportée par la pesanteur de la goutte). Imaginons maintenant que la surface soit rugueuse. Si la goutte formait le même disque de contact, la surface de contact réelle (en tenant compte de toutes les anfractuosités) serait bien supérieure à la surface de contact précédente, ce qui correspondrait à une énergie supérieure ; par conséquent,



Argemondie Chénier

Une goutte d'huile de colza posée sur une surface rugueuse et recouverte de groupes trifluorométhyle reste sphérique, avec un angle de contact de 150 degrés ; elle roule quand on incline la surface, sans coller à cette dernière.

comme l'énergie n'est pas changée par rapport à la situation précédente, l'aire du disque de contact est inférieure ; autrement dit, le même matériau apparaît moins mouillable quand sa surface est rugueuse.

Kaoru Tsuji et ses collègues de la Société Kyo, à Tokyo, ont utilisé cette idée pour faire des surfaces qui repoussent l'huile et donc moins susceptibles d'être tachées. Afin d'obtenir des surfaces pour lesquelles les huiles ont un

angle de contact supérieur à 90 degrés, les chimistes japonais ont utilisé le groupe trifluorométhyle, composé d'un atome de carbone lié à trois atomes de fluor : greffé à une surface, il constitue un bon repoussoir d'huile. Ils ont cherché une surface suffisamment rugueuse afin de la traiter par des composés fluorés, et de la recouvrir ainsi avec le groupe trifluorométhyle.

La surface retenue a été celle d'une plaque d'aluminium rendue rugueuse par

anodisation (la plaque était placée dans une solution conductrice, et un courant électrique appliqué entre la plaque et une électrode baignant dans la solution, provoquait la dissolution superficielle de l'aluminium). La surface obtenue, avant fluorage, était très mouillable, mais elle a été transformée en une surface repoussant très bien l'huile par une simple immersion dans de l'alcool où l'on avait dissout des molécules qui contiennent le groupe fluoré.

Extinctions et territoires

Les populations marginales résisteront mieux aux extinctions.

L'homme, colonisant la planète, réduit la surface des espaces naturels et les fragmente. Ce faisant, il hâte la disparition de nombreuses espèces animales. Les partisans de la conservation de la nature prônent souvent la constitution en réserves des foyers d'origine des espèces menacées : les populations périphériques seraient, de toute façon, plus fragiles, plus difficiles à préserver. L'étude des zones de répartition de 31 espèces de mammifères menacées contredit cette affirmation : la grande majorité des espèces subsistent à la périphérie de leur aire de répartition et non au centre.

Selon le modèle couramment admis, une population est moins menacée sur un territoire d'un seul tenant que sur plusieurs petits territoires de même surface totale. Sur chacun de ceux-ci, la population moins nombreuse, est plus exposée aux extinctions, et des zones périphériques ne restent peuplées que grâce à la recolonisation régulière par des individus issus de la région centrale. Lorsque l'aire de répartition d'une espèce se restreint, c'est donc en commençant par la périphérie.

Une bonne illustration est la régression du Petit-Duc scops (*Otus scops*) en Suisse. Depuis 1950, le nombre d'individus a diminué fortement et cet oiseau ne subsiste aujourd'hui que dans la vallée supérieure du Rhône. On ne dénombrait en 1988 que 17 couples environ, contre plusieurs centaines d'individus dans les années 1950 ; sur les six populations distinctes encore présentes en 1982, seule la population centrale existait encore en 1988. Les causes de ce déclin sont connues : le doublement

des surfaces consacrées à la vigne et au défrichage des prairies et des forêts habitées par le Petit-Duc, a repoussé le seuil au-dessus de 840 mètres d'altitude, limite supérieure des vignes. Comme ce rapace ne peut survivre au-dessus de 1 400 mètres et qu'il s'accommode mal des pentes raides, son territoire est aujourd'hui restreint à une bande étroite.

M. Bonolino et R. Channell, de l'Université de l'Oklahoma, ont comparé les répartitions actuelles et passées de 31 espèces de mammifères considérées comme menacées. Ils observent le même phénomène pour le Rhinocéros d'Inde, le Rhinocéros indien et l'Opossum de Leadbeater (un marsupial australien) : les populations reliques vivent près de leurs centres historiques de répartition. Règle générale ? Non. Ces répartitions sont exceptionnelles : la plupart des autres espèces ne subsistent qu'à la périphérie de leur ancien territoire. Ainsi, le vison d'Europe (*Mustela lutreola*), que l'on rencontrait autrefois dans les zones humides européennes, de la Russie à l'Atlantique, ne réside plus que dans des régions marginales, dans l'Ouest de la France et, peut-être, en Roumanie. Trois causes principales ont entraîné sa raréfaction : la pollution et l'assèchement des zones humides et des rivières, le piégeage (pour sa fourrure) et la concurrence du vison d'Amérique, qui a envahi l'Europe après que quelques individus se sont échappés d'élevages.

Toute stratégie de conservation de la biodiversité doit donc tenir compte des populations périphériques, voire isolées, les espèces menacées résistent mieux sur les îles que sur les continents. Séparées assez longtemps de la zone centrale, des populations pourraient acquérir des caractères leur permettant de se maintenir alors qu'elles comptent peu d'individus.

Marc AUGÉ,
Laboratoire de paléontologie des
vertébrés, Université Paris 6



Dider Lippmann/Jacana

Le vison d'Europe, autrefois présent sur tout le continent, est aujourd'hui restreint aux marges de son ancien territoire : l'Ouest de la France et la Roumanie. La majorité des espèces de mammifères menacées ne subsisteraient ainsi qu'à la périphérie de leur aire de répartition originelle.

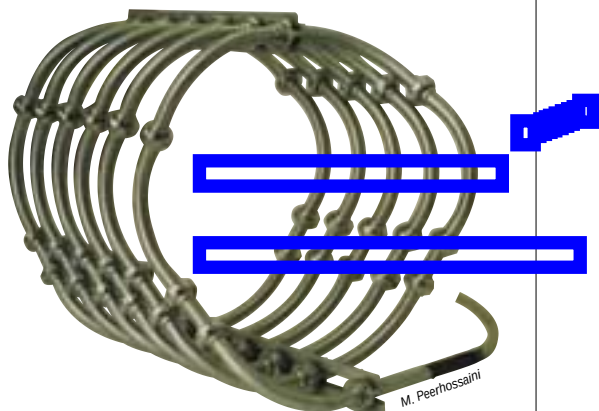
Mélange sans fatigue

Des tubes coudés pour un mélange efficace.

Comment mélanger sans se fatiguer ? La question intéresse le maçon qui s'épuise à gâcher le ciment, le cuisinier qui monte une mayonnaise, le producteur de matière plastique qui réunit les réactifs, le fabricant de cosmétiques qui chauffe des molécules fragiles... À l'Université de Nantes, H. Peerhossaini, Y. Leguer et C. Castelain construisent des conduits tordus qui mélangent rapidement deux fluides.

Plusieurs écoulements réalisent de tels mélanges, mais les physiciens nantais en ont étudié un très simple : celui qui s'effectue spontanément quand un fluide s'écoule dans un tube composé d'éléments à trois coudes à 90 degrés. Dans un tel tube, l'écoulement reste laminaire s'il n'est pas trop rapide, mais les propriétés dispersantes sont analogues à celle d'un écoulement turbulent.

À l'aide de lasers qui provoquent la fluorescence de particules dispersées dans le fluide, les physiciens ont montré que tous les signes du mélange cherché étaient présents dans leurs tubes. De plus, il permet de bons transferts de chaleur des parois vers tout le fluide qui y circule : dans les tubes nantais, ce transfert est supérieur de 28 pour cent à celui qui est obtenu dans un tube hélicoïdal ; un nombre plus grand de molécules du fluide vient au contact des parois. Ce gain intéresse les biologistes, qui doivent souvent chauffer des molécules sans les dégrader ; or les écoulements turbulents classiques, avec leurs forts cisaillements internes, détruisent les molécules fragiles. Le mélange par écoulement laminaire ne présente pas cet inconvénient.



Dispositif de mélange de fluides.

L'Iran construit-il des armes nucléaires?

DAVID SCHWARZBACH

Riche en pétrole et en gaz naturel, l'Iran mène un programme nucléaire que justifie mal la seule production d'électricité.

En 1990, le gouvernement iranien annonce qu'il a signé des contrats d'un montant de 4,5 milliards de francs avec le ministère russe de l'Énergie atomique, afin de construire une centrale nucléaire près de la ville de Bushehr, sur le golfe Persique. Aussitôt les services secrets occidentaux se mettent à l'œuvre. Le secrétaire d'État américain Warren Christopher fait campagne pour éviter que les Russes n'aident ainsi l'Iran à constituer un arsenal nucléaire. Il n'a pas gain de cause, mais le projet a peu progressé au cours des 30 derniers mois, et de nombreux experts pensent que le programme iranien est supérieur aux prévisions initiales.

Le projet de Bushehr est déconcertant : pourquoi l'Iran, qui a d'énormes réserves de gaz naturel et d'autres combustibles fossiles, investit-il plusieurs milliards de francs dans une centrale nucléaire qui produira de l'électricité à un coût supérieur à celui d'une centrale thermique?

Naturellement la centrale de Bushehr pallierait la grave pénurie d'électricité qui gêne le développement du pays, et sa construction s'accompagnerait de la formation d'ingénieurs capables de faire fonctionner des réacteurs nucléaires (civils, producteurs d'électricité, mais aussi militaires, producteurs de plutonium). À plus court terme, le projet de Bushehr offrirait une excellente couverture pour des activités de contre-espionnage : le ministère russe de l'Énergie atomique enverra jusqu'à 3 000 techniciens et 7 000 tonnes d'équipements pour la réalisation du projet, créant ainsi un trafic suffisamment intense pour couvrir des transferts clandestins d'équipements, de matériels et de compétences.

Le projet de Bushehr a toutefois l'avantage (faible) qu'il permettra de tester les mesures de lutte contre la prolifération nucléaire qui seront bientôt mises en œuvre par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) établie à Vienne. À la suite de la guerre du Golfe, lorsque le monde découvrit que l'Irak avait trompé les inspecteurs de l'AIEA en conduisant un programme clandestin de construction d'une bombe atomique, l'AIEA a révisé ses modalités d'inspection et établi un nouveau programme nommé 93 + 2. Les responsables du nucléaire iranien ont accepté de se soumettre aux inspections définies par ce programme ; tiendront-ils leurs engagements?

Deux petits centres de recherches nucléaires

Malgré les efforts des services secrets occidentaux, on ignore encore si l'armée iranienne a ou non un programme nucléaire actif. La défaite de l'Irak, en 1991, a convaincu le gouvernement iranien que le pays ne pouvait compter sur ses seules forces conventionnelles pour dissuader une intervention des Occidentaux dans la région du Golfe. Les armes nucléaires permettraient d'éviter les ingérences occi-

dentales de ses ennemis plus proches, tel l'Irak, qui utiliseraient des armes chimiques et biologiques. En 1991 et 1992, l'Iran tenta de se procurer des équipements en Argentine, en Chine, en Europe et en Inde ; avec les compétences appropriées, ces équipements auraient permis à Téhéran de construire un petit arsenal nucléaire. Les États-Unis blo-

quèrent les ventes, mais des rapports de divers services secrets indiquent que le réseau d'achat clandestin de l'Iran est toujours actif.

Ayant échoué dans cette tentative, l'Iran mène une faible infrastructure nucléaire. Deux réacteurs iraniens peuvent aujourd'hui produire du plutonium. L'un est un réacteur de recherche au Centre nucléaire Amirabad, fondé en 1960 sous le régime du shah et équipé par le gouvernement américain.

En plus du réacteur, le Centre dispose d'un petit laboratoire permettant de séparer le plutonium du combustible. Néanmoins, en raison de la sophistication du réacteur. Cependant ce laboratoire ne peut séparer que 0,6 kilogramme de plutonium par an, alors qu'il faut cinq à sept kilogrammes de plutonium pour construire une bombe (à titre de comparaison, les réacteurs de Bushehr produiraient 100 à 150 kilogrammes de plutonium par an).

Les ingénieurs du Centre nucléaire d'Amirabad pourraient accumuler secrètement assez de matériau pour une bombe, mais un tel détournement ne serait pas facile, car Amirabad, comme toutes les installations nucléaires iraniennes, est étroitement surveillé par l'AIEA.

Le second réacteur, situé à Esfahan, est capable de produire du plutonium ne fournissant que de très faibles quantités insignifiantes. Situé au Centre de recherche nucléaire d'Esfahan, il a été commencé vers 1975 par une entreprise française et terminé après le renversement du shah, grâce à la Chine. L'Iran veut agrandir Esfahan ; l'activité intense du centre, en 1996, a incité l'AIEA à y effec-

tuer des inspections, dont aucune n'a toutefois démontré qu'un programme clandestin d'élaboration d'armes nucléaires était en cours.

L'uranium de la bombe

Bien que la plupart des armes nucléaires militaires soient fabriquées à partir de plutonium, ces bombes peuvent fonctionner à l'uranium très enrichi. Mieux encore, de nombreux pays en développement qui veulent s'armer clandestinement, car leur construction est plus simple et ne nécessite pas d'usine de traitement, pour séparer le plutonium produit par un réacteur.

La production d'uranium très enrichi impose des équipements particuliers, afin d'augmenter la concen-

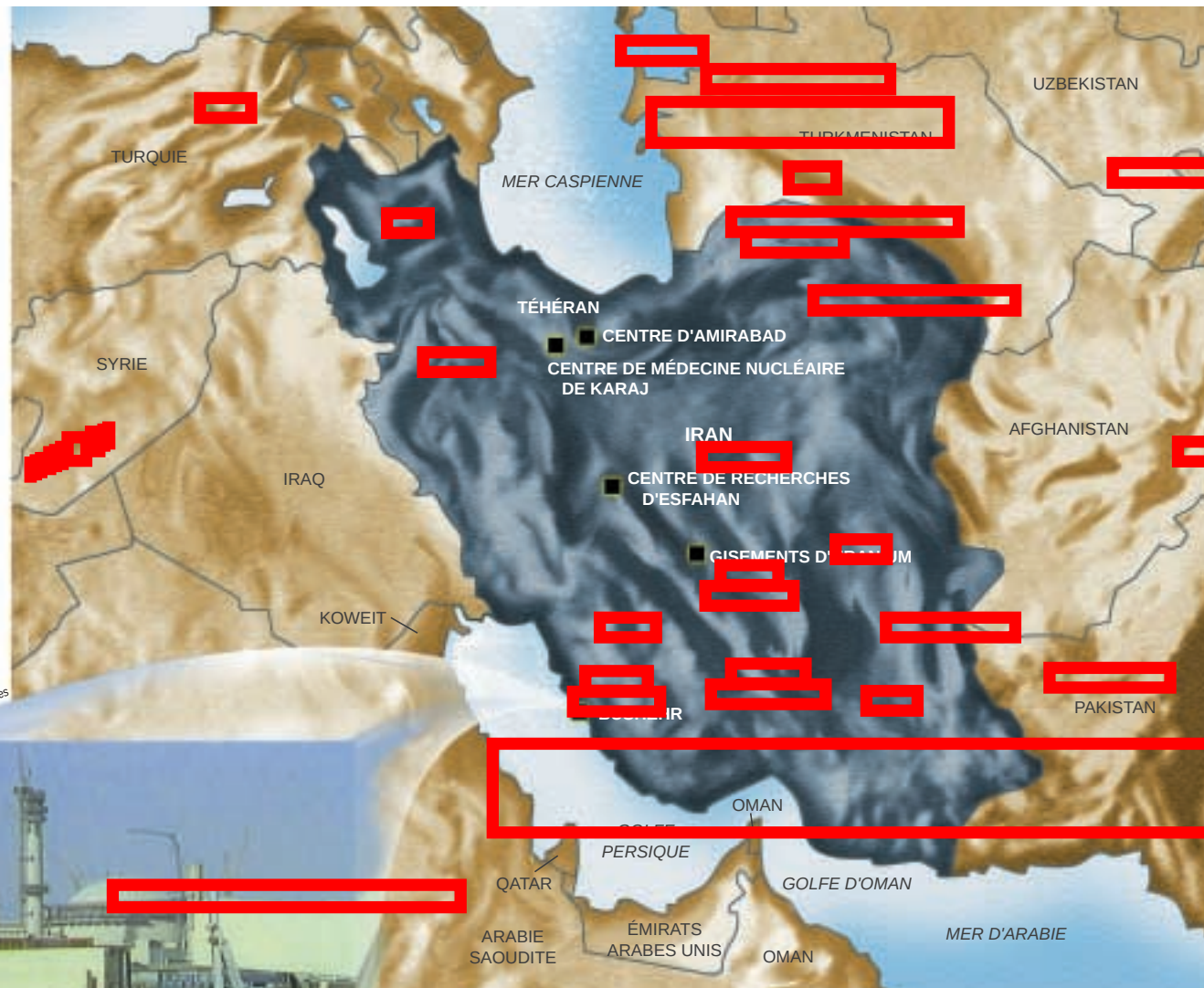
tration en ^{235}U de 0,7 pour cent, concentration à l'état naturel, à 93 pour cent. Cet enrichissement est complexe, mais les installations nécessaires sont plus faciles à dissimuler sous la forme d'usines ordinaires que les unités de retraitement, qui produisent des isotopes radioactifs. La présence trahit immédiatement les vraies finalités de l'usine.

Aujourd'hui l'enrichissement de l'uranium se fait dans des batteries de centrifugeuses, qui séparent les molécules d'hexafluorure d'uranium 235, plus légères, des molécules d'hexafluorure d'uranium 238, plus lourdes. Les services secrets de plusieurs pays ont découvert que l'Iran a cherché à acquérir des centrifugeuses pour la séparation de l'uranium.

La séparation électromagnétique d'isotopes est une autre méthode d'enrichissement de l'uranium, qui fut conçue par les physiciens du Projet américain Manhattan, au cours de la Seconde Guerre mondiale : on dévie un courant d'ions uranium à l'aide d'électroaimants dans une chambre à vide pour séparation à lieu, parce que les ions ^{235}U sont moins déviés que les ions ura-

est placée dans un cyclotron particulier, nommé calutron (pour «cyclotron de l'Université de Californie»), qui consomme beaucoup plus d'énergie que les centrifugeuses, mais les composants sont plus faciles à importer et à fabriquer.

Les experts soupçonnent les Iraniens d'avoir étudié l'enrichissement



1. LE PARC NUCLÉAIRE IRANIEN comprend, outre des gisements d'uranium importants, plusieurs installations de recherche aux environs de Téhéran et à Esfahan. Un réacteur nucléaire russe doit être installé à Bushehr (photographie de gauche), dans une centrale partiellement construite avant la révolution islamique par la firme allemande Kraftwerk Union.

de l'uranium dans trois installations nucléaires : au Centre de recherche nucléaire d'Esfahan, à l'Université de Téhéran et au Centre de médecine nucléaire de Karaj. Un cyclotron acheté à la société belge *Ion Beam Applications* a été installé en 1991 à Karaj, laissant penser aux experts français que l'Iran avait un programme de recherche sur l'enrichissement de l'uranium. Karaj dispose également d'un petit calutron fourni par la Chine. Aucun de ces accélérateurs ne pourrait produire des quantités militaires d'uranium très enrichi, mais tous deux pourraient servir à la recherche et à la formation en matière de séparation d'isotopes.

Les techniques d'enrichissement telles que la centrifugation ne servent pas uniquement à la fabrication d'armes ; elles peuvent également produire du combustible pour des réacteurs nucléaires. Cependant, tant d'uranium faiblement enrichi a été produit à Téhéran, au point que l'on comprend mal pourquoi l'Iran voudrait produire lui-même le combustible de la centrale de Bushehr.

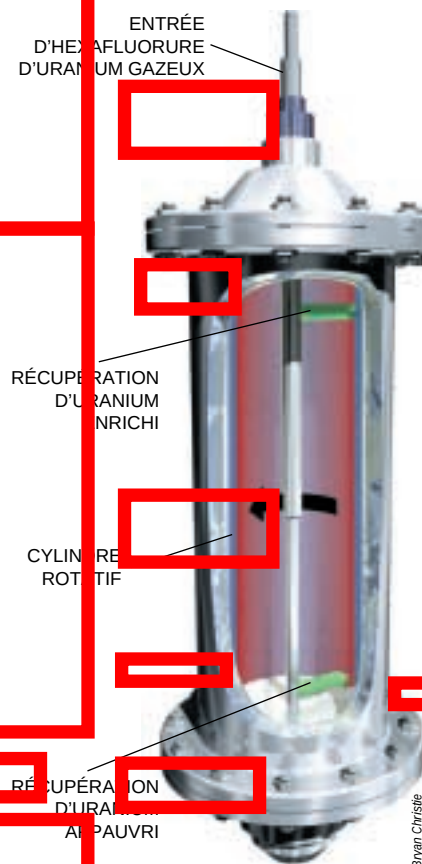
Le développement d'une telle capacité d'enrichissement serait extrêmement coûteux pour un pays non industrialisé qui, de surcroît, possède le deuxième gisement de gaz naturel du monde.

Une pénurie d'électricité

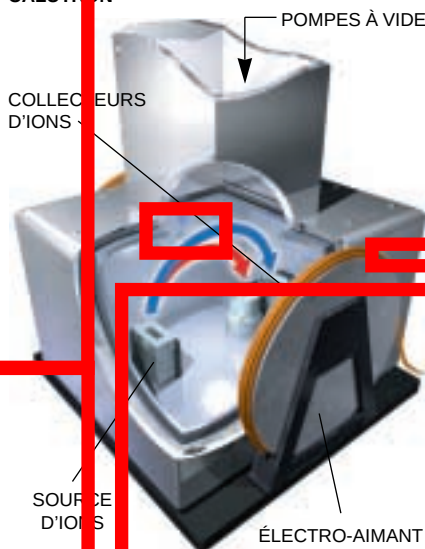
Pourtant, malgré ses atouts énergétiques, l'Iran manque cruellement d'électricité. Sa capacité de production actuelle est d'environ 20 000 mégawatts. L'augmentation de la demande est difficile à chiffrer, mais elle semble être de six à huit pour cent par an, supérieur aux 3 à 4 pour cent généralement constatés dans les pays en développement. L'Iran semble incapable d'exploiter ses réserves de pétrole et de gaz naturel, qui constituent surtout une source de revenus précieuse : l'exportation de pétrole et de gaz naturel représente jusqu'à 85 pour cent des revenus commerciaux du pays.

Pourqu

CENTRIFUGEUSE



CALUTRON



2. L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM se fait habituellement dans des centrifugeuses (en haut), où l'hexafluorure d'uranium gazeux tourne à des vitesses extrêmement élevées. Près de la paroi du cylindre, les molécules renfermant les atomes plus lourds d'uranium 238 (en bleu) sont plus nombreuses que celles qui contiennent de l'uranium 235 (en rouge). On peut également séparer les isotopes de l'uranium en déviant des ions uranium dans un dispositif nommé calutron (en bas) : le champ magnétique dévie davan-

lorsque la révolution islamique balaya le shah, 90 pour cent des travaux étaient effectués.

Aujourd'hui les ingénieurs du ministère russe de l'Énergie atomique ont le plus grand mal à modifier les structures existantes pour y adapter un réacteur russe *VVER-1000* et les systèmes de récupération de l'énergie.

Six générateurs auxiliaires horizontaux devront être installés à la place des quatre unités *Siemens* verticales, pour lesquelles la structure a été conçue. Les Russes devront effectuer la transformation sans aucun document technique ni plan directeur, car les Allemands ne les ont pas fournis aux Iraniens dans les années 1970.

Àinsi, le kilowatt produit à Bushehr devra revenir à plus de 5 000 francs, dans l'hypothèse d'un déroulement normal des travaux, contre 4 000 francs pour de l'énergie produite par des centrales thermiques alimentées au gaz naturel (ou 3 000 francs si plusieurs centrales thermiques étaient simultanément construites).

On imagine souvent que l'énergie nucléaire est moins coûteuse que l'énergie fournie par les centrales thermiques, mais, en Iran, l'abondance du gaz naturel rend les centrales thermiques bien plus rentables que les centrales nucléaires. Le choix iranien d'une solution antiéconomique rend le pays suspect.

Signature du Traité de non-prolifération, l'Iran doit empêcher de spéculer sur Bushehr, ce qui compliquerait considérablement le détournement du combustible de la centrale vers la fabrication secrète d'armes nucléaires. L'Iran a affirmé n'avoir ni le besoin, ni le désir de conserver l'uranium irradié qui produira le réacteur une fois en service et aurait l'intention de le renvoyer en Russie.

Bien que préférable, cette situation n'éliminerait pas tout risque de détournement, car le combustible irradié passerait plusieurs années à refroidir dans des piscines, avant de quitter le pays.

En outre, comme le Pakistan, l'Iran utilise les matériaux et les techniques nucléaires, la circulation d'équipements et de techniciens augmente le risque que l'Iran ne se procure de l'uranium ou du plutonium, soit directement au marché noir, soit, comme le Pakistan, par acquisition de la technique d'enrichissement de l'uranium. De plus, le projet de Bushehr donnerait à l'Iran

des raisons légitimes de poursuivre les recherches et des formations dans le domaine du nucléaire, ce qui lui permettrait de mieux dissimuler un programme militaire.

Comment éviter cette éventualité? La communauté internationale pourrait réclamer que l'AIEA applique sans attendre les nouvelles méthodes de surveillance, afin de mettre immédiatement en évidence des travaux de séparation du plutonium, d'enrichissement de l'uranium ou de construction de composants d'armes nucléaires (F-1989, p. 121-122).
Le programme nucléaire de l'Irak, l'AIEA a défini de nouvelles procédures d'inspection qu'elle ne peut appliquer dans le présent (le nom de 93 + 2). Depuis l'approbation de la première tranche du programme, en 1996, les inspecteurs peuvent employer de puissantes techniques de détection isotopique.

Les inspections de l'environnement

Les autorités iraniennes ont accepté le principe de ces détections, dont l'application fait l'objet de négociations laborieuses (F-1989, p. 121-122).
Les gouverneurs de l'AIEA a adopté, le 16 mai 1997, une résolution d'élargissement du système de surveillance à n'importe quelle installation dans tout pays membre de l'AIEA, y compris les installations qui n'ont pas été déclarées comme sites nucléaires. L'Iran serait suspect de refuser ce nouveau type de surveillance.

Les techniques de détection isotopique sur lesquelles se fonde le programme 93 + 2, permettent d'effectuer ce que l'on nomme une surveillance de l'environnement : on recherche d'infimes quantités de matière radioactive qui serait inévitablement libérée par les usines et installations nucléaires. Des techniques de spectrométrie de masse, par exemple, permettent l'ana-

lyse isotopique d'échantillons contenant moins d'un milliardième de gramme de matière. Les proportions d'uranium 235 et d'uranium 238 étant quasi identiques dans tous les minerais d'uranium, des échantillons présentant un rapport supérieur ou inférieur révéleraient un probable enrichissement.

De même, des concentrations élevées en plutonium dans les effluents de retraitement ont été effectués, et la détection de produits de fission nucléaire, tels l'iode radioactif et des isotopes de l'hydrogène, sur les murs ou sur les équipements, ainsi que dans des échantillons de sol, d'air, de végétation et d'eau prélevés sur des sites choisis avec précision, serait l'indice d'une fabrication d'armes nucléaires.

L'Iran qui a accepté des inspections de tous ses sites industriels, ne devrait pas s'opposer à la mise en place d'un programme de surveillance de l'environnement sur l'ensemble de son territoire. L'AIEA, pour sa part, pourrait employer les techniques généralisées de ces techniques, qui se sont révélées performantes en Irak (le programme 93 + 2 ne détecterait pas l'acquisition de matières de qualité militaire au marché noir ou le vol d'une bombe atomique « mal surveillée »). Pourra-t-on toutefois justifier politiquement d'en faire plus en Iran que dans un autre pays?

Avec ses colossales réserves de gaz naturel et la proximité des marchés en croissance d'Asie et d'Europe de l'Est, l'Iran pourrait devenir un acteur économique de premier plan au cours du siècle prochain.

La politique de développement du gaz naturel, le renforcement des liens économiques avec les autres pays et la stimulation du développement économique intérieur devraient tempérer les ambitions nucléaires du pays. L'Iran peut s'éviter les dépenses exorbitantes d'un programme nucléaire... si ses intentions sont vraiment pacifiques.

David SCHWARZBACH travaille au Centre d'études de l'énergie et de l'environnement, U.S. Congress Office of Technology Assessment, U.S. Government Printing Office (OTA-BP-ISS-168), Washington, D.C., septembre 1995.

Anthony CORDESMAN, *Iran and Iraq : The Threat from the Northern Gulf*, Westview Press, Boulder, Colorado., 1994.

Shahram CHUBIN, *Does Iran Want Nuclear Weapons?*, in *Survival*, vol. 37, n° 1, pp. 86-104, printemps 1995.

Environmental Monitoring for Nuclear Safeguards, U.S. Congress Office of Technology Assessment, U.S. Government Printing Office (OTA-BP-ISS-168), Washington, D.C., septembre 1995.

David SCHWARZBACH, *Iran's Nuclear Program : Energy or Weapon?*, publication de Natural Resources Defense Council, Nuclear Weapons Databook series, 1995.

Les premiers hominidés en Afrique

MEAVE LEAKEY • ALAN WALKER

La découverte d'une nouvelle espèce d'hominidés primitifs recule les origines de la bipédie vers quatre millions d'années.

En 1965, à Kanapoi, au Nord du Kenya, Bryan Patterson et ses collègues de l'Université de Harvard dégagent un morceau de l'articulation du coude d'un hominidé, c'est-à-dire d'un primate qui marche avec le corps redressé. Quarante ans plus tard, ce fragment d'os se rapproche plus, par ses détails, de celui d'un homme moderne que de l'autre humérus d'australopithèque connu à l'époque.

L'âge du fossile de Kanapoi est étonnant : selon les techniques de datation rudimentaires utilisées, il est bien plus ancien que les autres australopithèques découverts jusqu'alors.

Néanmoins, dans les années qui suivent, les anthropologues découvrent les restes d'un si grand nombre d'hominidés primitifs que Kanapoi est oublié. L'importance de cette découverte ne sera reconnue qu'une trentaine d'années plus tard : associée à d'autres, ce fossile établit l'existence d'une nouvelle espèce d'australopithèque, la plus ancienne que nous connaissions. Les origines de la bipédie remontent ainsi à plus de quatre millions d'années.

Les ancêtres directs du genre *Homo* (dont fait partie notre propre espèce, *Homo sapiens*) appartiennent au genre *Australopithecus*, dont l'apparition fut longtemps située il y a 3,5 millions d'années. Les premiers spécimens, découverts en Afrique du Sud, indiquaient l'existence d'au moins deux espèces

d'australopithèques : *Australopithecus africanus* et *Australopithecus robustus*. Les os des jambes de ces deux espèces étaient adaptés à la marche bipède, ce qui caractérise l'homme parmi les primates. Cette bipédie a été confirmée en 1978 par la découverte, sur le site de Laetoli, en Tanzanie, d'une série spectaculaire d'empreintes de pieds. Mais il y a 3,6 millions d'années par trois australopithèques qui traînaient dans une zone couverte de cendres volcaniques humides.

Australopithecus africanus et *Australopithecus robustus* avaient tous deux des cerveaux assez petits, et leurs canines différaient de celles des singes modernes. Mais la plus récente de ces deux espèces, *Australopithecus robustus*, était bizarrement adaptée à la mastication : elle avait des prémolaires et des molaires énormes, associées à des crêtes osseuses situées sur le crâne qui servaient probablement de point d'ancrage à de puissants muscles masticateurs.

Une profusion d'australopithèques

D'autres espèces d'australopithèques furent progressivement identifiées. Ainsi, en 1959, Mary Leakey déterra, en Afrique de l'Est, une crâne d'une autre espèce étroitement apparentée à *Australopithecus robustus*. Les différences



1. *AUSTRALOPITHECUS ANAMENSIS* est un hominidé qui a vécu il y a quatre millions d'années. Les paléontologues l'ont identifié grâce à une mâchoire et une partie de la face (à gauche), des fragments d'os de bras (au centre) et des fragments de tibia (à droite). Ces derniers fossiles indiquent que cet hominidé marchait en position dressée, ce qui en fait le plus ancien primate bipède connu.

entre les crânes découverts dans le Nord-Est de l'Afrique, en Éthiopie et au Kenya, et ceux qui avaient été trouvés en Afrique du Sud conduisirent les anthropologues à distinguer deux espèces d'australopithèques dites robustes.

En 1973, Donald Johanson, aujourd'hui à l'Institut des origines de l'homme de Berkeley, Tim White, de l'Université de Berkeley, et Yves Coppens, du Collège de France, ont identifié une autre espèce, *Australopithecus afarensis*, à partir de quelques fragments de dents d'hominidés provenant du site de Laetoli, ainsi que d'une importante collection provenant de la région de l'Hadar, en Éthiopie (parmi lesquels figurait le célèbre squelette nommé «Lucy»). Selon une datation radiométrique, cette espèce vivait il y a 3,6 à 2,9 millions d'années : c'était alors la plus ancienne espèce d'australopithèque connue.

Australopithecus afarensis est l'espèce la plus étudiée et, certainement, celle qui a engendré le plus de controverses depuis 20 ans. Les *Australopithecus afarensis* sont-ils vraiment différents des *Australopithecus africanus* trouvés en Afrique du Sud ? Les fossiles de Tanzanie et d'Éthiopie, voire seulement ceux de Hadar, appartiennent-ils tous à une seule et même espèce ? La datation de tous ces fossiles est-elle exacte ?

La controverse la plus vive concerne la locomotion d'*Australopithecus afarensis*. La structure de plusieurs os et des articulations suggère qu'ils étaient grimpants aux arbres. Ces caractéristiques indiquent-elles que ces hominidés passaient une partie de leur temps dans les arbres, ou ont-elles seulement été héritées de leurs

ancêtres arboricoles ? La réponse à cette question indiquerait si *Australopithecus afarensis* vivait plutôt dans la forêt ou plutôt dans la savane.

Au début des années 1990, un bon nombre de traits communs à tous les australopithèques étaient établis : bipédie, cerveau de la taille de celui d'un grand singe, larges dents recouvertes

d'une émail se couche d'émail et implantées dans des mâchoires puissantes, canines non saillantes ; les mâles devaient être plus grands que les femelles et, enfin, la croissance était rapide et la maturité sexuelle précoce. Nous savons aussi comment chaque espèce s'adaptait à son environnement. Mais les origines des australopithèques demeuraient obscures : pour étudier la période qui sépare le dernier ancêtre commun de l'homme et de l'orang-outan (il y a entre 5 et 6 millions d'années) et l'*Australopithecus afarensis* (il y a 3,5 millions d'années), on ne disposait que de quelques fragments d'os, de dents et de mâchoires d'hominidés.

Des fouilles qui comblent un vide

Les découvertes faites au Kenya depuis quelques années ont comblé une partie de cet intervalle de temps. Depuis 1982, des expéditions organisées par les musées nationaux du Kenya dans le bassin du Lac Turkana, au Nord du Kenya, trouvent des restes d'hominidés qui ont vécu il y a près de quatre millions d'années. Ces fossiles sont surtout des dents isolées (aucun maxillaire ni mandibule n'a été découvert), qui ressemblent aux restes d'*Australopithecus afarensis* trouvés à Laetoli ; les hominidés auxquels ils ont appartenu restent inconnus. Toutefois, des fossiles plus complets que nous avons mis au jour lors de nos campagnes de fouilles dans la baie d'Allia, sur la rive Est du lac Turkana, éclairent l'histoire des hominidés.

Les fouilles de la baie d'Allia ont mis au jour une couche sédimentaire qui contient des millions de fragments d'os et de dents provenant d'une grande variété d'espèces animales, y compris des hominidés. La couche affleure au flanc d'une colline, dont le sommet est recouvert d'une couche de cendres volcaniques durcies, le tuf de Moiti. L'âge de ce tuf a été estimé par datation radiométrique

à plus de 3,9 millions d'années : les fossiles, qui reposent plusieurs mètres en dessous, sont donc très bien conservés.

Les fossiles de la baie d'Allia ont été déposés dans un fleuve Omo, qui draine aujourd'hui les hauts plateaux du Nord de l'Éthiopie et se jette dans le lac Turkana, d'où l'eau ne s'échappe que par évaporation. Frank Brown, de l'Université de l'Utah, et Craig Feibel, de l'Université Rutgers, ont montré qu'il n'en a pas toujours été

ainsi : il y a 3,3 à -0,7 millions d'années, le réseau fluvial de l'Omo couvrait la

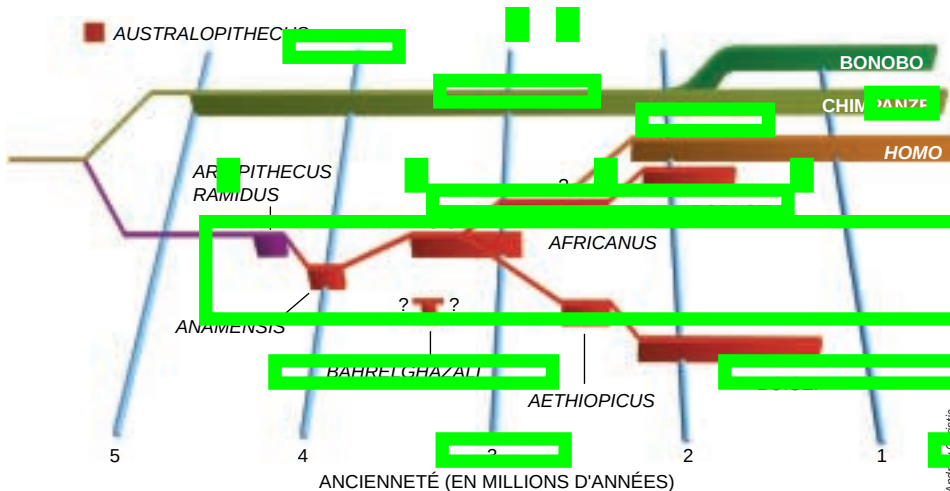
et se jetait dans l'océan Indien sans déposer ses sédiments dans un lac (un lac analogue au lac Turkana n'aurait existé que pendant de brèves périodes).

Les fossiles de la Baie d'Allia sont localisés dans un bras de cet ancien réseau fluvial. La plupart sont des dents et les os d'animaux aquatiques (poissons, crocodiles, hipopotames, etc.),

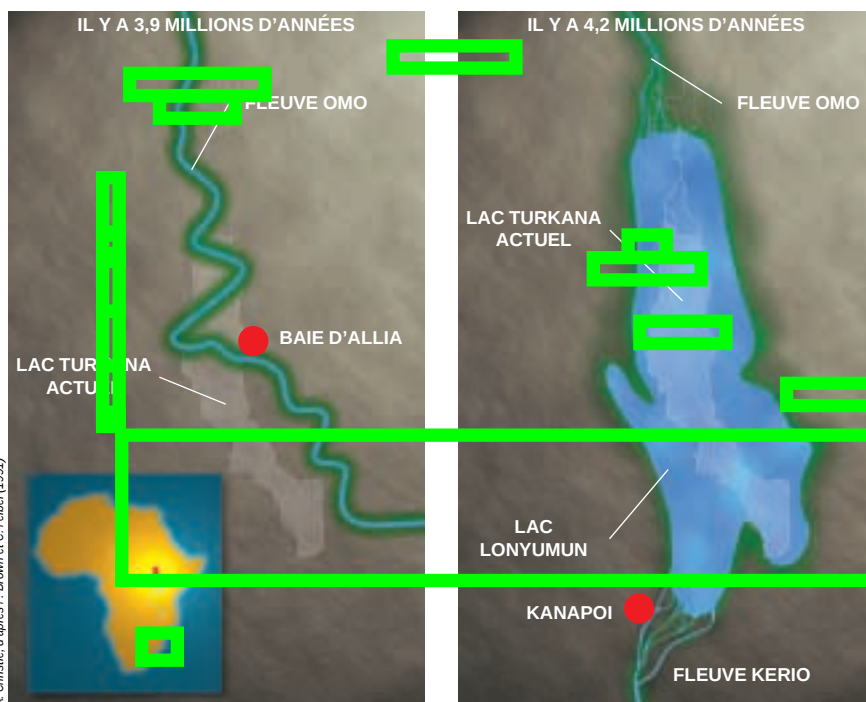
roulés et usés pendant leur transport sur une grande distance par les eaux du fleuve. D'autres fossiles, mieux

conservés, proviennent d'animaux qui vivaient sur les rives du fleuve ou à proximité. Parmi eux, on trouve plusieurs espèces de singes, apparentées aux colobes actuels, qui se nourrissaient de feuilles et des antilopes dont les descendants actuels fréquentent des zones densément boisées. Nous avons aussi retrouvé des fossiles d'hominidés bien conservés : ces hominidés primitifs habitaient au moins occasionnellement, les rives du fleuve.

Comment se rattachent-ils aux autres espèces ? Les fossiles de la baie d'Allia, ainsi que d'un radius (l'os externe de l'avant-bras) presque complètement délogé des sédiments de Sibilot, plus au Nord, présentent un mélange de caractères primitifs propres aux ancêtres communs des singes et des hommes) et plus évolués (spécifiques des hominidés ultérieurs).



2. L'ARBRE GÉNÉALOGIQUE des hominidés nommés australopithèques comporte plusieurs espèces ayant vécu il y a 4 à 1,25 millions d'années. Il y a 2 millions d'années, un nouveau genre, *Homo* (qui comprend notre propre espèce *Homo sapiens*), aura évolué à partir d'une de ces espèces.



3. LE BASSIN DU TURKANA servait d'habitat à *Australopithecus anamensis*, il y a environ quatre millions d'années. Il y a 3,9 millions d'années, une rivière serpentait dans tout le bassin (à gauche), et la baie d'Allia s'est formée dans la bande de forêt (en vert) qui bordait cette rivière. Il y a 4,2 millions d'années, le bassin était rempli d'un immense lac (à droite), et un second site, Kanapoi, était alors situé sur le delta d'une rivière alimentée par le lac.

Retour à Kanapoi

De l'autre côté du lac Turkana, à 145 kilomètres au Sud, se trouve le site de Kanapoi, où Patterson avait fait sa découverte en 1965. L'un d'entre nous (M. Leakey) y a repris les fouilles qui avaient été interrompues. À Kanapoi, un ensemble de ravins profondément creusés par l'érosion fait affleurer les sédiments, mais la chasse aux fossiles est difficile : une carapace de galets de lave et de scories volcaniques recouvre les sédiments. Les fossiles ont été préservés dans les sédiments d'une rivière, ancêtre de l'actuel fleuve Kerio, qui coulait à cette époque vers le bassin du Turkana et se jetait dans un ancien lac, que nous avons nommé lac Lonyumun. Le lac aurait atteint son extension maximale il y a 4,1 millions d'années, avant d'être comblé par les sédiments.

Les fouilles ayant surtout livré des restes de repas de carnivores, les fossiles sont fragmentés. Nous avons toutefois découvert, jusqu'à présent, des os presque complets, un maxillaire et une face inférieure complets, le tiers supérieur et le tiers inférieur d'un ulna, des fragments de crâne et plusieurs ensembles de dents isolées. Après une étude comparative des fossiles retrouvés dans la baie d'Allia et à Kanapoi (y compris du fragment retrouvé par Patterson), nous avons conclu que les

caractéristiques anatomiques de ces spécimens les différenciaient assez des autres hominidés primitifs connus pour que nous les attribuions à une nouvelle espèce, *Australopithecus anamensis* (du mot tswana *anam*, qui signifie lac).

L'étude de l'évolution géologique du bassin lacustre de Kanapoi, datant de 4,2 à 3,9 millions d'années. Au Kenya, Ian McDougall, de l'université nationale australienne, cherche à préciser l'âge du tuf de Kanapoi, couche de cendres volcaniques qui recouvre la plupart des fossiles de ce site ; ses résultats préciseront l'âge des fossiles et l'histoire de ce bassin lacustre.

À quoi ressemblait *Australopithecus anamensis* ? Ses mâchoires sont primitives : leurs deux côtés sont rapprochés et parallèles, comme chez les grands singes actuels, et non écartés vers l'arrière de la bouche, comme chez les hominidés plus évolués, dont l'homme.

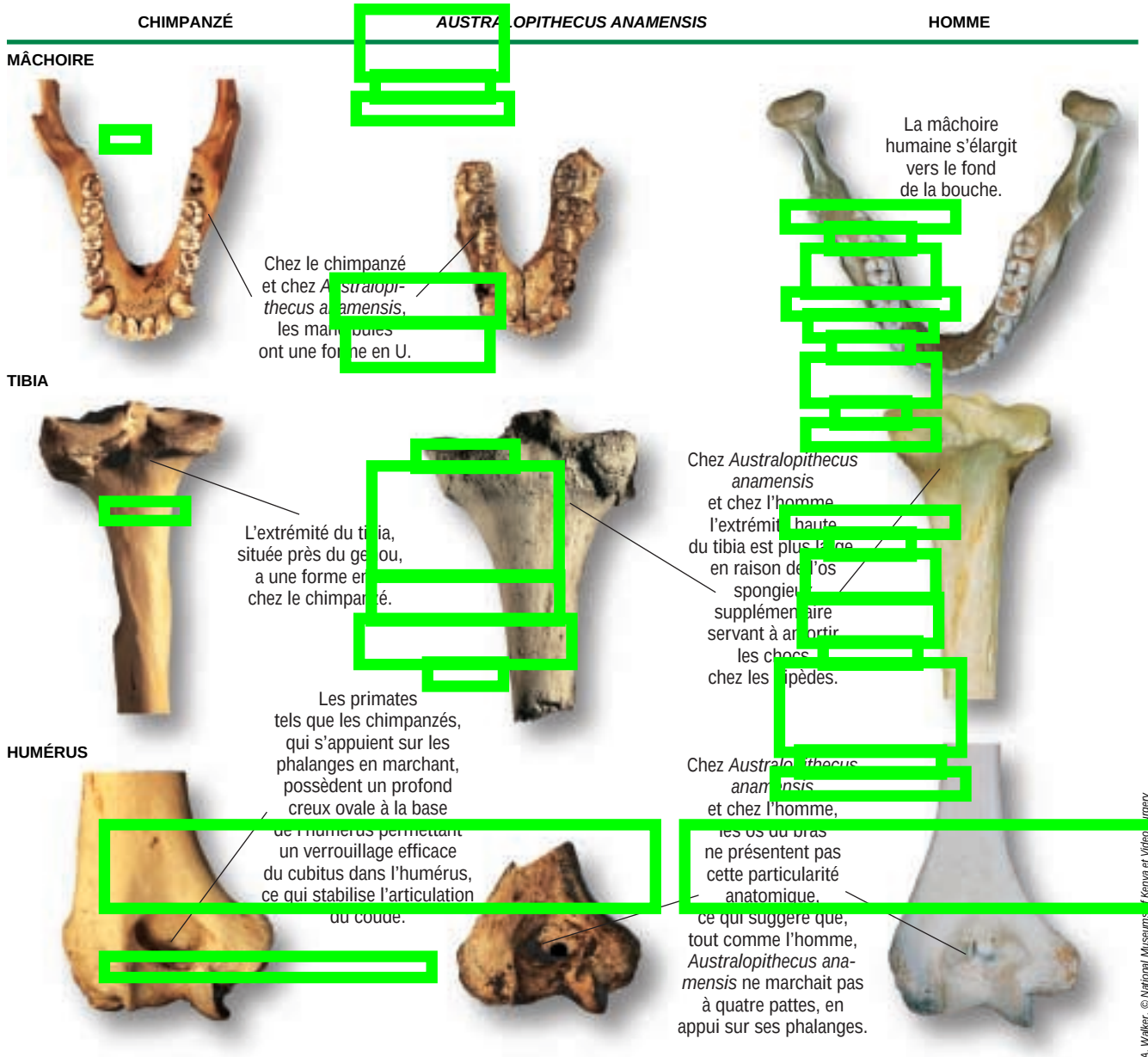
Australopithecus anamensis ressemble aussi à celle du chimpanzé dans la forme de la mâchoire, les côtés droit et gauche. Par ailleurs, le canal de l'oreille externe d'*Australopithecus anamensis* était petit, ressemblant ainsi plus à celui des chimpanzés qu'à celui des hominidés plus récents.

Les dents, en revanche, semblent plus évoluées : l'émail est épais, comme

chez les grands singes actuels. Mais la mâchoire, alors qu'elle est mince chez les grands singes africains. Cet épaississement indiquerait qu'*Australopithecus anamensis* avait déjà changé de régime alimentaire et qu'il consommait des aliments beaucoup plus durs, bien que les

de son crâne soient encore proches de celles des singes.

L'os d'*Australopithecus anamensis* qui nous a apporté le plus d'informations est un tibia presque complet. Cet os, qui soutient une partie importante du corps, est très différent de celui d'un singe et chez un quadrupède. Or, par sa taille et presque tous les traits anatomiques



4. LES FOSSILES d'*Australopithecus anamensis* (au centre) ont des caractères anatomiques communs avec l'homme (à droite) et avec le chimpanzé (à gauche). La mâchoire, le tibia et l'humérus sont particulièrement significatifs. Les paléanthropologues utilisent les

ressemblances et les différences entre ces espèces pour déterminer leur degré de parenté. Ils en déduisent le parcours évolutif des hominidés depuis que les lignées des chimpanzés et des humains se sont séparées, il y a cinq ou six millions d'années.

des articulations de la cheville et du genou, le tibia découvert à Kanapoi ressemble à celui découvert à Hadar et attribué à *Australopithecus afarensis*, qu'un million d'années les sépare.

Savane ou forêt

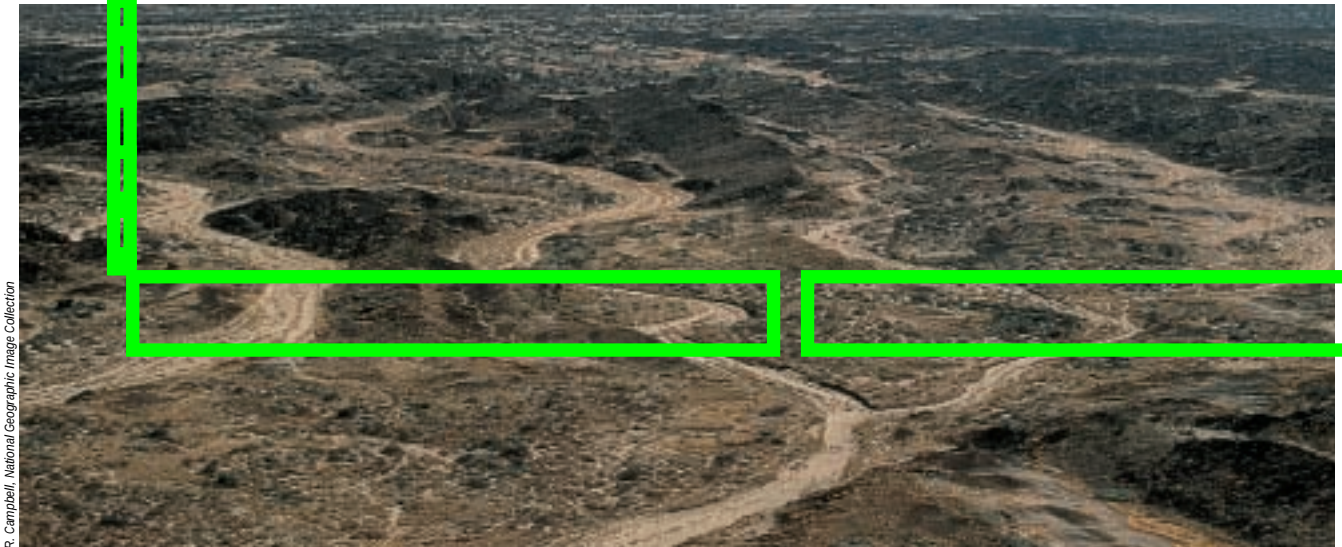
Les fossiles d'autres animaux dégagés à Kanapoi indiquent que l'environnement différait de celui de la baie d'Allia, sur l'autre rive du lac. Les chenaux du fleuve qui a déposé les sédi-

ments de Kanapoi étaient probablement bordés de minces bandes de forêt, qui les séparaient de la savane. Comme

retrouvé les restes d'antilopes à cornes en spirale, qui vivaient certainement dans des fourrés denses, mais aussi de bubales et d'autres antilopes typiques des grands espaces : la savane n'était pas très éloignée du fleuve. *Australopithecus anamensis* vivait-il dans cette savane, dans la forêt, ou indifféremment dans ces deux milieux ?

À l'époque où nous découvrons les restes de *Australopithecus anamensis*, une équipe dirigée par Tim White

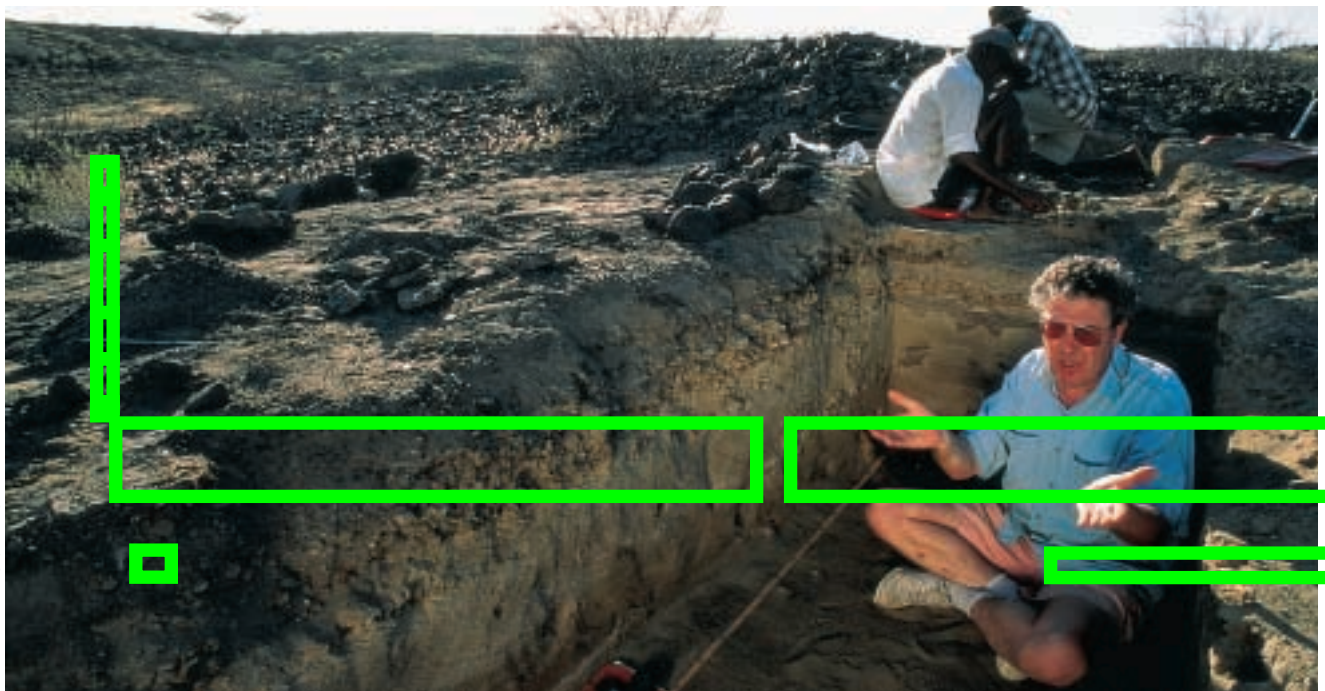
d'Aramis, des fossiles d'hominidés encore plus anciens : des dents isolées, une partie de la mandibule d'un nourrisson, des fragments d'un crâne d'adulte et des os de bras, tous datés d'environ 4,4 millions d'années. Ces restes, d'abord attribués à une nouvelle espèce d'australopithèques, *Australopithecus ramidus*, l'ont ensuite été à un



R. Campbell, National Geographic Image Collection

5. LES ENVIRONS du lac Turkana ne se sont désertifiés que récemment : à l'époque où *Australopithecus anamensis* vivait dans ces parages, il y a quatre millions d'années, la région était couverte par

les eaux de l'ancien lac Lonyumun, où se jetaient des rivières bordées de forêts verdoyantes. Le lac a été progressivement comblé par des dépôts sédimentaires.



K. Garrett, National Geographic Image Collection

6. LE PALÉONTOLOGUE Alan Walker (au premier plan) et deux de ses collègues fouillent le site de la baie d'Allia, sur les rives du lac Turkana, au Kenya, où plusieurs restes d'*Australopithecus ana-*

mensis ont été découverts. La couche d'ossements fossilisés est une bande sombre d'environ 40 centimètres d'épaisseur au sommet de la tranchée.

nouveau genre, *Ardipithecus*. D'autres fossiles, découverts près de ceux des hominidés, tels des graines ou des os de singes et d'antilopes de forêt, indiqueraient que ces hominidés vivaient aussi dans une zone boisée dense.

Cette nouvelle espèce est l'hominidé le plus primitif que nous connaissons. Elle relie les singes africains aux australopithèques. Les fossiles d'*Ardipithecus ramidus* présentent des ressemblances avec les grands singes africains actuels, telles la finesse de la couche d'émail dentaire et la robustesse des os des bras, tandis que d'autres caractères, telle la forme du trou occipital, présent à la base du crâne, qui permet la liaison entre le cerveau et la moelle épinière, les rapprochent davantage des hominidés plus évolués.

L'attribution d'un degré d'évolution plus ou moins avancé à ces hominidés est toutefois délicate. Selon des études génétiques, l'homme et le chimpanzé dérivent d'un ancêtre commun qui s'était auparavant différencié du groupe des gorilles. C'est pour cette raison que les paléontologues ont souvent le mal de choisir entre les deux espèces de chimpanzés (*Pan troglodytes* et *Pan paniscus*) pour illustrer le passage à l'homme. Depuis la divergence de la lignée humaine et de celle des chimpanzés, ces derniers ont toutefois disposé d'un même laps de temps pour évoluer, et nous connaissons mal les caractéristiques du dernier ancêtre commun.

Un ancêtre de l'homme ?

Avec de nombreux traits primitifs, *Ardipithecus* semble provenir de la divergence entre les lignées de l'homme et des chimpanzés. Plus récemment, T. White

et son équipe ont retrouvé divers fragments d'un même squelette d'*Ardipithecus* dans la région de l'Awash Moyen-Ethiopie. Nous attendons impatientement leur analyse.

D'autres découvertes de fossiles d'australopithèques ménagent de nouvelles surprises, en particulier sur la répartition géographique de ce genre. Ainsi, une équipe dirigée par Michel Brunet de l'Université de Poitiers, a découvert en 1995, au Tchad, la partie antérieure d'une mandibule et une dent isolée qui datent de 3,5 millions d'années. Michel Brunet a suggéré que ces os appartenaient à une nouvelle espèce, *Australopithecus bahrelghazali*. De manière surprenante, ces fossiles ont été découverts à 2 500 kilomètres à l'Ouest de la vallée du Rift, dans une zone fort éloignée de l'Afrique de l'Est et du Sud où les fossiles d'australopithèque avaient été trouvés jusqu'à présent.

Pendant de nombreuses années, les paléoanthropologues ont supposé que la marche bipède était apparue dans la savane, où elle aurait protégé le dos des hommes du soleil et libéré les mains pour le transport de la nourriture. Alan Kortland, puis Yves Coppens ont même proposé que l'ouverture de la vallée du Rift ait contribué à l'évolution, à l'Est, des ancêtres des hominidés (les ancêtres des grands singes étant à l'Ouest).

En 1996, ces idées ont été aujourd'hui remises en question : les hominidés les plus anciens que nous connaissons aujourd'hui, *Ardipithecus ramidus*, *Australopithecus anamensis* et même *Australopithecus bahrelghazali* ont été découverts dans un environnement boisé, à l'Ouest comme à l'Est du Rift. Pourquoi alors les ancêtres de l'homme se sont-ils un jour redressés ?

Meave LEAKEY dirige le département de paléontologie des muséums nationaux du Kenya, à Nairobi. Alan WALKER est professeur d'anthropologie et de biologie à l'Université de Pennsylvanie.

Les origines de l'homme, Editions Fayard/Science, 1989.

Yves COPPENS, *Une histoire de l'homme des origines à nos jours*, Fayard, 1994.

Tim D. WHITE, Gen SUWA et Berhane ASFAW, *Australopithecus ramidus, a New Species of Early Hominid from Aramis, Ethiopia*, in *Nature*, vol. 371, pp. 306-312, 22 septembre 1994.

Meave G. LEAKEY, Craig S. FEIBEL, Ian MCDONOGH et Alan WALKER, *New Four-Million-Year-Old Hominid Species from Kenia and Allia Bay*, in *Nature*, vol. 376, pp. 565-571, 17 août 1995.

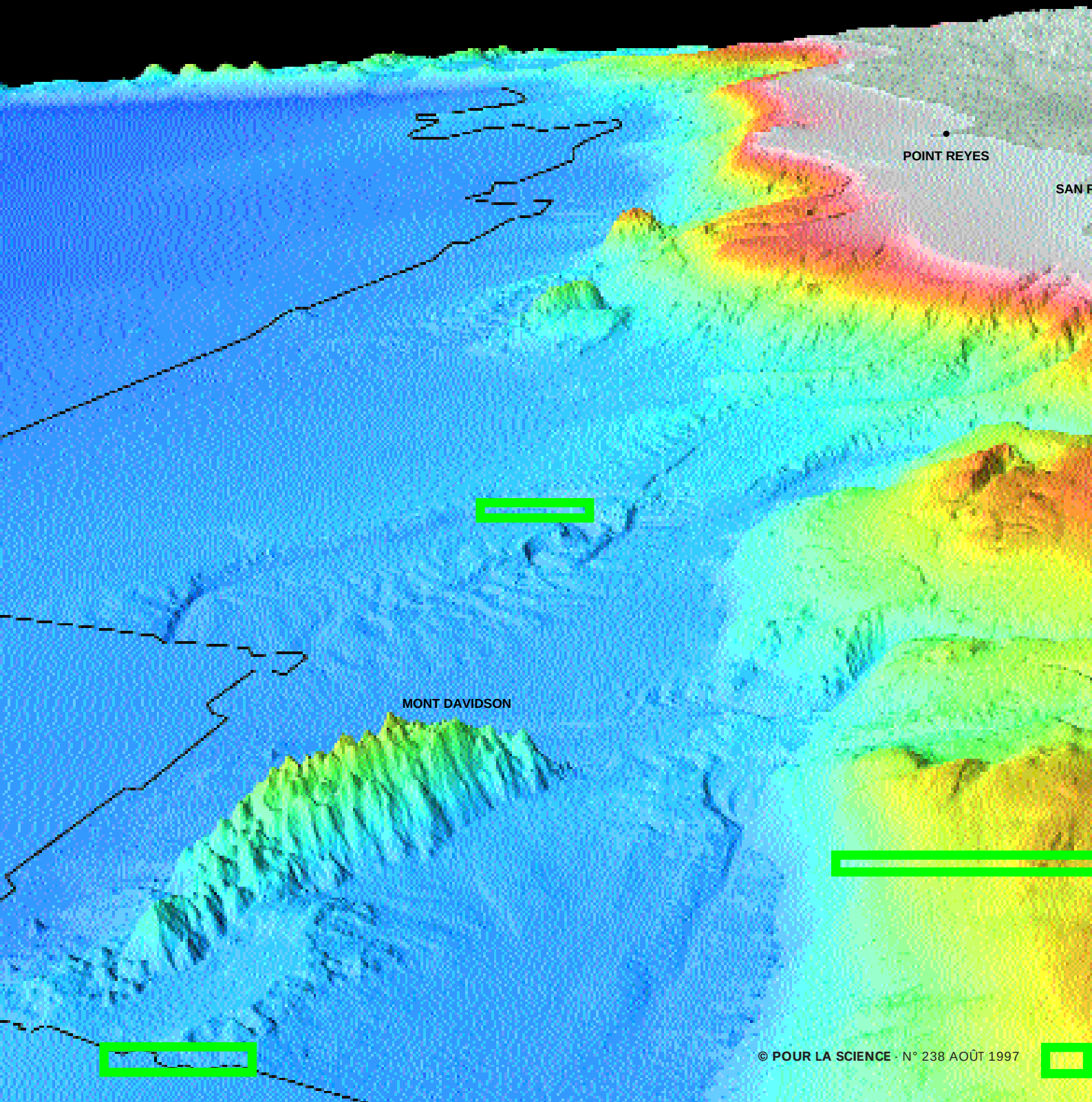
Donald C. JOHANSON et Blake EDGAR, *From Lucy to Language*, Peter Nevraumont, Simon & Schuster, 1996.

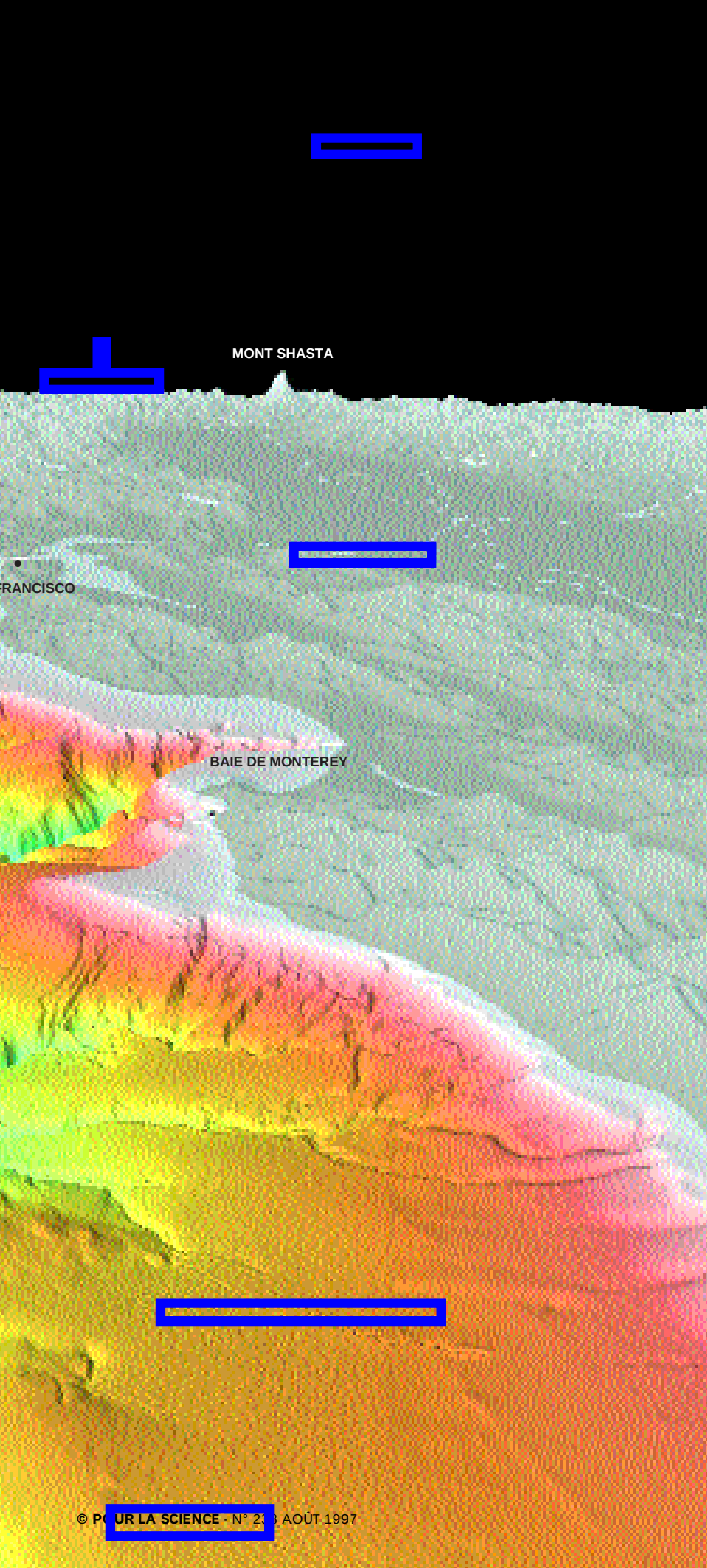
Michel BRUNET, Alain BEAUVILLAIN, Yves COPPENS, Émile HEINTZ, Aladj Montaye, et David PILBEAM, *Australopithecus bahrelghazali, une nouvelle espèce d'hominidé ancien de la région de Koro Toro (Tchad)*, in *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, tome 322, série IIA, pp. 907-913, 1996.

Les reliefs sous-marins

LINCOLN PRATSON • WILLIAM HAXBY

Des techniques modernes de sonar fournissent des cartes des fonds sous-marins aux abords des continents et en révèlent la diversité.





Vers -85, le Grec Posidonius prit la mer pour une curieuse mission. Il ne transportait pas de marchandises, pas de passagers, et il n'était pas envoyé pour une mission guerrière. Il cherchait simplement à mesurer la profondeur de l'océan. Après avoir stoppé son navire au milieu de la Méditerranée, il fit descendre une grosse pierre et mesura qu'il fallait près de deux kilomètres de corde avant que la pierre ne touche le fond. Posidonius et ses hommes devaient jubiler, du moins jusqu'au moment où il leur fallut remonter les 2 000 mètres de corde.

Pendant 2 000 ans, les géomètres marins et les océanographes continuèrent à utiliser cette méthode de sondage pour déterminer les profondeurs de l'océan : ne nous étonnons pas que leurs progrès aient été lents. Puis, durant les années 1920, les océanographes ont mis au point les premiers sonars : ils émettent des ondes sonores qui sont réfléchies par le fond océanique et analysent la durée de leur propagation pour déterminer la profondeur de l'océan. Grâce aux innombrables mesures fournies par ces instruments, les océanographes ont commencé à se représenter le relief du fond de l'océan.

Au cours des dernières décennies, des ingénieurs ont conçu des dispositifs acoustiques encore plus perfectionnés, accélérant ainsi la cartographie des fonds. Les programmes de cartographie du relief sous-marin furent d'abord subventionnés par l'armée, mais, aujourd'hui, les considérations économiques ont pris le relais.

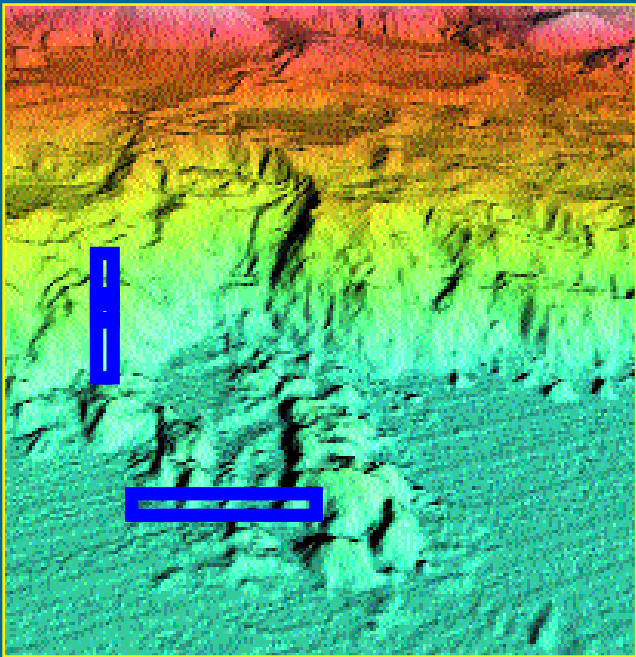
En 1983, les pays ouverts sur la mer ont déclaré que les eaux et les fonds marins qui bordent leurs côtes sur une largeur de 370 kilomètres sont des « zones économiques exclusives ».

Pour estimer la valeur des vastes étendues sous-marines revendiquées par les États-Unis, les Américains ont exploré entre 1983 et 1993, plusieurs des régions annexées. Ils ont ainsi compilé des cartes de plus de 200 000 kilomètres carrés de fonds marins au large des côtes atlantiques et pacifiques, et au large du golfe du Mexique.

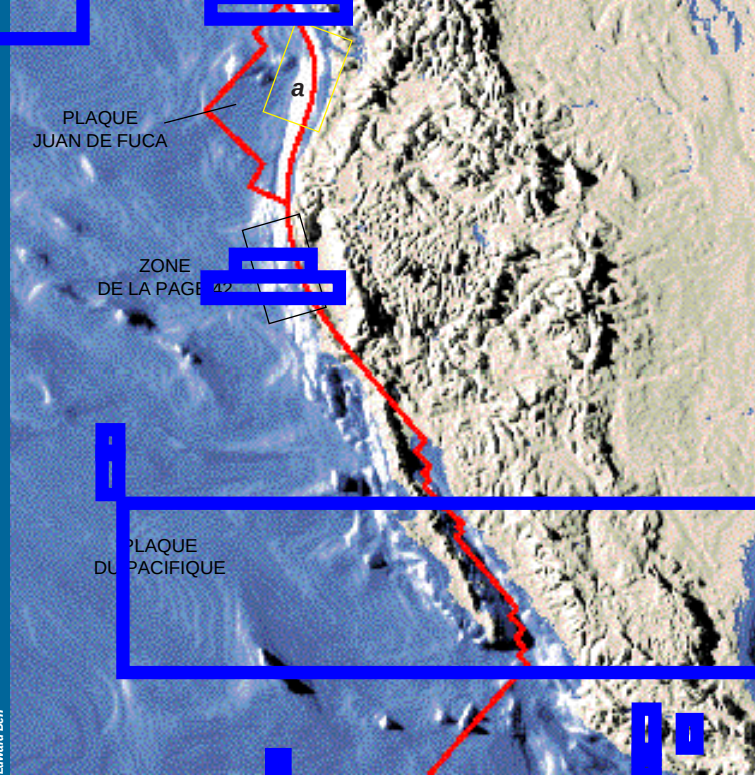
1. DES IMAGES DU RELIEF SOUS-MARIN ont été élaborées par ordinateur, à partir des données enregistrées par des sonars (pour les zones situées à droite de la ligne noire). On observe ainsi les formations géologiques sous-marines, ici à l'Ouest de la côte pacifique des États-Unis.

L. Pradon et W. Hübner

2. EFFONDREMENT du fond sous-marin sur le talus continental au large de l'Oregon. La traînée de débris, au centre de la «baie» en forme de «V», marque la trajectoire des matériaux. Cette excavation est large de six kilomètres, à l'«embouchure». Certains des blocs effondrés sont aussi hauts que des gratte-ciel. L'effondrement aurait été déclenché par un séisme. De tels éboulements de la marge continentale engendrent de violents tsunamis qui inondent le littoral ou traversent le Pacifique et ravagent les côtes lointaines.

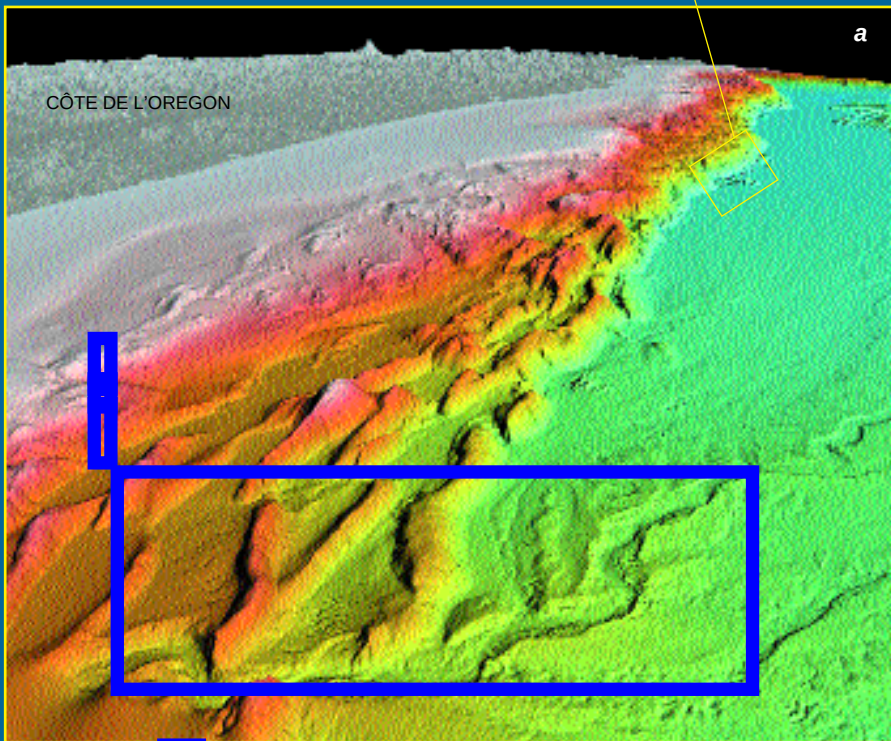


L. Pratson et W. Haxby



Edward Bell

4. TROIS TYPES DE MARGES bordent le littoral de l'Amérique du Nord. Sur la façade atlantique et le long des côtes du golfe du Mexique, les marges sont passives : elles sont incluses dans la plaque tectonique Nord-américaine, accompagnant cet énorme bloc dans ses déplacements. Au contraire, la marge occidentale des États-Unis est active : elle se trouve sur le bord de la plaque Nord-américaine, qui heurte la croûte océanique, sous l'océan Pacifique. Sur la presque totalité de la côte cali-

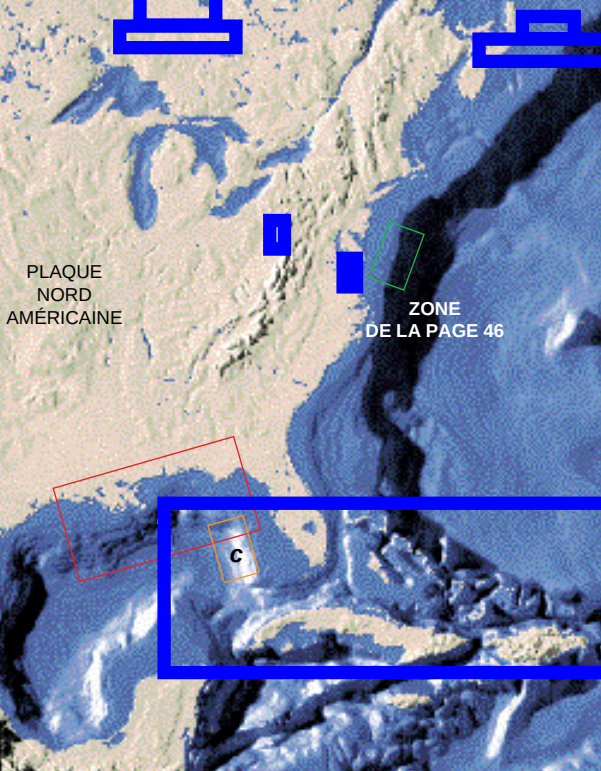


L. Pratson et W. Haxby

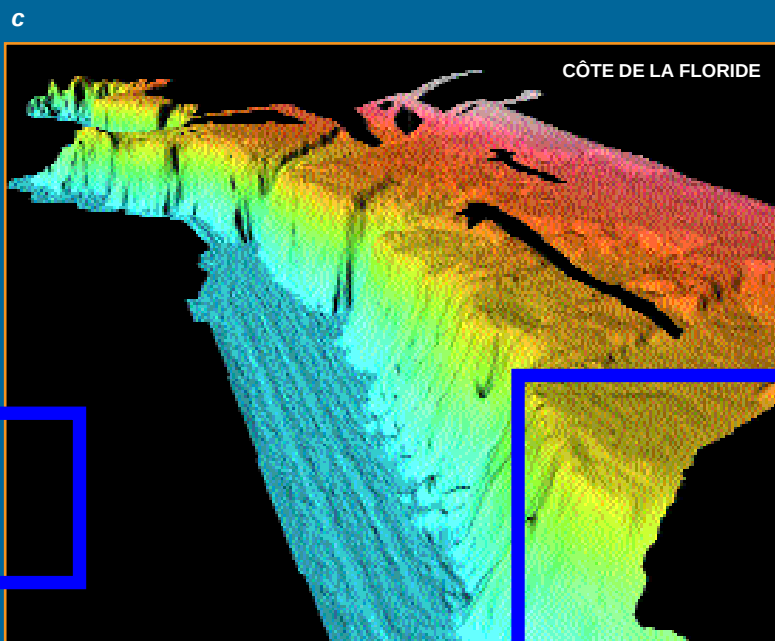
3. DES SÉDIMENTS PLISSÉS tapissent le fond marin au large de l'Oregon. Les ondulations résultent de la collision entre la plaque Nord-américaine (à gauche) et la plaque Juan de Fuca (à droite). Comme un bulldozer géant, la plaque Nord-américaine racle les sédiments de la plaque de Juan de Fuca, qui s'enfonce et les comprime en formant des plis. Au Nord (en bas à gauche), les plis forment des arêtes nettes. Au Sud (en haut à droite), les plis sont si serrés qu'ils s'accroissent en terrasses, car une partie de la plaque de Juan de Fuca affleure sous la couche sédimentaire.

L. Pratson et W. Haxby

5. DES STRUCTURES EN FORME DE CRATÈRES parsèment le fond marin au large du Mississippi jusqu'à l'Est du Texas. Ces petits bassins sont remplis de sédiments épais et, par endroits, d'énormes quantités de pétrole et de gaz. Les arêtes et les dômes qui séparent les bassins recouvrent les dépôts de sel de tailles et de formes variées. Ce sel a été déposé il y a environ 180 millions d'années, après l'évaporation des eaux du golfe du Mexique. Il a ensuite été recouvert d'une épaisse couche de sédiments puis, sous la pression des montagnes Rocheuses et charriés vers le golfe par le Mississippi. Le sel est incompressible : sous le poids des sédiments qui l'ont recouvert, d'énormes poches de sel ont été chassées, sont remontées et ont «fleuré» vers la mer.

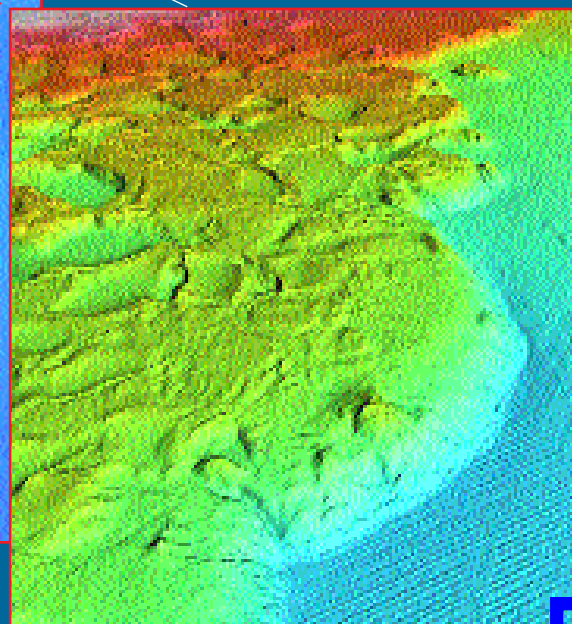
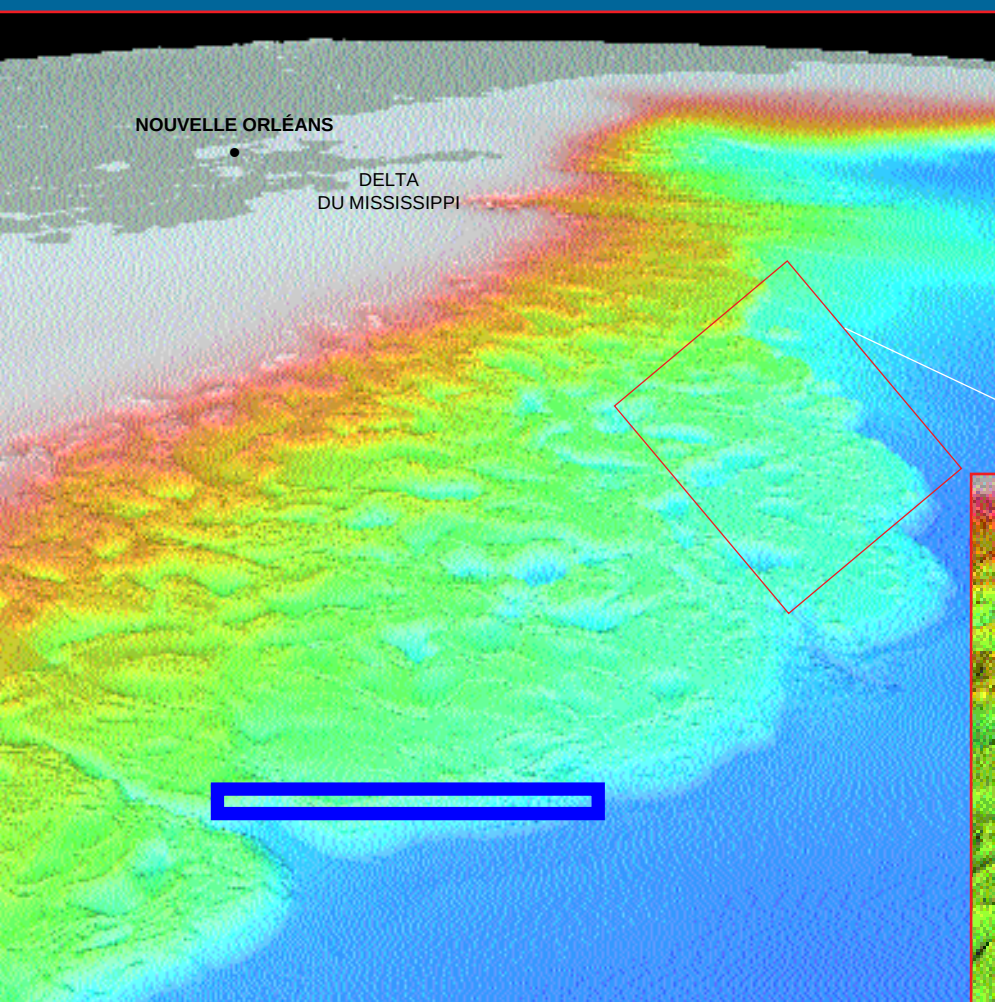


forinienne (il s'agit d'une frontière de plaques coulissantes), la plaque Nord-américaine glisse le long de la plaque du Pacifique, en suivant un système de fractures quasi verticales, connues sous le nom de faille de San Andreas. Plus au large des côtes (il s'agit d'une marge active), la plaque Nord-américaine passe sur un morceau de croûte océanique nommée plaque de Juan de Fuca.



L. Pratson et W. Hobb

6. DES FAISES DE PRÈS DE DEUX KILOMÈTRES forment l'Escarpe de Floride, au nord du talus continental, à l'Ouest de la Floride. Tandis que la pente du talus continental est généralement de l'ordre de quelques degrés, celle de l'escarpement atteint, ici, 35 degrés. En plusieurs endroits, les parois sont quasi verticales. D'innombrables squelettes d'organismes marins sont agglomérés dans le fond. L'accumulation progressive de ce matériel formait naguère une pente douce, mais des courants ont érodé la base du talus. Aujourd'hui, des eaux souterraines très salées suintent de l'escarpement et dissolvent les roches. Affaibli par cette décomposition, le talus menace de s'effondrer en entraînant avec lui beaucoup de sédiments. On retrouve très peu de matériel érodé, à la base de la falaise.



Les instruments de la cartographie sous-marine

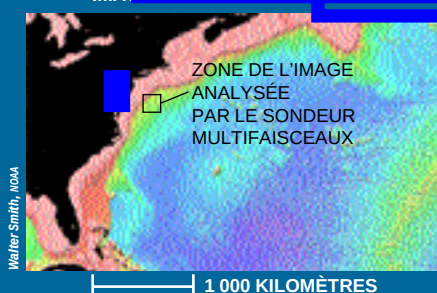
Les sondeurs multifaisceaux ne sont qu'un des types d'instruments d'étude des fonds sous-marins. Les autres méthodes ont aussi des avantages et des inconvénients.

Les satellites (a) ne mesurent pas la profondeur des fonds marins, mais ils repèrent les variations de hauteur de la surface de l'océan. Le satellite *Geosat*, par exemple, mesure en fait pour mesurer sa distance à la surface de l'océan avec une précision de cinq centimètres. Comme la position du satellite est parfaitement connue, on détermine précisément les dénivellations de la surface de l'océan.

La surface de l'océan présente parfois des dénivellations qui atteignent 100 mètres. Ces ondulations reflètent des différences de la force de gravitation terrestre qui sont infimes, mais suffisantes pour que l'eau ne se répartisse pas de façon uniforme. Plus généralement, ces variations d'origine gravitationnelle de la surface de l'océan

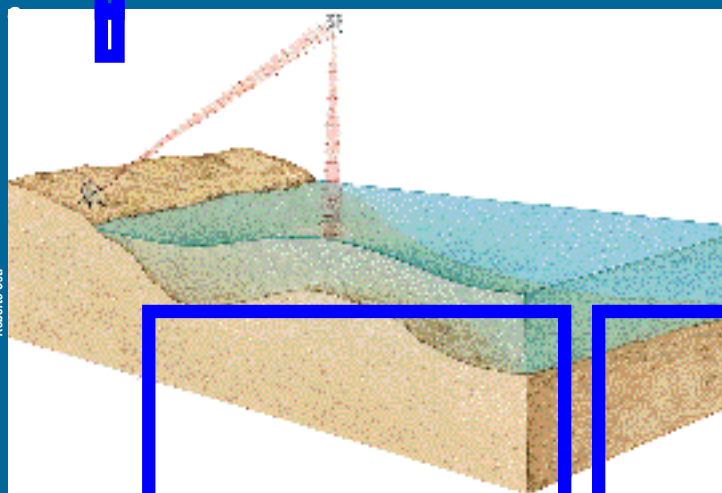
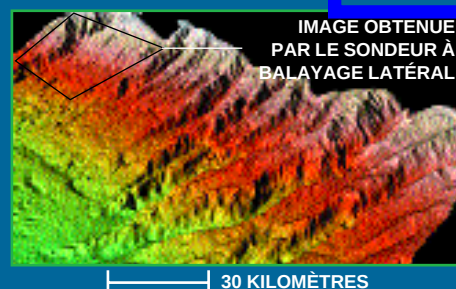
reflètent l'existence de reliefs sous-marins de moins de 10 kilomètres de large. Toutefois, les reliefs sous-marins de moins de 10 kilomètres de large n'ont généralement pas une masse suffisante pour modifier la surface de l'océan, et ils ne sont pas détectés par les satellites radar. De plus, les variations de gravité (notamment près des marges continentales) reflètent parfois des différences de la densité des roches sous-jacentes plutôt que la topographie locale. Les satellites fournissent malgré tout des cartes d'ensemble, même imparfaites, des régions qui n'ont pas encore été explorées par des navires.

Le sondeur multifaisceaux (b) utilise les échos réfléchis par le fond sous-marin pour mesurer la profondeur de l'eau. Contrairement aux sondeurs simples, cette technique utilise plusieurs sources sonores et des dispositifs d'écoute répartis sur la coque du navire. Simulta-

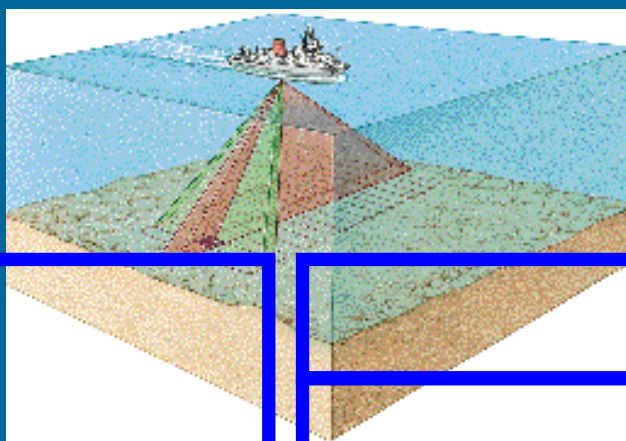


neurent des accidents de la topographie sous-marine. Par exemple, un volcan submergé de 2 000 mètres de haut et de 40 kilomètres de large attire l'eau latéralement vers lui, produisant un ren-

foncement de l'eau de quelques secondes, les sources sonores émettent des ultrasons qui atteignent une mince bande du fond, perpendiculaire à la direction du navire. Simulta-



b



Simultanément, des océanographes étudiaient plus en détail le large du New Jersey et de la Floride occidentale. Tous ces travaux ont permis de sonars multifaisceaux, les instruments les plus perfectionnés aujourd'hui pour la cartographie des reliefs sous-marins.

Ces campagnes ont fourni des vues sans précédent des marges continentales (une marge continentale est constituée de la plate-forme continentale et du talus qui la délimite).

Bien qu'aucune lumière solaire n'atteigne les grandes profondeurs, les ordinateurs couplés aux sonars mon-

treraient si les océans étaient vidés ! Ces reconstructions sont particulièrement intéressantes pour l'élaboration de programmes d'activités industrielles en mer : par exemple, les entreprises qui posent des câbles sous-marins de télécommunication ou qui implantent des plates-formes de forage pétrolier dans des zones tou-

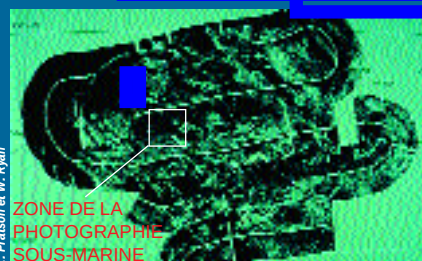
jours plus profondes ont besoin de connaître les fonds stables, où il n'y a pas d'écroulements sous-marins ni de courants turbulents.

La création de décharges sous-marines nécessite aussi de savoir si des courants profonds ne risquent pas de perturber les sites où sont entreposés les déchets. L'étude des fonds sous-marins aide également les géologues à localiser les systèmes de failles sous-marines et à évaluer les risques sismiques.

nément, les systèmes de détection enregistrent les sons réfléchis par le fond et qui proviennent d'étroits couloirs sous-marins parallèles à la trajectoire du navire. Ainsi, les ultrasons captés par le navire proviennent des intersections entre la bande des sons émis et les couloirs d'écoute. Les échos sont enregistrés à des intervalles réguliers de quelques secondes pendant que le navire avance, et l'accumulation des données autorise la reconstruction du relief le long de la trajectoire du navire. En ratissant une zone par bandes, comme on tond une pelouse, on cartographie toute la région. Toutefois, les géophysiciens disposent de moins de 200 navires équipés du matériel nécessaire, de sorte qu'il leur faudrait plusieurs centaines d'années pour cartographier de cette façon la totalité des fonds sous-marins.

Le sonar à balayage latéral (c) fournit un autre aspect du fond de l'océan. L'équipement est habituellement monté sur un traîneau remorqué par le ba-

IMAGE PAR



L. Pratson et W. Ryan

ZONE DE LA
PHOTOGRAPHIE
SOUS-MARINE

5 KILOMÈTRES

teau. Deux sondeurs, fixés de chaque côté du traîneau fonctionnent à la fois comme sources d'ultrasons et comme dispositif d'enregistrement. Ces unités émettent obliquement vers le fond, de chaque côté

du traîneau. Quand le fond est plat et lisse, aucun écho n'est réfléchi vers le traîneau (comme un rayon de lumière dirigé obliquement sur un miroir). Au contraire, quand le fond marin est accidenté, les échos frappant le sol sont renvoyés dans toutes les directions, et notamment vers le sondeur (tout comme un rayon de lumière frappant un verre dépoli est diffusé dans toutes les directions). En reliant l'amplitude des échos enregistrés à différents niveaux de gris et en tenant compte de la position du traîneau, les géologues obtiennent une image de la texture du fond océanique qui ressemble à une photographie en noir et blanc. Toutefois, par rapport à une photographie aérienne, une image de sondeur à balayage latéral n'indique la hauteur des reliefs explorés.

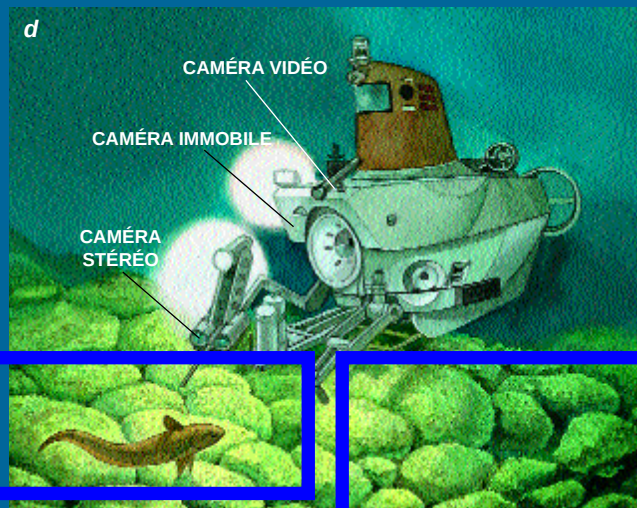
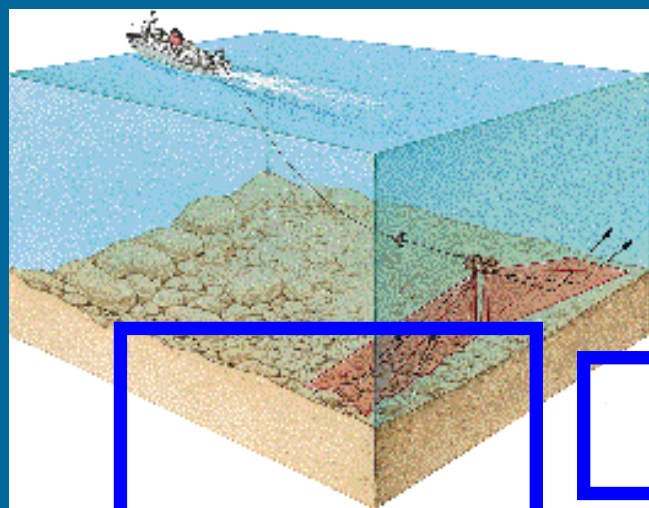
Les photographies sous-marines, obtenues grâce à des caméras remorquées sur le fond, à des submersibles téléguidés ou à des véhicules télécommandés, fournissent les vues les plus précises et les plus détaillées des fonds

PHOTOGRAPHIE SOUS-MARINE



L. Pratson

30 CENTIMÈTRES



Roberto Ossi

La cartographie sous-marine informe les géologues sur la façon dont les fonds des océans sont modelés par les contrastes de densité et de viscosité qu'ils sont soumis. Les images du relief océanique permettent aux scientifiques de découvrir d'un seul coup d'œil de vastes étendues sous-marines. On ne connaissait pas encore cet aspect de la Terre, alors que l'on avait déjà découvert la surface des planètes lointaines. L'évolution de la Terre est aujourd'hui à portée de regard.

Lincoln PRATSON travaille à l'Institut de recherche arctique et alpine, à l'Université du Colorado. William HAXBY travaille à l'Observatoire Lamont-Doherty de l'Université Columbia.

Swath Bathymetric Mapping, numéro spécial du *Journal of Geophysical Research*, vol. 19, n° B3, 10 mars 1986.

Peter R. VOGT et Brian E. TUCHOLKE, *Imaging the Ocean Floor: History and State of the Art*, in *Geology of North America*,

vol. M, *The Western North Atlantic Region*, sous la direction de P.R. Vogt et B.E. Tucholke, Geological Society of America, 1986.

Anny CAZENAVE et Kurt FEIGL, *Formes et mouvements de la Terre. Satellites et géodésie*, éditions Belin-CNRS, collection Croisée des sciences, 1994.

Lincoln F. PRATSON et William F. HAXBY, *What Is the Slope of the U.S. Continental Slope?*, in *Geology*, vol. 24, n° 1, pp. 3-6, janvier 1996.

Guêpes et apprentissage

JOAN VAN BAAREN • GUY BOIVIN • JEAN-PIERRE NÉNON

Au cours des quelques jours que dure sa vie, une minuscule guêpe parasitoïde apprend à trouver les meilleurs hôtes pour y pondre ses œufs. Cet apprentissage améliore son succès reproducteur.

Quelle est la part de l'instinct? Quelle est celle de l'acquis? A priori, on suppose que plusieurs conditions favorisent l'apprentissage : un cerveau développé, des soins parentaux attentionnés, une vie suffisante pour apprendre. La première toile qu'elle tisse, l'araignée reproduit instinctivement la trame spécifique de son espèce, et dès son premier voyage, le papillon monarque trouve seul la route de sa migration. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux capacités d'apprentissage d'une minuscule guêpe parasitoïde, *Anaphes victus*.

C'est un des plus petits Hyménoptères connus : il appartient à la famille des Mymaridés et est très répandu en Amérique du Nord. La femelle de cette espèce mesure à peine 0,5 millimètre et ne vit que deux à quatre jours. *Anaphes victus* est un insecte parasitoïde qui pond ses œufs dans ceux d'un insecte ravageur des cultures, le charançon de la carotte qui, au Canada, dévaste les cultures de carotte, de céleri et de persil. Contrairement aux parasites, les parasitoïdes tuent leurs hôtes : lorsque *Anaphes victus* pond un œuf dans un œuf de charançon, ce dernier est immédiatement détruit. *Anaphes victus* est utilisé dans la lutte biologique contre le charançon de la carotte au Sud de Montréal. Cette guêpe parasitoïde assure la destruction de la moitié des charançons de la carotte, ce qui permet aux agriculteurs, en combinant les diverses méthodes de lutte contre les ravageurs, de réduire notablement l'épandage des insecticides chimiques.

Or pour assurer son succès reproducteur, *Anaphes victus* doit sélectionner ses «proies» : elle

doit déposer chacun de ses œufs dans un œuf de charançon qui n'est pas encore parasité. Mais comment elle réagit-elle à la présence d'autres locataires de l'œuf. Comment fait-elle son choix? Comment apprend-elle à reconnaître les œufs parasités? Avant de l'expliquer, rappelons quelques données sur l'apprentissage chez l'animal.

Instinct et apprentissage

Dès qu'un animal est pourvu d'un système nerveux, même s'il n'a pas de cerveau différencié, une forme primitive d'apprentissage existe. C'est le cas des Cnidaires, qui regroupent les méduses, les anémones de mer et les coraux. Lorsqu'un éclair lumineux, les anémones de mer rétractent leurs tentacules, mais elles finissent par s'y habituer et par ne plus réagir. Les Mollusques (les huîtres, les escargots ou les pieuvres) sont sensibles à des formes d'apprentissage plus élaborées : les pieuvres, par exemple, apprennent à parcourir un labyrinthe ou à retirer des proies d'une

boîte. Plusieurs équipes ont montré que les insectes sont susceptibles d'apprendre, notamment les comportements associés à la recherche de nourriture et à celle des sites de reproduction. Plus l'environnement est variable, moins les comportements peuvent être déterminés génétiquement.

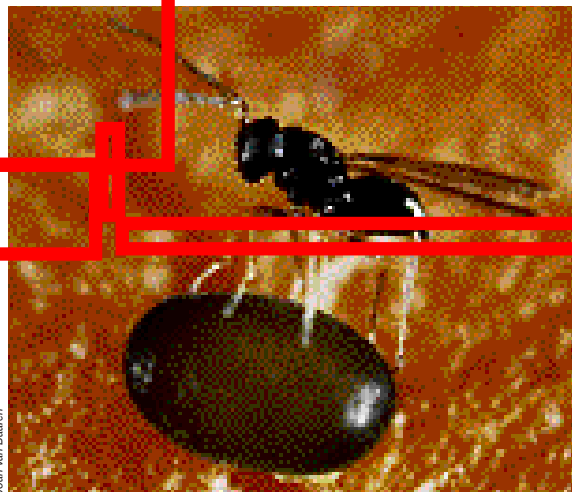
L'instinct – génétique – est le comportement qui se manifeste sous une forme complète et définitive dès que l'animal rencontre le stimulus environnemental.

Un changement au cours de la vie d'un insecte, mais peut se modifier d'une génération à l'autre : la sélection naturelle privilégie les individus dont les réactions instinctives sont mieux adaptées à l'environnement. À l'inverse, l'apprentissage est un changement adaptatif qui se produit au cours de la vie, à la suite des expériences vécues.

Toutefois, ces définitions sont controversées, et la distinction entre instinct et apprentissage n'est pas toujours judicieuse. Les comportements généralement considérés comme innés sont influencés par les expériences subies pendant le développement embryonnaire : les pucerons sont préférentiellement attirés par l'odeur des plantes sur lesquelles ils ont été élevés. De surcroît, les comportements instinctifs s'expriment parfois différemment.

Comportements innés : au terme de leur croissance, les larves des mouches cécidomyies s'enfouissent dans le sol et y tissent un cocon de soie, mais, si elles sont dans un milieu très humide, elles changent de comportement et tissent leur cocon sur les nervures des feuilles.

Les capacités d'apprentissage ne permettent pas aux ani-



Joan van Baaren

1. *ANAPHES VICTUS* prête à parasiter un œuf de charançon.

maux de tout apprendre : ainsi, les abeilles apprennent à s'orienter vers une source de nourriture en suivant une odeur. Elles sont également incapables quand l'odeur est répulsive. De nombreux insectes sont guidés par la lumière, mais, même après s'être brûlés, ils continuent d'apprendre à résister à l'attraction et finissent par en mourir. Tous les comportements observés sont un mélange d'influences génétiques et d'influences environnementales.

Généralement on subdivise l'apprentissage en plusieurs catégories : l'accoutumance, la sensibilisation et l'apprentissage associatif.

Différentes formes d'apprentissage

L'accoutumance est l'une des formes les plus simples et les plus générales d'apprentissage. Elle se caractérise par la disparition plus ou moins progressive d'une réaction lorsque le stimulus qui la suscitait est répété. C'est ce type d'habitation qui a été mis en évidence chez les Cnidaires. On peut ainsi habituer de nombreux insectes (des fourmis ou des mantes religieuses) à être manipulés et à ne plus manifester de comportement de défense quand on les saisit.

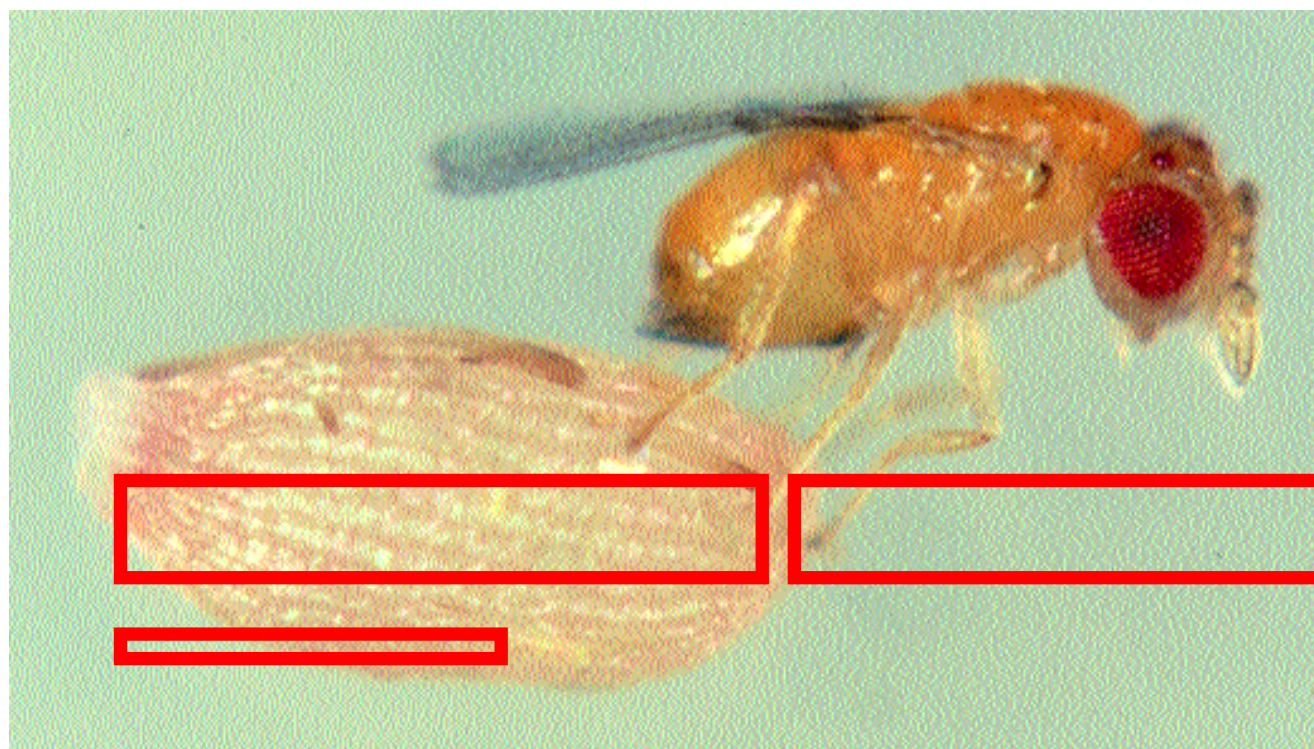
La sensibilisation est souvent considérée comme l'inverse de l'accoutumance : elle est caractérisée par une diminution graduelle de la réaction à un stimulus, après une exposition répétée à ce stimulus. Les insectes apprennent à mieux connaître leur environnement. Par exemple, des nymphes de criquets rejettent de plus en plus vite les feuilles d'un goût désagréable lorsqu'elles recherchent leur nourriture. Lors de leurs premiers repas, elles rejettent les feuilles après les avoir mordues, et par la suite elles les rejettent rien qu'en les palpat, avant même de les mordre.

L'apprentissage associatif repose sur un conditionnement classique ou sur un conditionnement opérant. Le conditionnement classique, où l'animal apprend à associer deux stimulus, a été mis en évidence par Pavlov : un chien salive quand on lui présente de la viande quand on lui fait entendre une cloche. Juste avant de lui présenter la viande et que l'on renouvelle l'expérience plusieurs fois, le chien finit par saliver dès qu'il entend la sonnerie ou qu'il voit le signal lumineux, même en l'absence de viande. La salivation, qui a lieu lors de la présentation de la viande, est un stimulus inconditionnel, tandis que le signal sonore ou lumineux est dit condi-

tionnel. Lorsqu'un rat apprend à conditionnement classique, par exemple, un rat assoiffé dans une petite cage où une cuillère contient une goutte de lait. L'animal explore la cage et trouve la cuillère. Ensuite, il peut marcher sur une pédale proche de la cuillère et qui y libère quelques gouttes de lait. L'animal comprend vite qu'en appuyant sur la pédale il obtient du lait : il est conditionné.

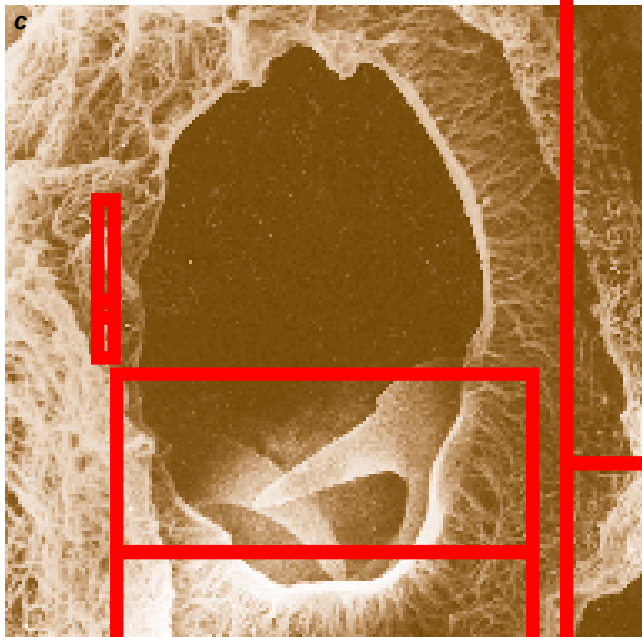
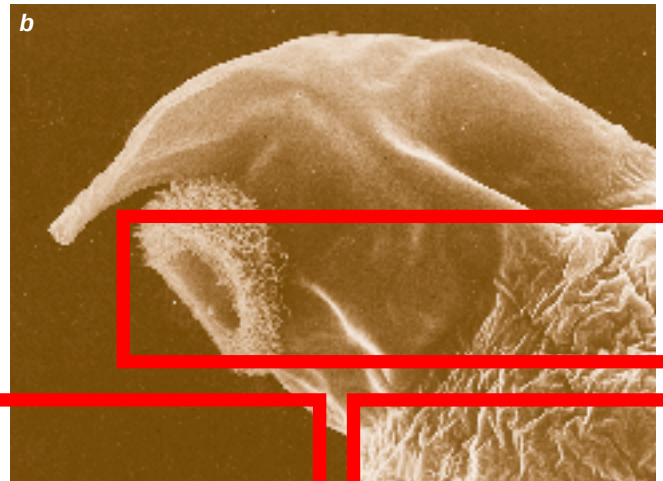
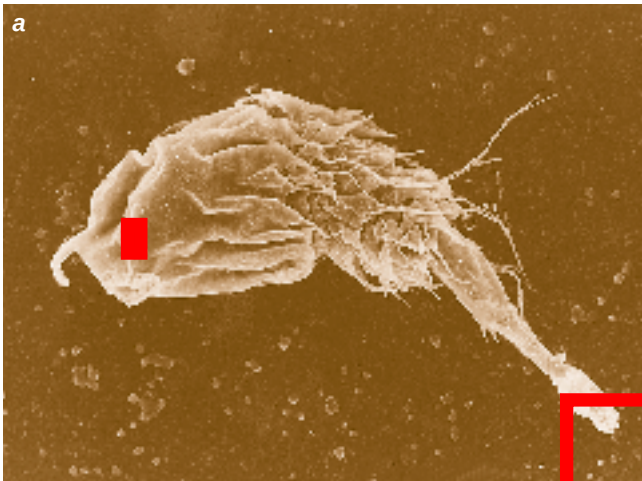
Chez les insectes, ces deux types d'apprentissage sont très fréquents. Un conditionnement classique explique l'origine de la sensibilisation du criquet : il associe un stimulus originellement neutre (par exemple, la forme ou la texture des feuilles) à leur goût désagréable. Le conditionnement opérant est probablement celui qui améliore l'efficacité des insectes à atteindre le nectar dont ils se nourrissent.

Toutefois, dans les conditions naturelles, il est parfois difficile de faire la différence entre les deux types de conditionnement. L'apprentissage associatif est souvent considéré comme une adaptation, car il améliore généralement la survie (l'accès à la nourriture) ou la fécondité. Néanmoins, un effet bénéfique à court terme peut avoir des conséquences négatives à long terme pour le même individu : l'acquisition d'une forte préférence pour



2. LES TRICHOGRAMMES sont des guêpes parasitoïdes proches d'*Anaphes victus*, qui servent à la lutte biologique contre de nombreux ravageurs des cultures. Ici un trichogramme parasite un œuf de *Sitotroga cerealella*, l'altène des céréales (agrandissement : 200).

En France, les trichogrammes servent aussi à la lutte contre la pyrale du maïs. La production française de ces insectes parasitoïdes permet de traiter 40 000 hectares de cultures de maïs. L'épandage de ces insectes se fait par avion.



3. LES LARVES D'ANAPHES VICTUS (a, x 500), qui mesurent à peine un dixième de millimètre sont voraces. Leur bouche (b, x 1 500) est pourvue de mandibules (c, x 7 500). Lorsqu'elles sont plusieurs dans un œuf de charançon, la première larve qui éclôt détruit les autres. Pour s'assurer le meilleur succès reproducteur possible, les guêpes *Anaphes victus* doivent pondre un seul œuf par œuf de charançon.

en fonction du nombre de tentatives, on observe une augmentation rapide, puis la courbe tend vers une asymptote. Au-delà de cette valeur asymptotique, le

giste plus aucun progrès : l'apprentissage est terminé. Ce critère exclut les apprentissages qui se produisent

tel *Anaphes victus*, apprennent à reconnaître les odeurs de leur descendance.

La plupart des insectes parasitoïdes appartiennent à l'ordre des Hyménoptères, qui comporte les abeilles, les guêpes et les fourmis, mais la plupart des espèces d'Hyménoptères ont un mode de vie parasitoïde.

80 000 espèces de parasitoïdes.

Les Hyménoptères parasitoïdes ont une vie adulte généralement courte, de quelques jours à quelques mois. Les adultes émergent, s'accouplent, et les femelles partent ensuite à la recherche d'autres insectes, notamment des œufs et des larves de papillons et de coléoptères, où elles pondent leurs œufs.

L'apprentissage chez les parasitoïdes

Comment les femelles d'Hyménoptères trouvent-elles leurs hôtes ? La sélection naturelle a favorisé les hôtes qui émettent peu d'odeurs, car les femelles de parasitoïdes les trouvent moins facilement ; elle a aussi sélectionné les femelles de parasitoïdes qui détectent

indices de la présence des hôtes (hormis leur odeur). Les parasitoïdes reconnaissent notamment les odeurs des plantes dont se nourrissent leurs hôtes.

Lorsqu'elles émergent, les femelles cherchent au hasard des hôtes dans l'environnement ; lorsqu'elles en rencontrent, elles y déposent leurs œufs et recherchent ensuite préférentiellement

une plante peut augmenter le taux de survie de l'animal tant que cette plante est présente en abondance dans l'environnement, mais cette préférence peut être fatale si l'animal se déplace et ne retrouve pas la même plante.

Quand peut-on parler d'apprentissage chez les insectes ? Selon Daniel Papaj, de l'Université de Tucson, et Ronald Prokopy, de l'Université d'Amherst, aux États-Unis, quand on constate, premièrement, qu'un changement de comportement consécutif à une expérience se reproduit chez plusieurs individus de la même espèce. Ce critère

exclut les changements de comportement qui se produisent accidentellement chez un seul individu. Deuxièmement, le changement de comportement doit être graduel et doit se produire petit à petit sous l'effet d'une stimulation permanente. Quand on trace une courbe d'apprentissage en portant l'évolution de la performance

à l'issue d'un unique essai et pour lesquels les essais complémentaires modifient peu la performance.

Enfin, on doit observer que le changement de comportement appris doit pouvoir se renforcer : après une nouvelle expérience, un insecte change son comportement. Ce critère exclut les mécanismes de maturation immédiats et irréversibles qui sont déclenchés par un événement comme l'accouplement. Toute expérience qui produit un changement de comportement progressif

L'apprentissage a surtout été étudié chez les insectes sociaux, tels que l'abeille. Pour cette espèce, l'apprentissage est utilisé lors de la phase de recherche de fleurs productrices de nectar et de pollen ainsi que pour la navigation vers la nourriture et vers la ruche. On a récemment découvert que les insectes prédateurs ou parasitoïdes,

l'odeur de la plante associée pour trouver d'autres hôtes. C'est un exemple d'apprentissage associatif : les femelles associent l'odeur d'une plante, généralement facile à repérer, à la présence d'un insecte particulier, leur hôte, dont l'odeur n'est pas détectable à distance.

La découverte de l'existence d'un apprentissage associatif dans la phase de recherche de l'hôte chez les Hyménoptères

pose la question : les capacités d'apprentissage sont-elles identiques chez tous les insectes parasitoïdes ? Il existe des espèces dites généralistes, qui s'attaquent à différents insectes et qui se développent sur une grande variété de plantes, et des espèces spécialistes qui ne pondent que dans une espèce unique d'insectes.

On a donc supposé que les capacités d'apprentissage devaient être plus développées chez les espèces généralistes qui mémorisent l'odeur de toutes les plantes contenant des hôtes potentiels. Inversement, chez les espèces spécialistes, les capacités d'apprentissage devaient être moins importantes, les insectes n'ayant devant retenir que l'odeur d'une plante unique.

En fait, en 1992, l'équipe de Louise Vet, de l'Université de Wageningen, aux Pays-Bas, a montré que les espèces spécialistes et les espèces généralistes ont des capacités d'apprentissage

similaires, mais qu'elles ne les utilisent pas de la même façon. Cette équipe a comparé différentes espèces de parasitoïdes de drosophiles : les unes, généralistes, recherchent leurs hôtes sur divers types de substrats (des fruits fermentés, des plantes ou des champignons pourris-sants), tandis que les autres, spécialistes, ne les recherchent que sur un seul type

de ces substrats. Ces entomologistes ont montré que les espèces généralistes «mémorisent» chaque type de substrat rencontré, tandis que les espèces spécialistes n'y recherchent et ne mémorisent un nouveau substrat qu'à partir du moment où celui-ci n'est plus disponible.

Ainsi, les mécanismes d'apprentissage sont activés lors de la recherche de l'hôte (ou du substrat), mais nous avons montré, avec *Anaphes victus*, que ces mécanismes sont également activés lors de la sélection de l'hôte. Nous avons observé que le comportement change au cours de cette phase de sélection.

Quand une femelle arrive sur une zone où des charançons ont déposé des œufs, elle commence leur développement de ses propres larves. Or, d'autres femelles ont peut-être déjà exploité cette zone et pondus dans les œufs présents ; une seule larve de parasitoïde peut se développer dans un œuf de charançon. Si plusieurs larves éclosent dans un même œuf, elles se combattent jusqu'à ce qu'il n'en reste qu'une.

C'est généralement la larve la plus âgée, celle qui ponde le plus vite, qui survit et tue les autres. Au moment de la ponte, les femelles déposent sur les hôtes une phéromone (une odeur) afin de ne pas pondre dans le même hôte, évitant ainsi les hôtes déjà parasités.

Jusqu'à présent, on pensait que la reconnaissance de cette phéromone était instinctive. La reconnaissance des hôtes parasités semblait dépendre d'une seule phéromone, peu variable. Or, nous

avons montré qu'il existe chez *Anaphes victus* différentes phéromones de marquage. Les femelles reconnaissent les hôtes déjà parasités grâce à une phéromone déposée à la surface de l'hôte et détectée à l'aide de récepteurs sensoriels

chimiques. Cette phéromone varie d'un individu à l'autre. Les femelles déposent aussi à l'intérieur de l'hôte une phéromone interne, bien qu'elle soit variable, et cette molécule est reconnue par tous les individus de l'espèce. Cette seconde phéromone est détectée par des récepteurs sensoriels placés sur l'ovipositeur, l'organe de ponte.

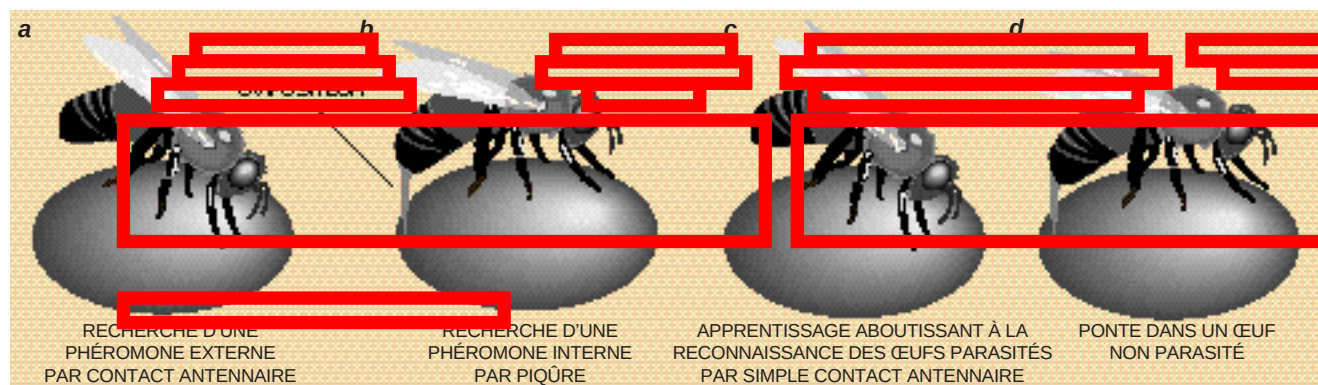
La stratégie de ponte d'*Anaphes victus*

Lorsqu'une femelle d'*Anaphes victus* rencontre un hôte potentiel, elle le palpe avec ses antennes. Si elle perçoit une phéromone externe indiquant que l'hôte a déjà été parasité par elle-même, elle rejette l'hôte après ce simple contact antennaire. Un rejet antennaire dure 2,5 secondes en moyenne. Si elle ne perçoit pas de phéromone externe, elle

proceeds to probe the host with its ovipositor. Or bien elle perçoit une phéromone interne indiquant que l'hôte a déjà été parasité par une femelle congénère et elle abandonne l'hôte : il s'agit d'une piqûre

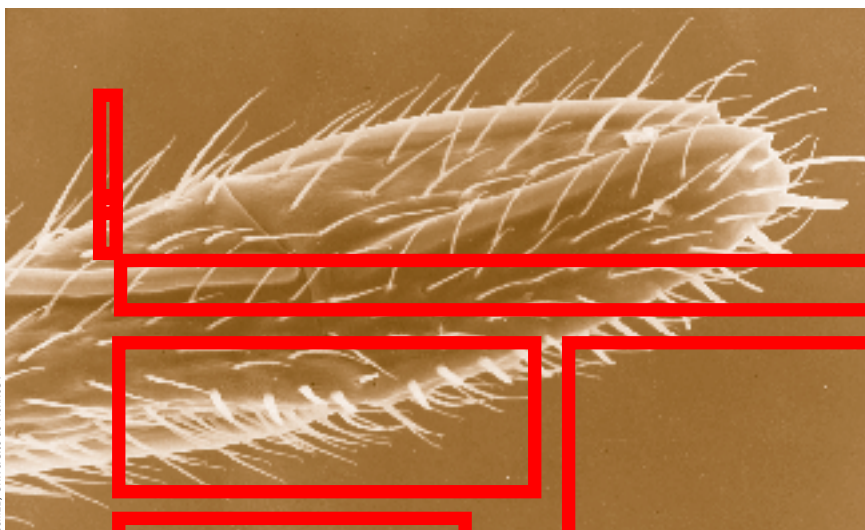
qui dure en moyenne 49 secondes. Ou bien elle ne perçoit pas de phéromone et elle dépose un œuf : cette phase, la ponte ou l'oviposition, dure en moyenne deux minutes.

Les femelles d'*Anaphes victus* ont environ 50 œufs à pondre au cours des deux jours de leur existence (elles les pondent généralement le premier jour). Lorsqu'on présente de nombreux œufs



4. LA STRATÉGIE DE PONTE D'*ANAPHES VICTUS* : après avoir trouvé des œufs de charançons, la femelle recherche, par contact antennaire (a), une éventuelle phéromone externe qui lui indiquerait qu'elle a déjà parasité l'œuf. En l'absence de phéromone externe, elle recherche une phéromone interne (indiquant que l'œuf a été parasité par une

autre femelle) en introduisant son organe de ponte, l'ovipositeur, dans l'œuf (b). Au bout de quelques essais, elle apprend à reconnaître les œufs parasités par d'autres femelles uniquement par contact antennaire (c). Elle rejette rapidement les hôtes parasités et pond ses propres œufs dans les œufs de charançons «libres» qu'elle rencontre (d).



5. LES RÉCÉPTEURS «GUSTATIFS» SITUÉS SUR LES ANTENNES d'*Anaphes victus* permettent à ces guêpes de détecter rapidement si les œufs de charançons sont déjà parasités (x 1 200).

de charançons aux femelles d'*Anaphes victus*, elles peuvent pondre jusqu'à une trentaine d'œufs sans s'arrêter, partant à la recherche d'un nouvel hôte dès qu'elles en ont parasité un.

Reconnaissance par contact antennaire

L'apprentissage se manifeste lors de cette séquence de ponte. Quand on présente à une femelle d'*Anaphes victus* un mélange d'hôtes sains et d'hôtes parasités par des femelles congénères, elle rejette les premiers hôtes parasités qu'elle rencontre après une piqûre sans ponte. Ensuite, elle reprend les rejets antérieures infructueuses avec des hôtes parasités : elle les rejette après un simple contact antennaire. La femelle apprend à associer l'odeur de la phéromone interne qui est spécifique et qu'elle reconnaît dès la première rencontre à l'odeur de la phéromone externe individuelle qui, initialement, ne produit aucune réaction.

Après quelques essais, elle décèle qu'un hôte est parasité uniquement grâce à ce nouveau stimulus. Cet apprentissage a toutes les caractéristiques d'un apprentissage associatif : la phéromone externe est le stimulus conditionnel qui déclenche la réaction, et la phéromone interne est le stimulus inconditionnel.

Les femelles qui acquièrent ce conditionnement peuvent-elles l'oublier, condition nécessaire pour que l'on parle d'apprentissage ? Quand on isole une femelle en la retirant de la zone de l'expérience au moment où elle rejette tous les hôtes après un simple contact anten-

naire et qu'on la remet dans une zone identique au bout de quatre heures (rappelez-vous qu'elle ne vit, en moyenne, que 48 heures), elle se comporte comme une femelle qui n'a jamais appris. Elle rejette d'abord les hôtes parasités après une piqûre sans ponte, puis, au bout d'environ dix rencontres avec des hôtes parasités, un simple contact antennaire suffit : la femelle a totalement oublié le comportement appris et doit tout réapprendre. Au contraire, quand on isole la femelle pendant 30 minutes seulement, elle rejette les premiers hôtes parasités rencontrés après une piqûre sans ponte, mais, dès la deuxième rencontre, elle reprend les rejets antérieurs : elle «réapprend» beaucoup plus vite, car elle n'a pas totalement oublié sa première expérience. Cette durée de rétention d'information, ici d'environ quatre heures, correspond sans doute à la durée d'exploration d'une zone d'habitat : il est avantageux d'oublier la phéromone d'un hôte parasité quand on le quitte pour en explorer une nouvelle. Dans la nouvelle zone, une femelle *Anaphes victus* ne rencontrera vraisemblablement pas d'œufs parasités par la même congénère. Comme ces insectes ont une capacité de rétention des informations limitée, l'oubli des informations précédentes empêche les femelles d'en stocker de nouvelles.

Quel est le rôle de cet apprentissage ? Une génération vit environ onze jours au stade larvaire et deux jours au stade adulte, de sorte que de nombreuses générations se succèdent pendant le printemps et l'été. Le nombre de femelles d'*Anaphes victus* augmente à mesure que celui des œufs de charançons diminue.

La possibilité de rencontrer des hôtes parasités dépend de la date d'émergence des femelles. Quand elle éclôt à la fin de l'été, par exemple, elle est en compétition avec d'autres femelles. Lors d'une telle compétition, la femelle qui trouve le plus vite des œufs non parasités qui ont le plus de chances de survivre : la reconnaissance par contact antennaire étant près de 20 fois plus rapide qu'une reconnaissance par piqûre sans ponte, l'apprentissage favorise la survie. C'est aussi aux femelles dans leur recherche d'hôtes sains pour leurs œufs.

Ainsi, l'apprentissage est utilisé dans toutes les circonstances de la vie : la recherche de nourriture, de partenaires sexuels, le soin aux jeunes, les interactions entre individus de la même espèce, la navigation ou encore la défense contre les ennemis.

Diverses questions restent ouvertes : l'apprentissage est-il apparu de façon indépendante chez toutes les espèces sous l'influence de pressions de sélection qui ont déclenché le même type de comportement ? Est-il déjà chez un même ancêtre commun ? Les diverses formes d'apprentissage dont sont dotées les différentes espèces sont-elles équivalentes ? Existe-t-il une forme supérieure d'apprentissage dont seuls les hommes et quelques mammifères seraient capables ? La seule étude du minuscule insecte *Anaphes victus* n'apporte pas toutes les réponses !

Joan VAN BAAREN est maître de conférences dans l'unité CNRS UMR 6552, à l'Université de Rennes I, où Jean-Pierre NÉNON dirige le Laboratoire de bioécologie des parasitoïdes. Ces recherches ont été réalisées dans le Laboratoire d'écophysiologie des parasitoïdes Agriculture et Agroalimentaire Canada, dirigé par Guy BOIVIN, à Saint-Jean-sur-Richelieu, au Québec.

Insect Learning : Ecological and Evolutionary Perspectives, sous la direction de D.L. Papaj et A.C. Lewis, éditions Chapman and Hall, 1993.

J. VAN BAAREN, G. BOIVIN et J.-P. NÉNON, *Learning Affects how Anaphes n. s. Discriminates between Parasitoids*, in *Entomol. exp. appl.*, vol. 16, pp. 392-393, 1994.

J. VAN BAAREN, G. BOIVIN et J.-P. NÉNON, *Intra- and Interspecific Host Discrimination in two Closely Related Egg Parasitoids*, in *Oecologia*, pp. 325-330, 1994.

SOHO révèle les secrets du Soleil

KENNETH LANE

L'Observatoire solaire et héliosphérique SOHO est un nouvel engin spatial qui étudie le Soleil sans relâche depuis février 1996. Ses observations révèlent la vie secrète de notre étoile.

De loin, le Soleil ne semble pas très compliqué : c'est seulement une sphère de gaz uniforme et lisse. Toutefois, un examen détaillé montre que l'étoile est en constante agitation, ce qui entretient maints mystères fondamentaux. Par exemple, les astrophysiciens ne comprennent pas comment le Soleil engendre son champ magnétique, principal responsable de l'activité solaire et, notamment, des éruptions imprévisibles qui provoquent des orages magnétiques et des sautes d'électricité sur la Terre. Ils ignorent également pourquoi ce magnétisme se concentre dans les taches solaires, ces zones d'ombres aussi grandes que la Terre et des milliers de fois plus aimantées. De surcroît, les astrophysiciens n'expliquent pas les variations de l'activité solaire, avec une période de onze ans environ.

Pour mieux comprendre le fonctionnement du Soleil et mieux prédire son impact sur notre planète, l'Agence spatiale européenne et la NASA ont lancé, le 2 décembre 1995, une sonde de deux tonnes nommée SOHO, acronyme anglais d'observatoire solaire et héliosphérique. Le 14 février 1996, le satellite a atteint une position stable à l'intérieur du Soleil, au point de Lagrange interne, situé à environ un pour cent de la distance Terre-Soleil. En ce point, les attractions que la Terre et le Soleil exercent sur la sonde se compensent, et SOHO tourne autour du Soleil en même temps que la Terre. Alors que le Soleil était périodiquement caché à la vue des satellites précédents, qui étaient en orbite autour

de la Terre, SOHO observe le Soleil en permanence avec ses douze instruments sensibles. Chaque jour, les instruments transmettent, via les antennes du réseau spatial de la NASA, des milliers d'images au Centre opérationnel SOHO, dans le Maryland.

Là, les astrophysiciens du monde entier travaillent ensemble, observant le Soleil nuit et jour dans une pièce sans fenêtres. Lorsque les premières images arrivèrent, le Soleil était dans la phase la plus calme de son cycle

de onze ans. Comme SOHO contient suffisamment de carburant pour durer en opération pendant encore une dizaine d'années au moins, il suivra l'évolution de l'activité solaire durant un cycle complet, jusqu'au prochain maximum solaire, qui se produira à la fin du siècle. Déjà, SOHO nous a gratifiés de découvertes surprenantes.

Les profondeurs du Soleil

Afin de comprendre les cycles du Soleil, les astronomes cherchent à en sonder les profondeurs qui engendrent le magnétisme. Comment accéder à ces régions invisibles ? En étudiant les vibrations du Soleil. À la manière d'une gigantesque cloche,

le Soleil vibre en permanence. On peut dire ses vibrations en observant les mouvements de sa surface visible, la photosphère. Ces oscillations, dont l'amplitude atteint des dizaines de kilomètres et la vitesse quelques centaines de mètres par seconde, sont associées à des ondes sonores qui se propagent à l'intérieur de l'astre. Ces ondes sont piégées dans le Soleil,

parce qu'elles n'ont pas, dans le vide quasi absolu de l'espace, de support de propagation. Lorsqu'elles se réfléchissent contre la surface et replongent dans le Soleil, elles perturbent les gaz (ionisés, les gaz chauds du Soleil forment un plasma), les soulevant et les abaissant lentement avec une période d'environ cinq minutes.

L'œil ne perçoit pas les vibrations engendrées, mais les détecteurs de SOHO sont sensibles. La caméra Doppler Michelson (MDI) et l'enregistreur d'oscillations globales de basses fréquences (GOLF) mesurent la vitesse des oscillations superficielles avec une précision supérieure à un millimètre par seconde. Un troisième instrument surveille un autre effet des ondes sonores : lorsque ces ondes traversent les gaz, les régions solaires émettrices de lumière, l'astre tout entier clignote comme un stroboscope géant. À bord de SOHO, le système VIRGO (variabilité de la luminosité solaire et oscillations gravitationnelles) enregistre ces variations d'intensité qui ne représentent que des fractions de l'éclat moyen du Soleil.

Les oscillations de surface résultent de l'effet combiné d'environ dix millions d'ondes sonores, qui se propa-

gent à une vitesse particulière unique. Ainsi, pour caractériser physiquement toute l'étoile — de la zone convective bouillonnante, qui s'étend sur 28,7 pour cent du rayon à partir de la surface, jusqu'au cœur, en passant par la zone radiative — les astronomes cherchent à déterminer avec précision la fréquence de toutes les ondes (voir la figure 2).

La vitesse de chaque onde sonore dépend de la composition et de la position des régions solaires qu'elle traverse. Les scientifiques de la mission SOHO précisent la vitesse du son à l'aide d'un modèle numérique. Ils utilisent les petites différences entre la vitesse du son calculée et celle qui est mesurée pour affiner le modèle et établir la variation radiale de température, de densité et de composition du Soleil.

Après plus d'un an de fonctionnement, GOLF est l'instrument le plus performant pour sonder le cœur du Soleil, siège des réactions de fusion nucléaire.

déjà détecté plus de 100 types d'ondes acoustiques pénétrant dans les 20 pour cent les plus centraux du Soleil. À l'aide de ces mesures, on déduit la vitesse du son dans la partie centrale avec une précision relative meilleure que un pour dix mille, et on pourra ainsi calculer les profils de densité et de rotation dans le cœur nucléaire.

Avec le télescope MDI, les différences entre les prévisions théoriques et les observations sont inférieures à 0,2 pour cent, mais les zones où l'on observe ces différences sont importantes : à la frontière du cœur producteur d'énergie et sous la zone convective. Dans ces zones, un mélange de matière expliquerait les différences.

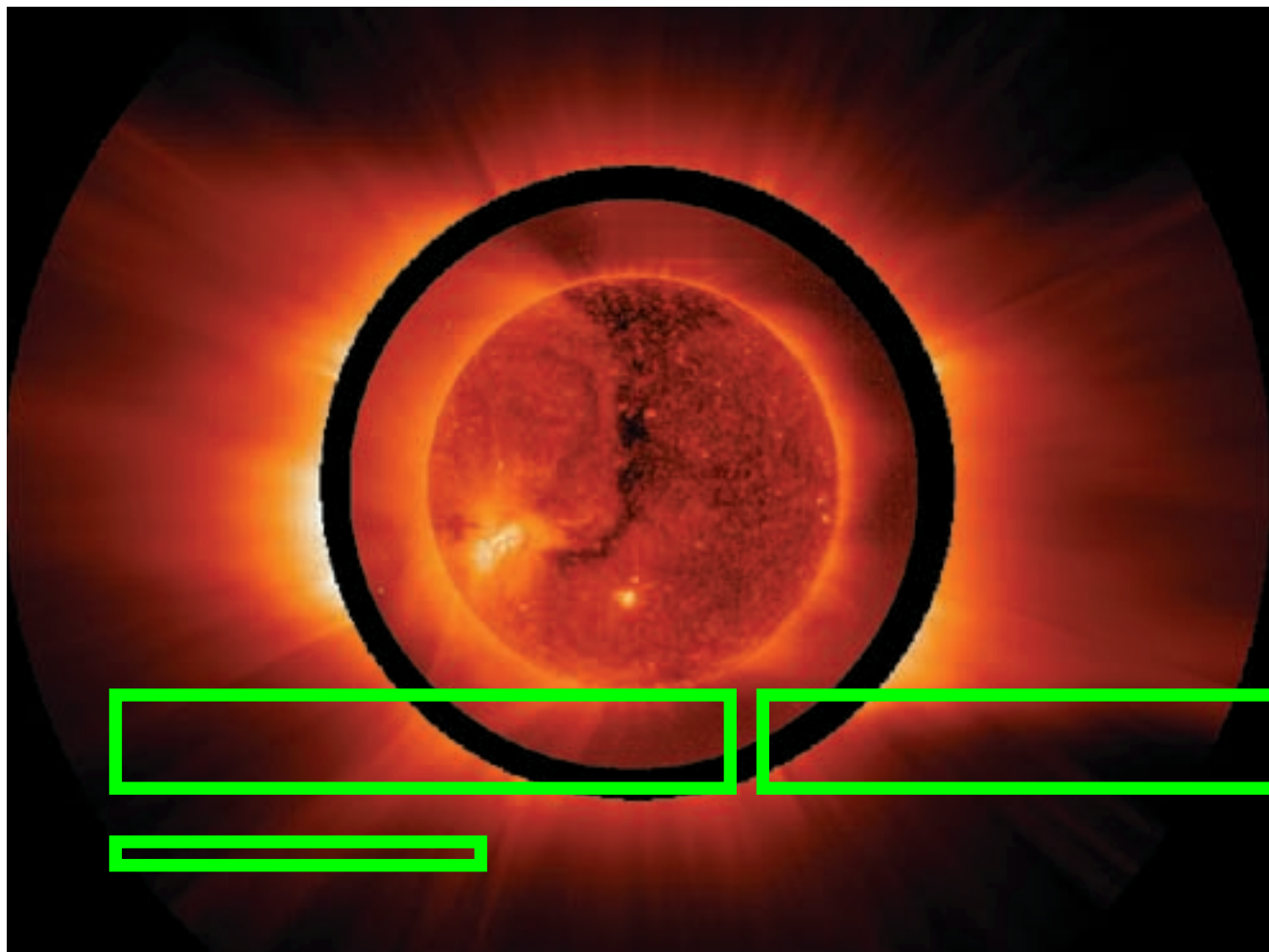
Depuis plus de trois siècles, l'observation des taches solaires montre aux astronomes que la photosphère tourne plus vite à l'équateur, la vitesse décroissant régulièrement vers

les pôles. Les données de GOLF montrent que cette répartition des vitesses de rotation persiste dans la zone convective. En revanche, la vitesse de rotation est identique pour tous les points situés à moins d'un tiers du rayon. La vitesse de rotation change donc brusquement à la base de la zone convective. Là, les zones périphériques de l'intérieur radiatif,

qui tournent à une vitesse constante, rencontrent la zone convective, qui tourne plus vite à l'équateur. Le cisaillement à l'interface serait la source du magnétisme solaire.

Le télescope MDI a également sondé les couches externes du Soleil. Affranchi des perturbations atmosphériques qui gênent les télescopes terrestres, ce télescope suit en direct des détails invisibles du sol. Il s'est révélé particulièrement efficace en héliosismologie spatiale temporelle, une technique de mesure des mouvements gazeux

sous de la photosphère. La méthode est simple : avec le télescope, chaque minute, on mesure les faibles variations périodiques de la longueur d'onde de la lumière émise en des millions de points du Soleil, dus au décalage Doppler (la longueur d'onde du rayonnement émis par une source augmente ou diminue, respective-



1. DEUX INSTRUMENTS DU SATELLITE SOHO ont enregistré les données à partir desquelles on a créé cette image de l'atmosphère externe du Soleil, de la base de la couronne jusqu'à des millions de kilomètres au-dessus de la surface solaire. À l'extérieur de l'anneau

noir, le vent solaire est visible grâce aux ultraviolets émis par les ions oxygène. Le vent solaire est plus rapide quand il provient des trous coronaux qui apparaissent comme des régions sombres au pôle Nord (*en haut*) et au centre du disque solaire.

ment, selon que la source s'éloigne ou se rapproche de l'observateur). En comparant les répartitions successives de variation, on détecte la propagation des ondes sonores et l'on détermine leur vitesse à travers les couches externes du Soleil. Ce temps de propagation

et l'écoulement de gaz le long d'un chemin interne reliant deux points de la surface visible du Soleil, car les ondes sonores se propagent d'autant plus vite que la température locale est élevée ; en outre, elles sont plus rapides quand elles se propagent dans la même direction que leur milieu de propagation.

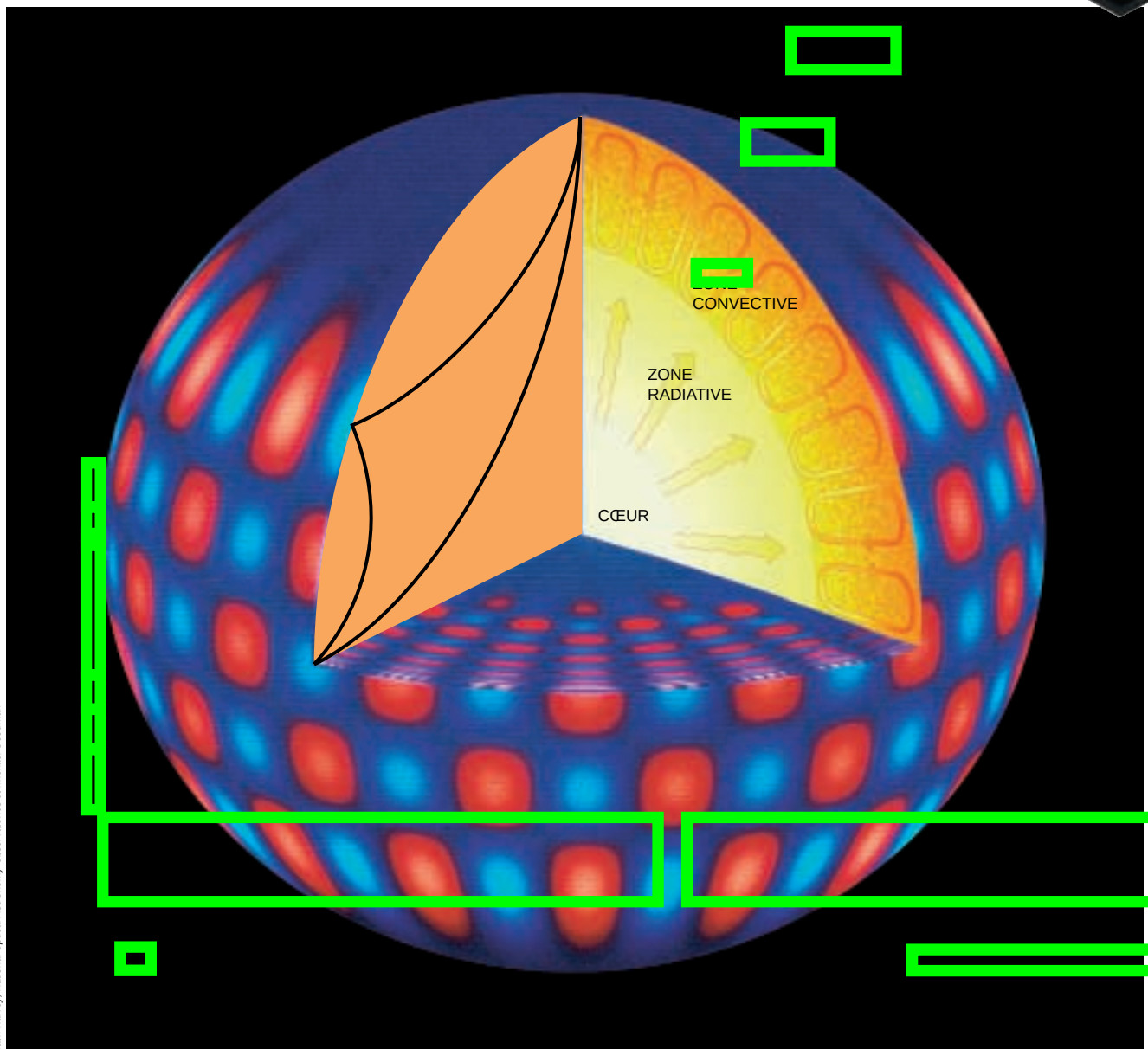
Après avoir observé des myriades de points à la surface du Soleil, le télescope MDI a fourni des temps de propagation pour des sons parcourant des milliers de chemins. Les scientifiques de SOHO ont alors utilisé ces données pour déterminer la structure interne du Soleil : à l'aide de programmes analogues à ceux des tomo-

graphes médicaux, des superordinateurs ont calculé pendant une semaine pour produire les premières cartes montrant les vitesses de convection au sein d'une étoile. Les écoulements ne sont pas des mouvements d'ensemble, telles les rotations déjà

évoquées, mais plutôt de petits déplacements qui semblent indépendants. Même ainsi, leur vitesse atteint un kilomètre par seconde, supérieure à celle d'un avion supersonique.

Pour déterminer les écoulements dans la zone convective, l'équipe

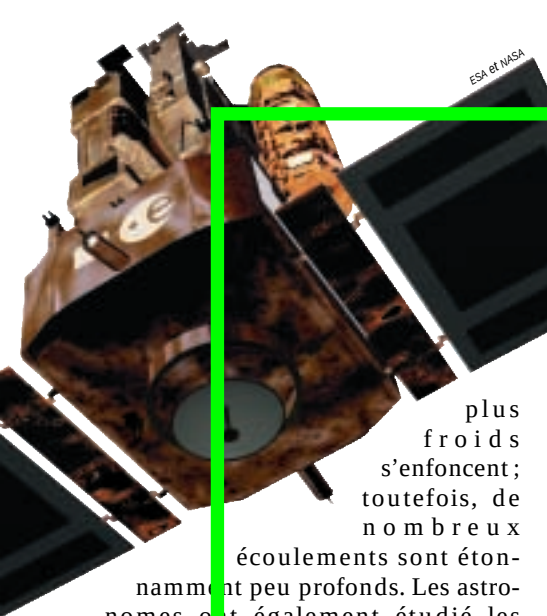
pour des ondes parcourant une distance d'environ 8 000 kilomètres dans le Soleil. Comme prévu, cette région tumultueuse ressemble à une casserole d'eau bouillante : la matière chaude s'élève, et les gaz



Jack Harvey, National Optical Astronomy Observatories et Michael Goodman

2. LES ONDES SONORES, représentées ici par des lignes noires dans la section découpée, résonnent à travers le Soleil. Elles sont produites par les turbulences du gaz chaud à la surface de la zone convective, qui surmonte la zone radiative et le cœur du Soleil. Lorsque les ondes

traversent le centre de l'étoile, elles accélèrent et sont réfractées vers l'extérieur. La surface du Soleil, elle, réfléchit les ondes vers l'intérieur. Finalement, l'étoile entière palpite, certaines régions se creusant (*taches rouges*), tandis que d'autres se bombent (*taches bleues*).



plus froids s'enfoncent ; toutefois, de nombreux écoulements sont étonnamment peu profonds. Les astronomes ont également étudié les déplacements horizontaux à une profondeur d'environ 1 400 kilomètres et ils ont superposé les cartes de ces déplacements aux cartes du champ magnétique également obtenues par l'instrument.

Le champ magnétique est particulièrement intense dans les régions où convergent les écoulements de gaz, sous la surface. Ainsi, le gaz bouillonnant rassemble probablement les lignes de champ magnétique et les concentre, surmontant la pression magnétique antagoniste qui devrait disperser ces concentrations locales.

SOHO révèle également la structure de l'atmosphère externe du Soleil et, en particulier, de la couronne. La bordure nette du disque solaire est illusoire : elle n'indique que le rayon au-delà duquel le gaz solaire devient transparent. La couronne, invisible, s'étend jusqu'aux planètes et présente l'un des paradoxes les plus intrigants de la physique solaire : bien que la température de la photosphère ne soit égale qu'à 5 500 °C, la partie de la couronne qui est au-dessus est à une température supérieure à un million de degrés. Comme la chaleur ne peut migrer d'une région froide vers une région plus chaude (le deuxième principe de la thermodynamique serait violé, ainsi que le deuxième), un mécanisme inconnu doit transporter de l'énergie de la photosphère, ou d'une région inférieure, vers la couronne.

Quelle forme d'énergie ? L'énergie cinétique et l'énergie magnétique peuvent passer d'une zone froide à une zone chaude : des volutes de gaz et des mouvements du champ magnétique pourraient transporter cette énergie.

Pour étudier la couronne et identifier son mystérieux mécanisme de chauffage, les physiciens observent

Les instruments de SOHO

Des centaines d'astrophysiciens de toutes nationalités étudient le Soleil à l'aide de 12 instruments embarqués sur SOHO. Trois dispositifs sondent l'intérieur du Soleil, six mesurent l'atmosphère solaire, et trois examinent le vent solaire.

INSTRUMENT	EXPÉRIENCE	RESPONSABLE PRINCIPAL
GOLF	Le dispositif pour la mesure des oscillations globales de basses fréquences mesure la vitesse des oscillations globales au sein du Soleil	Alan Gariau, Institut d'astrophysique spatiale, France
VIRGO	Instrument pour l'étude de la variabilité de l'activité solaire et des oscillations de gravité mesurées par les fluctuations de l'éclat du Soleil, ainsi que la quantité d'énergie émise	Günter Scholer, Observatoire physique météorologique de Davos et Centre mondial du rayonnement, Suisse
SOLAR MDI	La caméra Doppler Michelson pour l'étude des oscillations mesure la vitesse des oscillations produites par les sons piégés dans le Soleil	Philip Scherrer, Université Stanford, États-Unis
SUMER	L'instrument de mesure du rayonnement ultraviolet émis par le Soleil fournit des données sur la température, la densité et la vitesse de divers gaz dans la chromosphère et la couronne	Klaus Wilhelm, Institut d'aéronomie Max Planck, Allemagne
CDS	Le spectromètre de diagnostic coronal mesure la température et la densité des gaz dans la couronne	Richard Harnden, Laboratoire Radcliffe Appleton, Royaume-Uni
EIT	Le télescope à imagerie en ultraviolet lointain donne les images du disque complet de la chromosphère et de la couronne	Jean-Pierre Delaboudinière, Institut d'astrophysique spatiale, France
UVCS	Le spectromètre à coronagraphie ultraviolet mesure la température et la vitesse des atomes d'hydrogène, d'oxygène et d'autres ions dans la couronne	John Kohl, Observatoire d'astrophysique Smithsonian, États-Unis
LASCO	Le coronographe spectroscopique à grande ouverture fournit des images qui révèlent l'activité, la masse, la quantité de mouvement et l'énergie de la couronne	Guenter Brueckner, Laboratoire de recherches de la marine, États-Unis
SWAN	Grâce à l'expérience de mesure des anisotropies du vent solaire, on étudie les variations spatiales et temporelles du vent solaire	Jean-Loup Bertaux, Service d'aéronomie du CNRS, France
CEAS	Le système d'analyse des charges, éléments et isotopes quantifie la masse, la charge, la composition et la distribution d'énergie des particules du vent solaire	Peter Enck, Université de Berne, Suisse
OSTEP	L'analyseur de particules suprathermiques et énergiques détermine la répartition d'énergie des protons, des ions hélium et des électrons	Horst Kunow, Université de Kiel, Allemagne
ERNE	L'expérience «noyaux et électrons de haute énergie et relativistes» mesure la répartition d'énergie et la composition isotopique des protons, d'autres ions et des électrons	Jarmo Torsti, Université de Turku, Finlande



les rayonnements ultraviolets et X, car la matière chaude, comme celle de la couronne, émet la plus grande partie de son énergie à ces longueurs d'onde. Comme la photosphère est trop froide

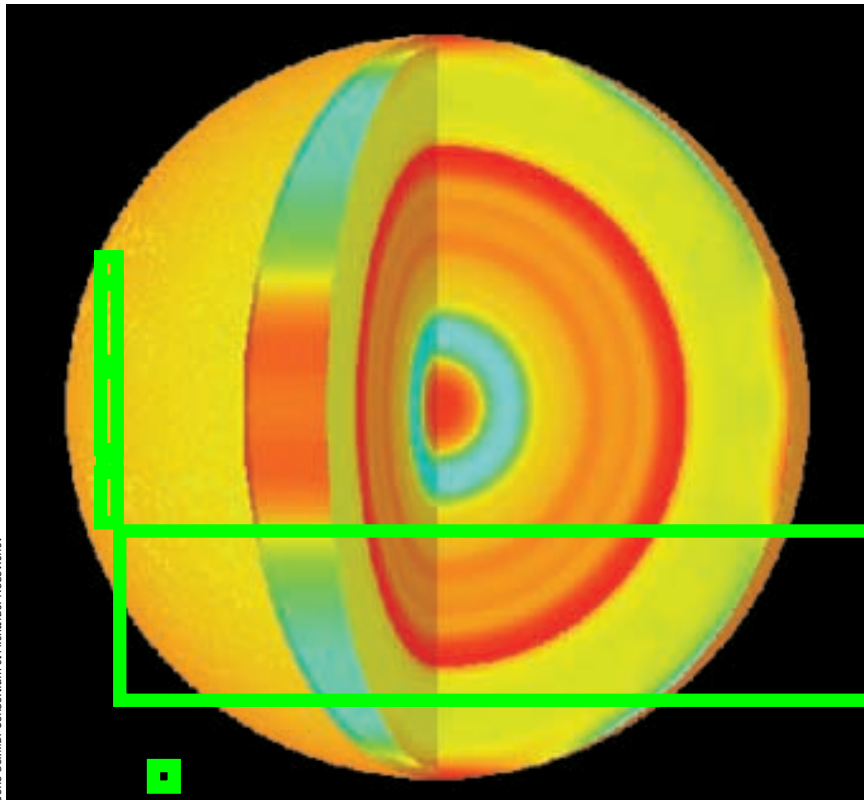
pour rayonner intensément à ces longueurs d'onde, elle forme un fond sombre sous la lumière du gaz chaud. De la Terre, les rayonnements de la couronne sont invisibles parce qu'ils

sont absorbés par l'atmosphère terrestre. SOHO, lui, mesure le rayonnement ultraviolet au moyen de quatre instruments : le télescope à imagerie en ultraviolet lointain (EIT), le détecteur de rayonnements ultraviolets émis par le Soleil (SUMER), le spectromètre de diagnostic coronal (CDS) et le spectromètre à coronographe ultraviolet (UVCS).

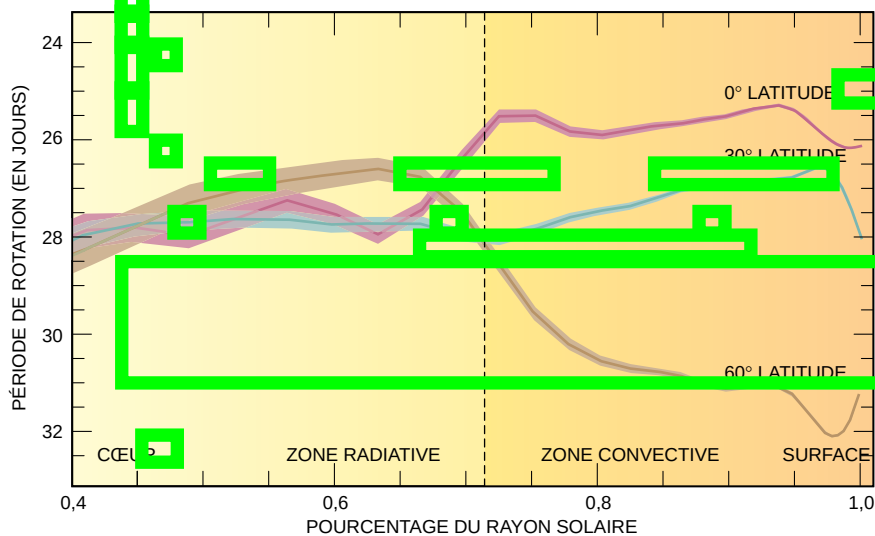
Pour identifier des structures dont la température est comprise entre 6 000 et deux millions de degrés, SOHO se fonde sur les raies spectrales. Ces raies s'obtiennent lorsqu'on sépare les diverses longueurs d'onde des rayonnements détectés. Les instruments de SOHO établissent des cartes de la température en identifiant les raies spectrales émises par les ions qui se sont formés : les atomes plus chauds perdent plus d'électrons par collision, ils deviennent ainsi plus ionisés ; les émissions de ces différents ions, à des longueurs d'onde différentes, révèlent ainsi la température du milieu. De surcroît, on calcule la vitesse de la matière qui se déplace dans ces régions en mesurant les décalages Doppler des longueurs d'onde.

Le rayonnement ultraviolet montre que le Soleil est un corps turbulent, même au minimum d'activité, cycle de onze ans, ce qui explique pourquoi la couronne est si chaude. Cette idée est apparue quand on a observé que le rayonnement ultraviolet du Soleil semblait provenir de petites régions brillantes localisées. SOHO a mesuré que ces points chauds présents en permanence correspondent à une température de un million de degrés et semblent associés à de petites boucles magnétiques de la couronne. Elles sont présentes partout sur le Soleil, y compris aux pôles Nord et Sud. Certaines de ces boucles explosent, éjectant de la matière à des vitesses de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Les astrophysiciens de l'équipe SOHO étudient maintenant le rôle que jouent ces points brillants dans le mécanisme de chauffage de la couronne.

Afin d'étudier les variations qui se produisent dans la partie supérieure de l'atmosphère du Soleil, on utilise l'UVCS et le coronographe spectroscopique à grande ouverture (LASCO). Les deux instruments contiennent des disques qui occultent l'éclat de la photosphère solaire. LASCO détecte la lumière solaire visible



3. À PARTIR DES VITESSES DU SON, dans le Soleil, on détermine la densité et la température qui règnent dans différentes parties de notre étoile. Les zones rouges correspondent à des vitesses du son supérieures à celles d'un modèle solaire de référence (en jaune). Inversement, les zones bleues dénotent des vitesses du son inférieures. La brusque diminution de la vitesse du son à la frontière du cœur du Soleil résulterait d'instabilités qui y mélangent la matière, mais dont on ignore l'origine. Dans la zone convective, les vitesses de rotation mesurées diffèrent de la théorie selon la latitude (tranche colorée vue de face).



4. LA VITESSE DE ROTATION INTERNE du Soleil à 0, à 30 et à 60 degrés de latitude a été déterminée à l'aide de la caméra Doppler-Michelson (MDI). À la base de la zone convective, les régions polaires tournent plus lentement que les régions équatoriales. En dessous, la rotation semble plus uniforme, bien que les astrophysiciens n'aient pas encore déterminé les vitesses de rotation dans le cœur même du Soleil.

diffusée par les éruptions coronales. La matière est-elle simultanément éjectée tout autour du Soleil ou bien seulement dans ces deux directions? Les coronographes spatiaux ont permis une vision latérale du Soleil et ne peuvent pas voir la matière qui s'éloigne ou se rapproche de la Terre.

En revanche, de minces jets de matière étaient éjectés des régions équatoriales. Le champ magnétique du Soleil façonne ces jets. À leur base, la matière chargée est fortement concentrée dans des boucles magnétiques enracinées dans la photosphère. Plus haut dans la couronne, les jets s'amincissent et s'étendent dans l'espace sur des dizaines de milliers de kilomètres : la matière y est confinée à des températures d'environ deux millions de degrés, à l'intérieur de frontières magnétiques allongées, créant une nappe de gaz chaud qui entoure le Soleil.

Dans les jets, la matière semble s'échapper continuellement le long des champs magnétiques ouverts. Parfois, les coronographes enregistrent des concentrations denses de matière qui se superposent aux jets, comme si des feuilles flottaient à la surface d'un cours d'eau. D'autres fois, de gigantesques éruptions coronales perturbent l'écoulement. Les éruptions projettent des milliards de tonnes de gaz brûlant dans l'espace interplanétaire à des vitesses de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Cette matière atteint souvent la Terre en deux ou trois jours.

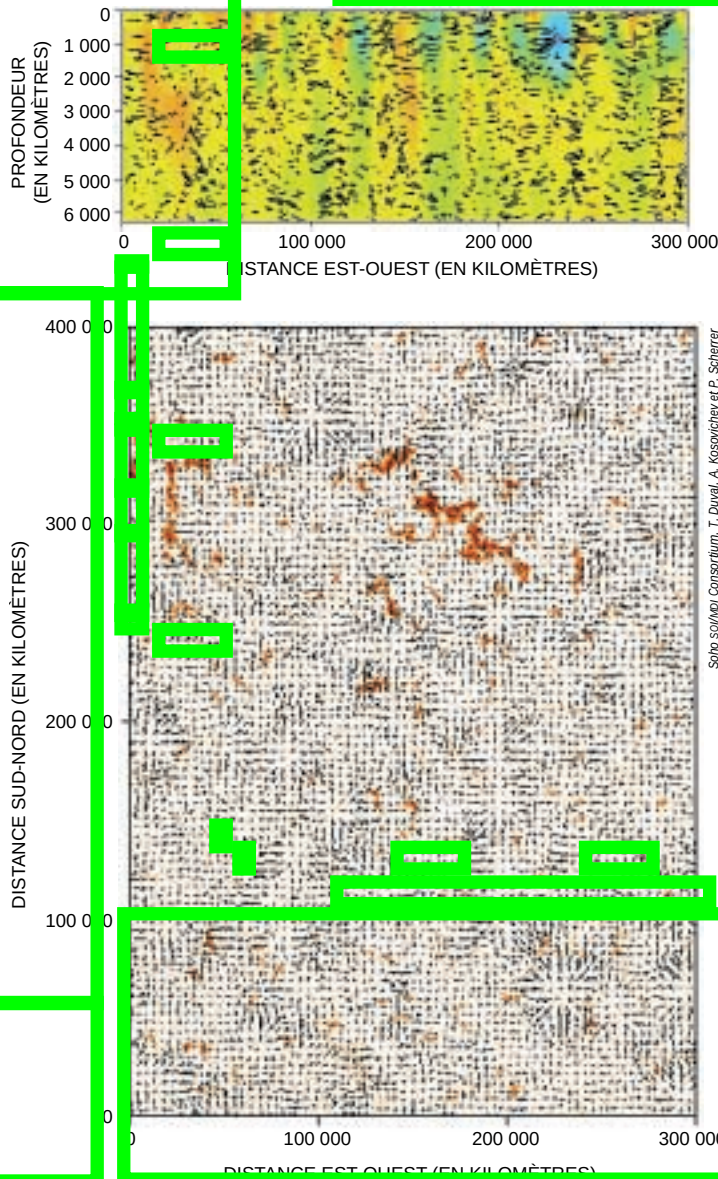
Grâce à LASCO, on a découvert que des éruptions équatoriales étaient émises de deux régions opposées du Soleil, à intervalles de quelques heures.

La matière est-elle simultanément éjectée tout autour du Soleil ou bien seulement dans ces deux directions? Les coronographes spatiaux ont permis une vision latérale du Soleil et ne peuvent pas voir la matière qui s'éloigne ou se rapproche de la Terre.

En fondant sur les observations, nous pensons tout de même que ces éruptions sont des perturbations globales qui s'étendent tout autour du Soleil. De vastes régions du Soleil semblent agitées de convulsions lors

des éruptions coronales, du moins lors du minimum du cycle d'activité de onze ans. De plus, quelques jours

après une éruption, on a détecté un sursaut de l'intensité de la nappe, ce qui indique qu'il s'y accumule de la matière. La pression de cette matière supplémentaire est probablement jusqu'à ce que la nappe s'ouvre sous la forme d'une éruption. Ce mécanisme est probablement lié à une réorganisation globale du champ magnétique solaire.



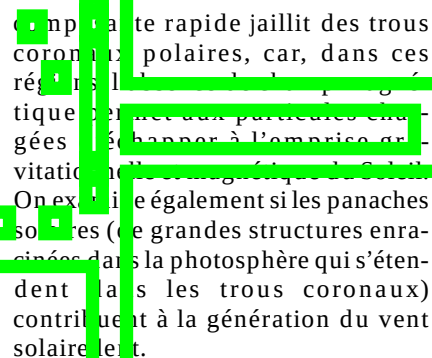
Soho solaire Consortium, T. Duval, A. Kosovichev et P. Scherrer

5. LA MATIÈRE s'écoule à la fois verticalement et horizontalement dans le Soleil. Les vents et sa température peuvent être visualisés à l'aide d'images prises par le coronographe à bord de SOHO. La coupe verticale (en haut) montre des variations d'écoulement et de température dans une zone de 8 000 kilomètres sous la surface du Soleil. Les dégradés de couleur indiquent une variation de température du froid (en bleu) au chaud (en rouge). On a mesuré (en bas), à une profondeur de 1 400 kilomètres, la température et on l'a comparée aux champs magnétiques de surface (taches marrons). Dans les deux cas, les petits segments noirs indiquent la direction et les vitesses relatives de la matière, qui atteignent une vitesse maximale de un kilomètre par seconde.

Vents solaires et au-delà

L'atmosphère chaude et agitée du Soleil s'étend dans toutes les directions, emplissant en permanence le Système solaire de vent solaire, composé d'électrons et d'ions, dont le déplacement s'accompagne d'un champ magnétique. Dans la couronne, l'énergie d'agitation thermique, qui s'accompagne d'une tendance à la dispersion de la matière, est supérieure à l'énergie potentielle gravitationnelle due au Soleil, ce qui permet l'éjection de matière. Ce vent est en permanence alimenté par du gaz qui provient de zones situées sous la couronne. Des mesures effectuées par diverses sondes spatiales antérieures ont montré qu'il est composé de particules rapides et de particules lentes. Les particules rapides se déplacent à environ 800 kilomètres par seconde, tandis que les particules lentes n'ont que la moitié de cette vitesse.

On ignore d'où part la composante lente et pourquoi la composante rapide est plus rapide, mais SOHO devrait fournir des réponses : la composante lente est associée à des régions équatoriales du Soleil, aujourd'hui observées par LASCO et UVCS. La



Les trous coronaux

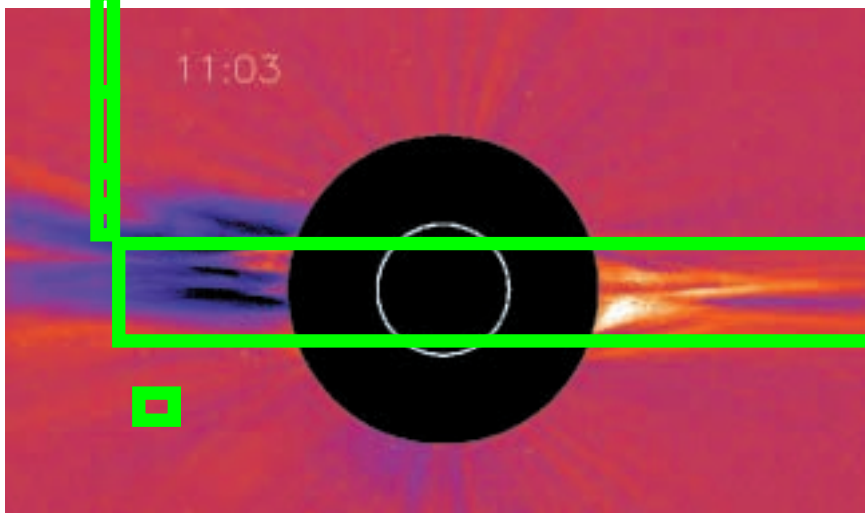
L'instrument UVCS a analysé l'émission spectrale de l'hydrogène et de l'oxygène fortement ionisé dans les régions où la couronne est chauffée et où le vent solaire accélère : la vitesse d'agitation des ions hydrogène diffère notablement de celle des ions oxygène. Dans les trous coronaux polaires, où naît le vent solaire rapide, l'oxygène possède environ 60 fois plus d'énergie cinétique ; à plus de deux rayons solaires du centre du Soleil, l'oxygène possède une vitesse d'agitation maximale, approchant 500 kilomètres par seconde. En revanche, l'hydrogène ne s'y meut qu'à environ 250 kilomètres par seconde. À l'inverse, dans les régions équatoriales, où naît le vent solaire lent, l'hydrogène se déplace plus vite que l'oxygène, conformément à ce que l'on prévoit pour un vent d'origine thermique.

Les astronomes tentent aujourd'hui de déterminer pourquoi les ions oxygène, plus massifs, se meuvent plus rapidement.

L'origine des mécanismes de chauffage et d'accélération est probablement dans les trous coronaux, où la densité est faible et où les ions et les électrons entrent rarement en collision. Des collisions fréquentes dans les écoulements plus denses pourraient, au contraire, effacer toute signature des phénomènes.

Un autre instrument embarqué à bord de SOHO, SWAN, étudie les atomes d'hydrogène interstellaire qui traversent notre Système solaire.

nement ultraviolet solaire éclaire cet hydrogène, t **ut comme un réverbère** éclaire le brouillard, dans la nuit, mais les particules du vent solaire ionisent les atomes d'hydrogène : là où le vent solaire traverse le nuage d'hydrogène interstellaire, il crée une zone d'atomes ionisés qui n'absorbent plus les ultraviolets et restent sombres. De la sorte,



Soho Lasco Consortium et Guenter Brueckner

Les instruments de la sonde SOHO et le CNRS ont établi, à Orsay, un centre d'opérations, d'analyse et d'archivage des données (MEDOC). Les données de la sonde SOHO sont traitées et archivées à Orsay. Elles viennent en direct du centre américain. Elles sont alors traitées et mises à la disposition des utilisateurs. Il est également possible d'y programmer des observations. Enfin, le MEDOC assure à Orsay, bientôt à Toulouse, l'archivage des données au titre de Centre d'archivage européen de SOHO.

SWAN détecte la structure du vent solaire : il a montré que le vent solaire est plus intense dans le plan équatorial du Soleil qu'au-dessus des pôles Nord et Sud.

Sur la Terre

Alors que l'économie mondiale se fonde progressivement sur des satellites en orbite autour de la Terre, elle devient plus vulnérable aux influences magnétiques solaires. Outre les tempêtes magnétiques, des éruptions coronales massives déclenchent des aurores polaires qui peuvent perturber les satellites. D'autres éruptions intenses, nommées éruptions solaires, expulsent des particules de haute énergie qui peuvent mettre en danger les astronautes et détruire l'électronique des satellites. Si nous connaissons des événements précurseurs de ces éruptions, SOHO serait un système de veille idéal.

Station Géophysique de Toulouse, le satellite peut repérer les particules menaçantes avant qu'elles ne nous atteignent. Son système CELIAS (pour « système d'analyse de charges, éléments, et isotopes ») mesure la quantité relative d'éléments et d'isotopes rares qui n'étaient pas observés auparavant. La comparaison de ces quantités nous renseigne sur les conditions

physiques de l'atmosphère solaire, d'où provient le vent solaire. Deux autres instruments, l'analyseur COSTEP (particules suprathermiques et énergiques) et l'instrument ERNE (noyaux et électrons énergiques et relativistes), ont déjà mesuré directement les flux d'électrons, de protons et de noyaux d'hélium très énergiques approchant la Terre. L'origine de ces particules est établie : elles proviennent d'éruptions solaires violentes détectées par l'instrument EIT. De tels événements deviendront sans doute plus nombreux lorsque l'activité solaire augmentera. On pourra alors ces éruptions dès leur commencement, sous la surface visible du Soleil, jusqu'à la Terre et au reste du Système solaire.

En attendant, certains de ses instruments explorent d'autres phénomènes mystérieux. Les systèmes GOLF et VIRGO, par exemple, auront bientôt observé les oscillations solaires suffisamment longtemps, et suffisamment près, pour déterminer la température et la rotation au centre du Soleil. De surcroît, quand l'agitation interne et l'activité magnétique de notre étoile s'accroîtront, au cours des prochaines années, SOHO devrait déterminer comment naissent les éruptions menaçantes et le vent chaud et prévoir peut-être les conditions qui règnent dans l'atmosphère du Soleil.

Kenneth LANG est professeur d'astrophysique à l'Université Tufts.

Kenneth R. LANG, *Le Soleil et ses relations avec la Terre*, Springer-Verlag, 1997.

The SOHO Mission, sous la direction de Bernhard Fleck, Vicente Domingo et Arthur I. Poland, numéro spécial de *Solar Physics*, vol. 162, n° 1-2, 1995.

Elizabeth NESME-RIBES, Sallie L. BALIU-

NAS et Dmitry SOKOLOFF, *La dynamique stellaire*, in *Pour la Science*, octobre 1996.

Kenneth R. LANG, *Unsolved Mysteries of the Sun*, Parts 1-2, in *Sky and Telescope*, vol. 92, n° 2, pp. 38-42, août 1996 et vol. 92, n° 3, pp. 24-28, septembre 1996.

De nombreux liens vers le MEDOC et vers divers sites sur SOHO sont accessibles de notre site Web : <http://www.pourlascience.com>

Les ordinateurs configurables

JOHN VILLASENOR • WILLIAM MANGIONE-SMITH

L'industrie de la microélectronique met au point des ordinateurs qui modifient la configuration de leurs circuits durant leur fonctionnement. Ils excellent dans la reconnaissance de formes, le traitement d'images et le chiffrement des informations.

La conception d'un ordinateur est toujours un compromis entre rapidité et polyvalence : les puces généralistes exécutent relativement lentement des tâches variées, tandis que les circuits spécialisés réalisent très rapidement des calculs particuliers. Les microprocesseurs des ordinateurs personnels, tels le *PowerPC* de la Société *Motorola* ou le *Pentium* de la Société *Intel*, sont généralistes : des programmes binaires (0 ou 1) leur font exécuter n'importe quelle opération logique, et ils servent aussi bien au traitement de texte qu'aux jeux.

En revanche, les circuits spécialisés nommés ASIC (l'acronyme anglais d'*Application-Specific Integrated Circuit*, soit «circuit intégré spécifique») ne sont conçus que pour une tâche précise. Plus petits, plus rapides et moins onéreux que les processeurs généralistes, ils consomment en outre moins d'énergie. Un coprocesseur graphique conçu sur mesure pour un ordinateur personnel, par exemple, peut tracer des traits ou colorier des images à l'écran 10 à 100 fois plus vite qu'une unité centrale généraliste.

Lors de la conception d'un ordinateur, le coût détermine souvent le choix du type de puces employées. Un circuit spécialisé bien conçu résoudra le problème pour lequel il a été construit, mais probablement pas un problème légèrement différent. En outre, si l'on crée ultérieurement un circuit modifié pour résoudre le nouveau problème, on l'intègre diffici-

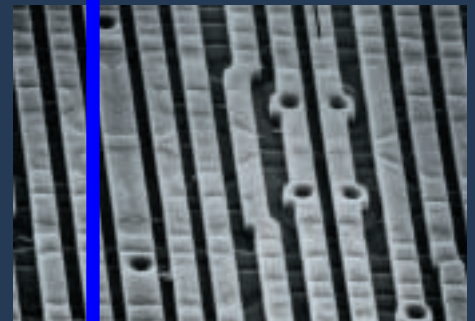
lement au reste de l'ordinateur initial. Ainsi, l'effort de recherche investi dans la création d'un processeur spécialisé doit être amorti avec un petit nombre d'unités.

Aujourd'hui, une nouvelle sorte de puces allie la souplesse des puces généralistes et la puissance des circuits spécialisés : les circuits logiques configurables, ou FPGA, l'acronyme anglais de *Field-Programmable Gate Array*. Grands et rapides, ces circuits intégrés peuvent être modifiés au cours de leur utilisation. Ils sont composés de blocs logiques configurables qui effectuent les opérations fondamentales des portes logiques. Les portes logiques sont des opérateurs à plusieurs entrées et à une sortie. Ce

sont des circuits qui exécutent les opérations binaires de base telles que ET, NON-ET, OU, NON-OU et OU EXCLUSIF. Dans la plupart des matériels informatiques utilisés aujourd'hui, les fonctions logiques des portes sont précâblées sur les circuits et ne peuvent être modifiées. Dans les circuits configurables, des signaux envoyés au circuit modifient les fonctions

logiques ainsi que les connexions entre ces blocs. Ces blocs ont la même structure que ceux qui composent les circuits spécialisés, mais on peut les connecter à volonté, lors de la programmation.

Les premiers circuits configurables ne convenaient qu'aux ingénieurs qui devaient tester rapidement plusieurs



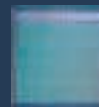
1. CE CIRCUIT INTÉGRÉ (à droite) comporte des circuits qui peuvent se modifier en cours de fonctionnement. Les micrographies à

configurations, lors de la mise au point de nouveaux circuits, les circuits configurables qui proposaient des remises à jour occasionnelles : le remaniement des connexions durait plusieurs secondes. Aujourd'hui, les circuits configurables se reconfigurent en une milliseconde, et nous estimons que ce temps sera divisé par dix d'ici deux ans. Dans le futur, on peut même envisager des équipements informatiques qui

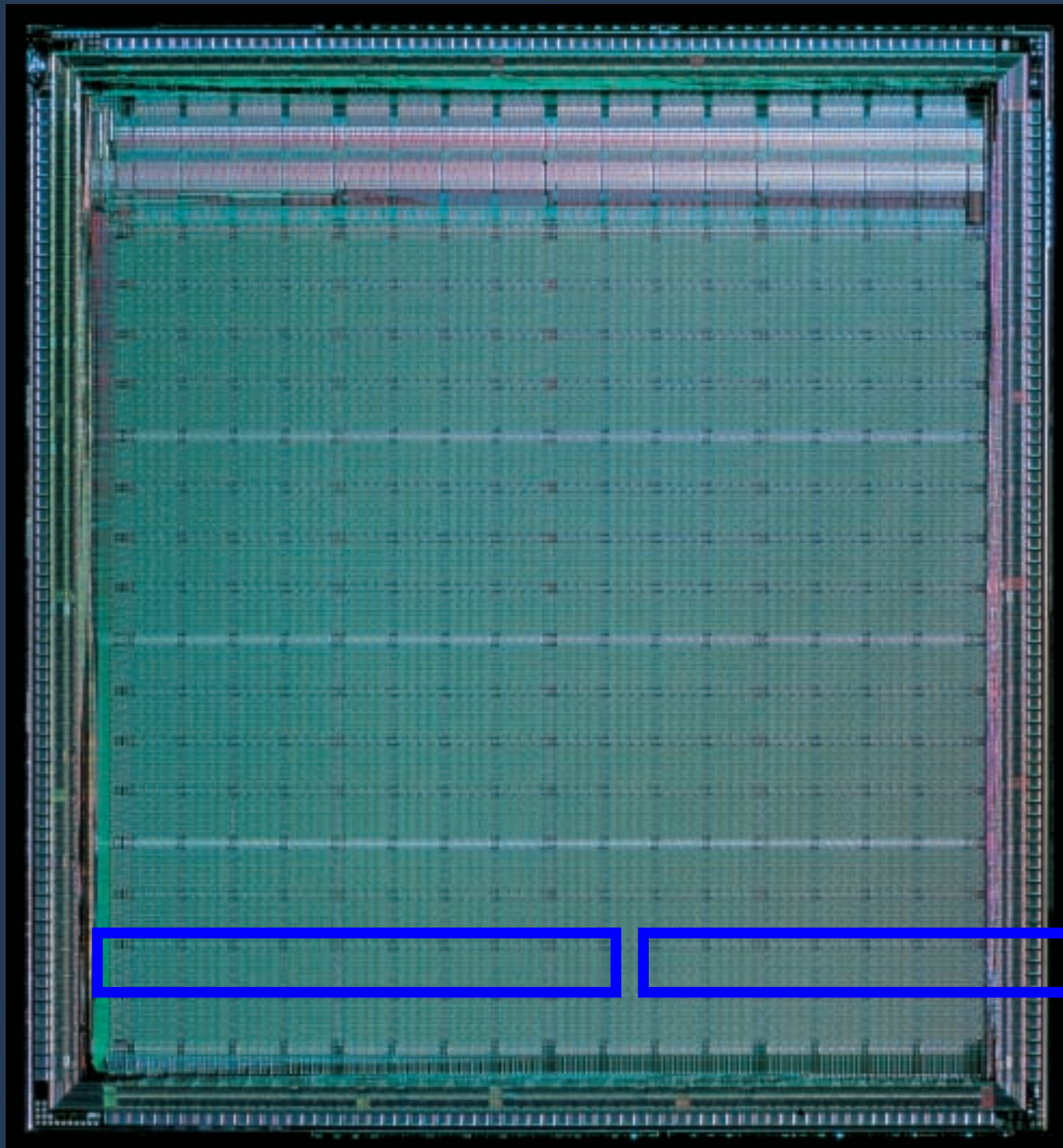
s'adaptent presque en continu selon les besoins, en fonction du mode de calcul.

Les divers types de processeurs configurables ont tous la même structure de base : de nombreux blocs logiques à configuration variable sont reliés par un réseau de connexions programmables. On distingue deux sortes de circuits configurables : les circuits à grosse granularité, composés d'un

petit nombre de blocs logiques puissants, et les circuits à petite granularité, composés de beaucoup de blocs simples. Les blocs des circuits à grosse granularité additionnent ou comparent deux nombres, des opérations déjà élaborées. En revanche, les blocs des circuits à granularité fine comparent uniquement deux nombres binaires, comme le



TAILLE RÉELLE



Xilinx

balayage électronique (à gauche) montrent trois des couches métalliques successives (de haut en bas, grossi 3 000 fois) d'une bascule bistable dans un circuit logique configurable. La bas-

cule contient quatre éléments de mémoire qui pilotent un interrupteur (zones colorées, en bas) qui assure la création de passages conducteurs dans le circuit.

font les portes logiques binaires. Les concepteurs de circuits choisissent la granularité de la programmation, les reconfigurations envisagées et le temps disponible pour construire des sous-systèmes complexes.

On fait des usages variés des circuits modifiables dans les ordinateurs. Le plus simple est le changement de

fonction des circuits sur commande, l'équivalent matériel d'un changement de programme. Les reconfigurations lentes, de l'ordre de plusieurs secondes, seront sans doute acceptables pour de nombreuses applications. Des temps de programmation plus courts autorisent la modification dynamique de circuits, c'est-à-dire l'exécution d'une série de

tâches séparées par des reconfigurations entre les tâches successives. De tels dispositifs utilisent la puce en temps partagé et basculent si vite d'une configuration à l'autre que le circuit semble exécuter toutes les fonctions en même temps.

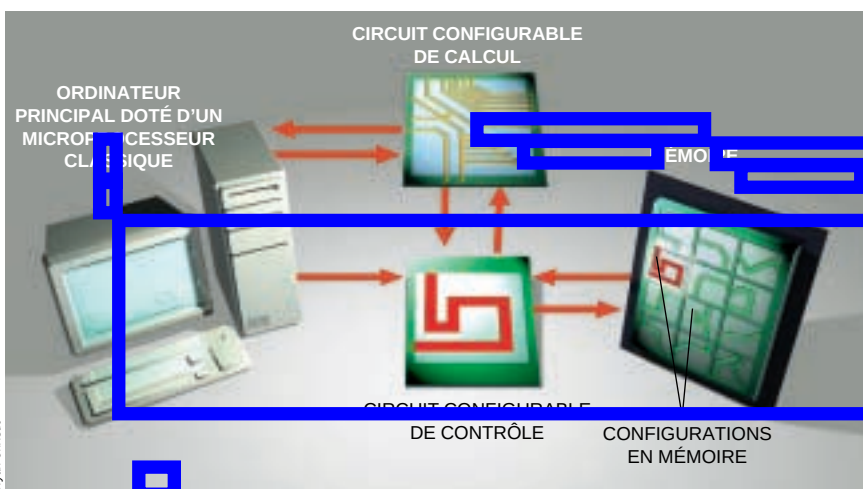
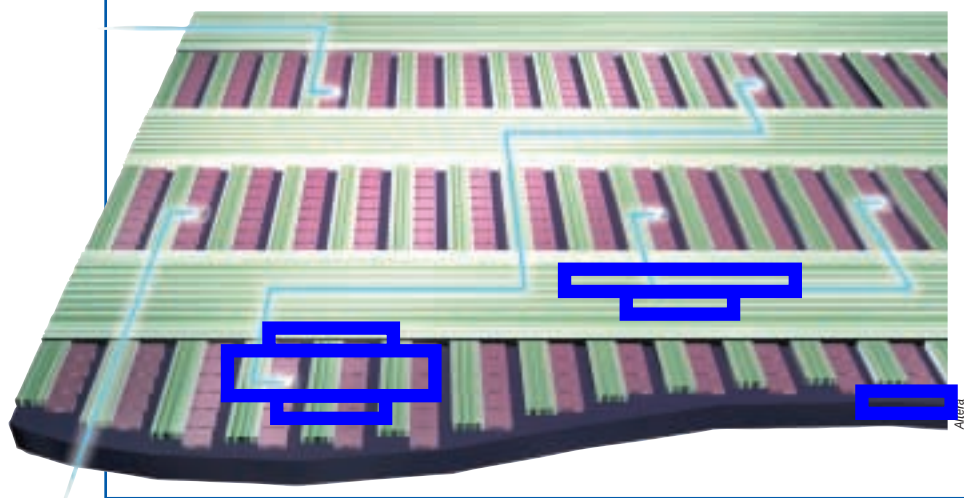
En utilisant cette approche, nous avons construit un système de transmission vidéo avec une seule puce, que l'on modifie quatre fois pour chaque image. Ainsi le circuit total est quatre fois plus petit que celui qui serait nécessaire si les puces étaient classiques. La puce configurable stocke d'abord en mémoire le signal vidéo entrant, puis elle effectue deux traitements d'image différents et se transforme finalement en modem pour transmettre le signal.

Les circuits configurables les plus prometteurs sont ceux qui se modifient pendant l'exécution d'une tâche, en optimisant eux-mêmes leur configuration afin d'améliorer leurs performances. Ainsi, une puce de reconnaissance d'images pourrait s'automodifier selon les caractéristiques détectées : si elle détecte une voiture ou un camion, par exemple, elle déconnecte les circuits prévus pour reconnaître les avions (très rapides) ou des personnes (au déplacement lent) et concentre sa puissance de calcul sur des véhicules terrestres. Pour certaines applications, les ordinateurs intégrant ces puces seront bien plus rapides et polyvalents que ne pourront jamais l'être les ordinateurs composés de processeurs généralistes ou spécialisés.

Un circuit programmable

On crée et l'on supprime des circuits (lignes bleues) dans un processeur configurable (FPGA) en envoyant des signaux électroniques à des portes logiques. Une grille de canaux de connexion disposés en colonnes et en lignes permet au concepteur de connecter un élément logique à d'autres, à une mémoire ou à un micro-

processeur externe. Les éléments logiques sont regroupés en blocs qui effectuent des opérations binaires fondamentales comme ET, OU ou NON. Plusieurs sociétés, telles *Xilinx* et *Altera*, ont mis au point des puces qui calculent aussi rapidement que des circuits classiques à 100 000 portes logiques.



2. LES ORDINATEURS À ARCHITECTURE HYBRIDE combinent des microprocesseurs généralistes classiques et des puces adaptables. Ainsi l'ordinateur à jeu d'instructions dynamique construit à l'Université Brigham Young contient deux circuits configurables et de la mémoire sur une carte électronique reliée à un ordinateur personnel. Le circuit configurable de contrôle charge les configurations de circuit stockées dans la mémoire vers le circuit configurable de calcul, suite aux requêtes du logiciel d'exploitation. Quand la mémoire ne contient pas un circuit demandé, le circuit de calcul envoie une requête à l'ordinateur, qui charge alors la configuration du circuit désiré.

La reconnaissance de forme

L'une des applications les plus prometteuses des ordinateurs configurables concerne la reconnaissance de formes. Celle-ci s'utilise pour l'identification des écritures manuscrites ou des visages, l'interrogation des bases de données ou l'identification automatique d'objets. L'étape fondamentale de la reconnaissance de formes est la comparaison d'un ensemble de bits d'entrée (une image, une chaîne de caractères ou toute autre donnée) avec un ensemble de modèles mémorisés ; le système reconnaît les données lorsque le nombre des bits d'entrée qui concordent avec les bits du modèle dépasse un seuil.

Dans le cas de l'identification de cibles – une application militaire qui motivait certains de nos premiers tra-

vaux –, on cherche à comparer rapidement l'image avec des milliers de modèles. Certains modèles représentent, par exemple, des véhicules vus de face ou de profil. Chaque modèle contient des milliers d'éléments (pixels), et la cible peut se trouver en n'importe quel point de l'image. Pour reconnaître des cibles assez rapidement, l'ordinateur doit effectuer plusieurs milliards d'opérations par seconde, car chaque pixel de l'image d'entrée doit être comparé à chacun des pixels des nombreux modèles.

Nous avons ainsi construit un système de reconnaissance dont l'électronique modifiable permet des économies substantielles de matériel en se modifiant lors de la comparaison

avec chaque modèle : comme de nombreux pixels d'un modèle ne contribuent pas à l'identification (voir la figure 4), le circuit configurable omet les opérations inutiles lors de ses calculs. Un système classique ne peut pas alléger sa tâche de façon similaire, car les pixels à ignorer diffèrent selon les modèles. On tire encore un meilleur parti des

similitudes entre les modèles. Ainsi les circuits modifiables peuvent comparer en parallèle l'image d'entrée à tout un ensemble de modèles, en n'utilisant qu'une unité de comparaison pour chaque pixel dont le valeur est la même pour les modèles de cet ensemble. Par exemple, au lieu que huit

circuits distincts traitent le même pixel pour huit modèles différents, un seul circuit traite le pixel.

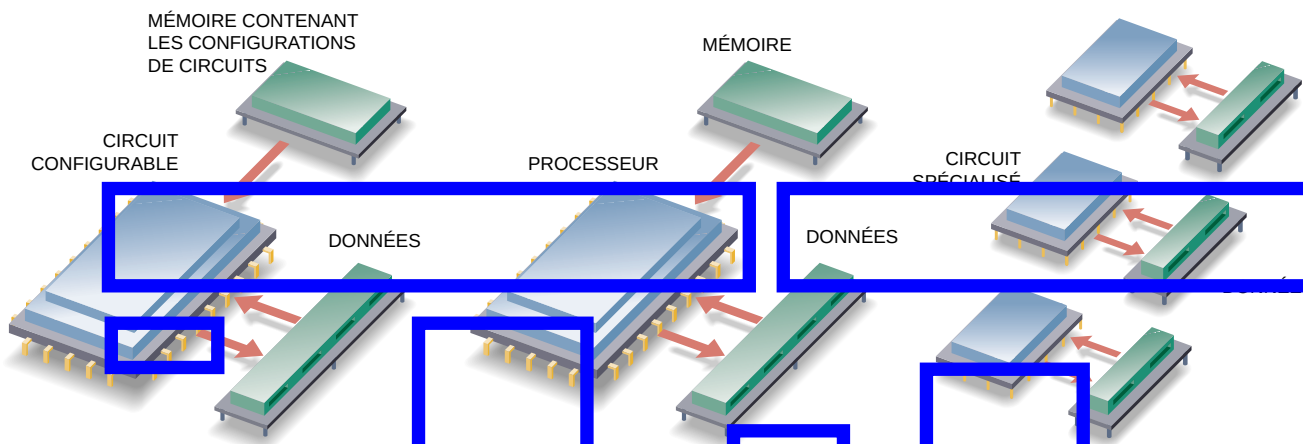
Récemment, nous avons mis au point un prototype de système de chiffrement utilisant de l'électronique configurable. Pour un circuit, nous avons programmé la norme de chiffrement DES (*Data Encryption Standard*), qui utilise des blocs de données de 64 bits (en cryptographie, une

clé est un nombre utilisé pour chiffrer ou déchiffrer un message confidentiel). Le chiffrement par DES procède en deux étapes : la création de sous-clés et le traitement des données. Lors de la première étape, un ensemble de rotations et de permutations de bits convertit la clé de 56 bits en une série

CONFIGURABLE

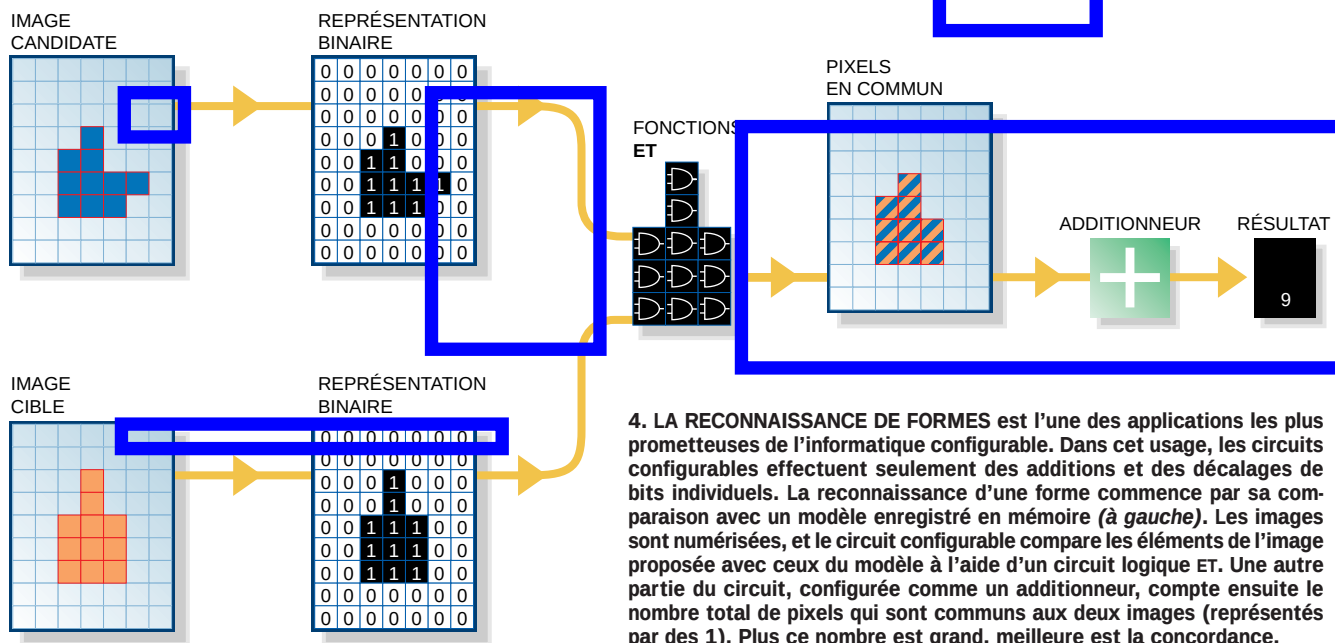
GÉNÉRALISTE

SPÉCIALISÉ

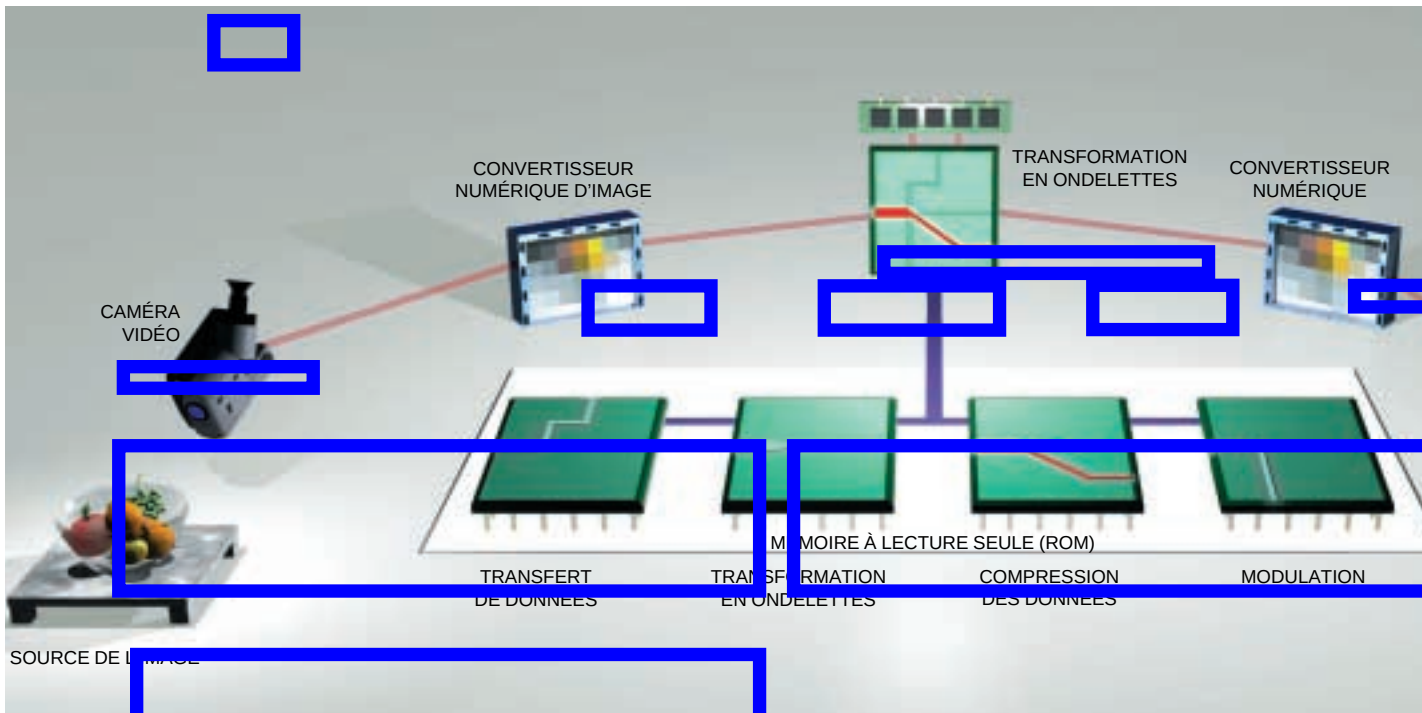


3. LES SYSTÈMES CONFIGURABLES combinent des éléments de calcul généraliste et de circuits spécialisés (ASIC). Les processeurs généralistes fonctionnent avec des circuits fixes qui exécutent les tâches définies par les programmes. Les processeurs

spécialisés ont des circuits qui les confinent à des tâches particulières ; la commande par programme est alors réduite. L'ordinateur configurable peut exécuter des commandes enregistrées et modifier ses circuits selon les tâches.



4. LA RECONNAISSANCE DE FORMES est l'une des applications les plus prometteuses de l'informatique configurable. Dans cet usage, les circuits configurables effectuent seulement des additions et des décalages de bits individuels. La reconnaissance d'une forme commence par sa comparaison avec un modèle enregistré en mémoire (à gauche). Les images sont numérisées, et le circuit configurable compare les éléments de l'image proposée avec ceux du modèle à l'aide d'un circuit logique ET. Une autre partie du circuit, configurée comme un additionneur, compte ensuite le nombre total de pixels qui sont communs aux deux images (représentés par des 1). Plus ce nombre est grand, meilleure est la concordance.



5. CE SYSTÈME PROTOTYPE de communication vidéo utilise un unique circuit reconfigurable pour exécuter quatre fonctions qui sont normalement effectuées par des puces distinctes. Une puce mémoire conserve les données. Une première configuration permet d'abord au processeur adaptable d'acquies des données

vidéo numériques. Puis la puce est rapidement reconfigurée pour mettre l'information vidéo sous une forme compressée, et modifiée en outre pour préparer la transmission. Enfin, les circuits sont reconfigurés dans la dernière configuration, qui leur permet de moduler et de transmettre l'information vidéo. Dans le récepteur, les quatre configurations sont appliquées dans l'ordre inverse de celui de

Calcul en temps réel

Le concept de système configurable est né simultanément aux États-Unis et en Europe, dès l'introduction des circuits logiques configurables par la Société *Xilinx*, en 1986. Le premier système couplant un microprocesseur à des circuits reconfigurables a été conçu à l'INRIA (Institut national de recherches en informatique et en automatique) en 1987.

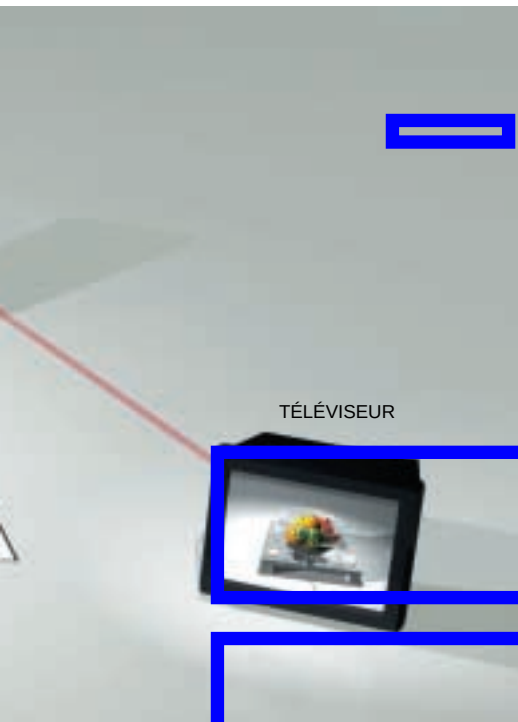
Parallèlement, des architectures similaires ont été mises en œuvre dans les « émulateurs » de logique (*QuickTurn* dès 1987, *Hewlett-Packard* plus récemment). Ceux-ci utilisent de très grandes quantités de circuits configurables (plusieurs centaines) pour simuler des circuits intégrés avant leur fabrication. Ces émulateurs de logique, devenus indispensables pour la conception des microprocesseurs modernes, n'ont cependant qu'une seule fonction : simuler de très grands circuits. En revanche, les systèmes reconfigurables proprement dits ont des fonctions aussi diverses que celles des circuits intégrés, et ils ajoutent des fonctions spécifiques. On a ainsi le meilleur de deux mondes : universalité du logiciel et performances du matériel spécifique à chaque application.

Le système reconfigurable *DECPeRLe1*, réalisé en 1992 au Laboratoire de recherche de la Société *Digital Equipment*, à Paris, pour le prix et le volume d'une station de travail de l'époque, détient encore aujourd'hui sept records absolus de vitesse — toutes techniques confondues, du super ordinateur au circuit intégré sur mesure. Ce système

est le plus performant pour le codage et le décodage par la méthode des ondelettes, et pour la compression et la décompression de données en temps réel exprimés par le CERN pour son futur accélérateur de particules (LHC). Des performances de calcul en temps réel équivalentes à celles de ce système configurable s'obtiendraient avec un ordinateur classique au prix d'une multiplication par 10 des fréquences d'horloge les plus élevées.

Dans leur simplicité et le nombre de connexions potentielles (on peut faire sortir directement des centaines de fils de ces circuits), les systèmes reconfigurables sont d'excellentes interfaces entre les ordinateurs et des dispositifs externes variés. Dans le cas d'une caméra numérique à haute résolution, elle peut être reconfigurée pour effectuer, en temps réel, la fois l'interface, le protocole de communication, et aussi les fonctions de filtrage de l'image et l'adaptation du débit des données reçues par l'ordinateur hôte. On obtient ainsi un système d'acquisition optimal, qui peut s'adapter aux besoins de la caméra ou aux besoins d'acquisition par simple reconfiguration. C'est à travers des applications de ce type que les systèmes reconfigurables sont aujourd'hui passés du stade de la recherche à celui de produits industriels.

Jean VUILLEMIN, École normale supérieure
Patrice BERTIN, École des mines de Paris



Bryan Christie

départ. Ainsi le circuit démodule les données, décompresse l'image, puis l'envoie à un convertisseur numérique-analogique afin d'afficher l'image sur un écran. Notre système est capable de traiter huit images par seconde.

de 16 sous-clés. Lors de la seconde étape, chaque sous-clé chiffre ou déchiffre les données séparément : l'ensemble des 16 sous-clés chiffre ou déchiffre chaque bloc de 64 bits. Lorsqu'un ordinateur est simultanément utilisé par plusieurs personnes, chaque paire d'utilisateurs utilise une clé distincte, et le système de chiffrement doit changer de clé chaque fois que des parties de messages arrivent des différents utilisateurs.

Toutefois, la clé cryptographique reste constante pendant qu'un long bloc de données transite sur le réseau. Par exemple, si deux personnes communiquent à travers un réseau protégé, ils échangent une seule fois une clé cryptographique protégée, puis utilisent cette clé tout au long de leur dialogue afin d'engendrer les sous-clés pour chaque session de chiffrement ou déchiffrement.

Avec une puce configurable, le logiciel calcule les sous-clés pour toutes, et le circuit de traitement de données peut être optimisé pour ces sous-clés spécifiques. Ainsi peut-on éviter de consacrer une partie de la puce au calcul des sous-clés. Ces économies nous ont permis d'installer l'algorithme DES sur un circuit adaptable comprenant 13 000 portes logiques au lieu des 25 000 portes nécessaires

avec des circuits classiques. Lorsque la clé de chiffrement doit être changée, l'utilisateur peut rapidement calculer la configuration nécessaire pour la nouvelle sous-clé, puis reconfigurer la puce pour la suite du calcul.

Les processeurs configurables s'accompagnent d'une dissipation au point de fonctionnement élevée et le chiffrement démontrent que les circuits configurables conduisent à des ordinateurs plus petits. De nombreuses autres applications, tels les communications numériques, le traitement des données radar et la conception assistée par ordinateur, tireraient parti de telles puces.

Le futur de l'informatique configurable

L'informatique configurable est un domaine très jeune : bien que Gerald Estrin, de l'Université de Los Angeles, en ait établi les principes dès la fin des années 1960, les premiers essais datent de quelques années seulement. De plus, les circuits configurables actuels, avec au mieux 100 000 portes logiques, n'exploitent pas toutes les possibilités de cette technique. Les futurs circuits seront bien plus grands : comme pour la plupart des circuits intégrés classiques, le nombre d'éléments intégrés sur un circuit adaptable double tous les 18 mois environ. Ainsi, avant la fin de cette décennie, les circuits adaptables comprendront probablement un million d'éléments logiques.

Les chercheurs et les industriels résolvent aujourd'hui les problèmes de conception qui ont retardé l'adoption de l'informatique configurable. Les circuits configurables actuels ne sont utilisables qu'avec des algorithmes opérant sur les bits individuels, tels que la comparaison de formes et l'arithmétique des nombres entiers, mais ils sont mal adaptés aux opérations numériques telles que la multiplication de haute précision ou les calculs en virgule flottante. Des circuits multiplicateurs spécialisés, comme ceux utilisés dans les microprocesseurs et dans les processeurs de traitement numérique du signal (DSP), peuvent être optimisés pour fonctionner plus efficacement que les circuits multiplicateurs réalisés à partir de logique configurable. De surcroît, la mémoire intégrée des circuits configurables, nécessaire pour le stockage des résultats intermédiaires, reste trop faible. Ainsi, de nombreux programmes nécessitent une impor-

tante mémoire externe pour fonctionner avec ces circuits modifiables : le transfert des données entre le circuit et la mémoire ralentit les calculs et consomme plus d'énergie (la consommation d'énergie est gênante, parce qu'elle s'accompagne d'une dissipation de chaleur nuisible au bon fonctionnement des circuits).

Pour éviter ces écueils, les électroniciens et les informaticiens mettent au point les premiers circuits configurables à mémoire intégrée. À l'Institut de technologie de Massachusetts, DeHon et Thomas Knight ont proposé un circuit qui stocke les données des multiples configurations dans une mémoire intégrée. En un seul cycle d'horloge soit quelques dizaines ou centaines de nanosecondes, la puce bascule d'une configuration à une autre, sans effacer les données partiellement traitées.

Parallèlement, Brad Hutchings, de l'Université Brigham Young, a utilisé l'informatique configurable pour construire un ordinateur à jeu d'instruction dynamique. Ce système, qui allie un microprocesseur classique et un coprocesseur configurable, démontre le potentiel de la reconfiguration automatique. Lors de l'exécution du programme, le circuit demande une reconfiguration chaque fois qu'il détecte l'absence d'un circuit spécifique nécessaire à l'exécution. Ce système peut mémoriser un grand nombre de configurations de circuits, et le maître de la même façon qu'un programmeur appelle un sous-programme.

Le groupe Colt, dirigé par Peter Athanas, de l'Institut polytechnique de Virginie, étudie une technique de reconfiguration durant l'exécution nommée *Wormhole* («trou de ver»), qui

se prête à l'informatique répartie. Un flot de données crée une logique dédiée à mesure qu'il traverse les circuits configurables.

John Vawrzynek et ses collègues de l'Université de Berkeley étudient des systèmes qui combinent un microprocesseur et un processeur configurable. À partir d'un programme ordinaire, un logiciel de compilation spécial génère une combinaison d'instructions-machine et de configurations du processeur configurable qui assure l'exécution du programme.

Les processeurs configurables ne remplaceront pas les microprocesseurs pour les tâches généralistes, mais les circuits à configurations variables joueront certainement un rôle croissant dans la mise au point de systèmes informatiques performants. La puissance de calcul des processeurs configurables se fait des systèmes de choix chaque fois qu'une adaptation rapide aux données est requise.

Progressivement, la frontière entre processeurs programmables et processeurs configurables s'estompera : les circuits configurables comprendront une mémoire interne augmentée et des multiplicateurs spécialisés, comme les microprocesseurs classiques ; inversement, les microprocesseurs de la prochaine génération pourront modifier dynamiquement certaines parties de leur circuit, un peu comme les processeurs configurables. De cette

manière que les ordinateurs reliés au réseau Internet peuvent être chargés des logiciels spécialisés pour effectuer des tâches particulières, les futures machines pourront charger de nouvelles configurations de circuits. Dans dix ans les ordinateurs comprendront un mélange de puces programmables et de puces configurables.

John WILLASENOR et William MANGIONE-SMITH travaillent au Département d'ingénierie électrique de l'Université de Los Angeles.

M.J. VIRTUELLI et B.L. HUTCHINGS, *A Dynamic Instruction Set Computer*, in *Proceedings of the IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machine*, avril 1995, IEEE Computer Society Press, 1995.

J. VUILLEMIN, P. BERTIN, D. RONCIN, M. SHAND, H. TOUATI et P. BOUCARD, *Programmable Active Memories : The Coming of Age*, in *IEEE Trans. on VLSI*, vol. 4, pp. 56-69, mars 1996.

John WILLASENOR, Brian SCHONER, Kang-ling CHIA, Charles ZAPATA, Hea Jung KIM, Chris JONES, Shane LAWSING et Bill MANGIONE-SMITH, *Configurable Computing Solutions for Automatic Target Recognition*, in *4th IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines (FCCM '96)* April 1996.

Ray BITTNER et Peter ATHANAS, *Wormhole Run-Time Reconfiguration*, in *FPGA '97 : ACM/SIGDA International Symposium on Field Programmable Gate Arrays*, Special Interest Group on Design Automation (SIGDA), ACM, 1997.

Les tombes impériales de la dynastie Tang

ALEXANDER KOCH

Des archéologues allemands et chinois étudient les mausolées imposants des souverains de la plus grande époque de la Chine impériale. Ils se préoccupent également de préserver ces monuments quasi inconnus.

Plus de 1 000 ans après la mort de l'empereur, on voit encore le dernier chemin qu'il emprunta : montant vers le Nord à partir de la plaine, le chemin de l'âme conduit vers le massif montagneux qui se profile à l'horizon. Sur plusieurs centaines de mètres, de part et d'autre de cette voie, des statues en pierre représentent des créatures fabuleuses, des chevaux et des hommes plus grands que nature ; des tours, des piliers et des stèles commémoratives sont couverts d'inscriptions. Apaisée, la route se dirige vers une forteresse fortifiée, taillée dans la haute muraille qui ceignait le massif montagneux sur des kilomètres, le visiteur du VIII^e siècle arrivait dans la zone funéraire proprement dite, une vaste étendue aménagée au-dessus du tombeau creusé dans la montagne, qui avait été agencée et dotée d'un système de défense (voir la figure 1).

Celui qui atteignait ainsi le début de la route de la soie, en Chine centrale, pouvait croire que le mausolée d'un empereur Tang était une ville. C'était le but visé : après sa mort, l'empereur devait jouir du même faste, du même confort, des mêmes honneurs que de son vivant.

Depuis 1993, avec nos collègues de l'Institut d'archéologie de l'Université de Shaanxi, nous recensons et analysons ces complexes funéraires de l'époque la plus florissante d'une des plus grandes civilisations de l'humanité. Il reste peu de bâtiments et d'ouvrages d'art de la dynastie des Tang, qui régnèrent de 618 à 907. Lors de cet « Âge d'or », la Chine était le pays le plus vaste et le plus peuplé de la surface du Globe, et

il s'étendait loin en Asie centrale : l'élan culturel et économique fut inégalé. Le premier siècle de la dynastie Tang bénéficia d'une politique militaire active, d'une diplomatie habile et de réformes économiques et sociales. La puissance et la stabilité de cet énorme État s'accompagnaient de la paix intérieure et de l'ouverture du pays aux influences, aux religions et aux coutumes étrangères : l'État tolérait les religions telles que le bouddhisme, le christianisme nestorien, le jainisme, l'islam, le mazdéisme (zoroastrisme) et le manichéisme. Des influences provenant de toute l'Asie se mêlaient dans le creuset chinois. Les échanges avec les pays étrangers contribuèrent au développement intérieur.

L'ouverture vers le monde extérieur laissa une profonde empreinte sur la civilisation de Chang'an, aujourd'hui nommée Xi'an, avec ses deux millions d'habitants. C'était certainement la métropole la plus importante et la plus animée de son temps, facile à défendre grâce aux montagnes qui l'entouraient. Cette ville, située au milieu des plaines d'altitude fertiles du Guanzhong, « l'intérieur des passes », que portaient vers l'Ouest les fameuses caravanes. Centre cosmopolite, Chang'an accueillait des diplomates, missionnaires et réfugiés politiques, qui se regroupaient en communautés.

À ce jour, le trésor culturel qui s'est accumulé pendant plusieurs millénaires, dans cette région située en plein cœur de la Chine, reste en grande partie inconnu, mais des surprises attendent les archéologues. Ainsi, en 1974,

près de Lintong, à 35 kilomètres à l'Est de Xi'an, les archéologues ont découvert le monde entier : sous l'immense colonne funéraire se dressait une armée forte de plusieurs milliers de soldats en terre cuite, presque grandeur nature, avec chevaux et chariots. Cette armée devait protéger dans l'au-delà celui que l'on nomme le premier empereur de la dynastie Tang, Shihuangdi, qui régna de 221 à 206 avant notre ère.

Cette découverte fut le début d'une nouvelle ère pour l'archéologie chinoise : de nouvelles découvertes multiples, surtout au Shaanxi, où s'est manifestée la grandeur passée de l'empire. De la dynastie Tang, qui correspond au début du Moyen Âge en Europe, on a ainsi trouvé les restes de palais impériaux, de temples et de nécropoles de dimensions souvent colossales et d'une richesse difficilement imaginable.

Comment préserver ces monuments, amorcer les autres trouvailles archéologiques ? L'accord germano-chinois de coopération culturelle et technique a donné les moyens archéologiques nécessaires : en 1990, le Musée de Mayence et l'Institut d'archéologie de Xi'an ont passé un contrat pour mettre au point des procédés de conservation et de restauration.

Les ateliers de restauration de Xi'an

L'atelier de restauration qui est aujourd'hui installé à l'Institut d'archéologie de Xi'an dispose de huit à dix postes de travail équipés d'outillage apporté d'Allemagne : une installation de radio-



Römisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz/Alexander Koch



Römisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz/Alexander Koch

1. LES MAUSOLÉES DES EMPEREURS Tang figurent parmi les monuments funéraires les plus grands de Chine, voire du monde. Depuis 1993, une équipe germano-chinoise les fouille et se préoccupe de leur conservation. En haut, un artiste a représenté le Qianling, le tombeau de Goazong (628-683), le troisième empereur Tang, et de son épouse Wu Zetian. La montagne funéraire est entourée d'un mur qui délimite une enceinte de plusieurs kilomètres carrés. On reconnaît les chemins de l'âme du Sud (devant à

gauche) et du Nord, les murailles imposantes percées de quatre portes et munies de tours d'angle, les chemins qui menaient aux chambres mortuaires, ainsi que d'autres bâtiments. La photographie inférieure montre une partie du chemin de l'âme du Tailing, le mausolée de l'empereur Xuanzong (685-762). Ce chemin conduisait à l'enceinte interne ; il indique la direction du tombeau creusé dans la montagne. Le nombre et la disposition des sculptures qui flanquaient le chemin obéissaient à des règles très strictes.

graphie complète, des dispositifs de sablage, un burin à ultrasons, un compresseur pour le soufflage, ainsi que de nombreux outils de précision directement dérivés des techniques odontologiques, tels des perceuses, des fraises, des roulettes et des jets d'eau.

Les ateliers de restauration servent également à la mise au point de procédés de conservation et de restauration appropriés aux pièces archéologiques trouvées dans le sol chinois. Le sol de la province de Shaanxi est truffé d'objets de métal, de verre, de pierre, de céramique et de bois. La grande importance historique et artistique. La restauration donne souvent des indications sur la fonction des objets, sur le mode de fabrication, les matériaux qui les composent et sur les techniques de décoration et de réparations (voir la figure 2). Tous ces renseignements permettent d'attribuer ces objets à des écoles ou à des ateliers.

Des mausolées entre les cols

Les mausolées des empereurs Tang avaient des dimensions imposantes : la zone limitée par le mur d'enceinte couvrait souvent plus de dix kilomètres carrés. Selon la tradition, que l'on a des raisons de ne pas accepter sans réserve, ces complexes funéraires étaient bâtis sur le modèle des palais impériaux, dont on atteignait le cœur en passant par une série de portails et de cours. Dans le cas des sites funéraires, il ne reste presque rien de telles enceintes extérieures, de sorte que leur existence passée reste à démontrer. Au Nord de la plaine de loess fertile, 18 sites funéraires sont disposés au pied des montagnes, formant une chaîne de quelque 150 kilomètres de long (voir la figure 3). La plupart d'entre eux ont été construits selon des règles précises : la porte principale, à laquelle menait le chemin de l'âme, était tournée vers le Sud, tout comme l'entrée de la tombe creusée dans la montagne. Le mur d'enceinte qui entourait le massif avec la colline funéraire était généralement possible un rectangle, et il était percé de trois autres portes dirigées vers les autres points cardinaux. Un chemin de procession décoré de manière plus sommaire menait à la porte Nord (voir la figure 1). L'ensemble était conçu d'après les lois de la géomancie, science divinatoire traditionnelle qui prétendait assurer une influence bénéfique

sur le dernier lieu de repos de l'empereur. Les initiés de cette science choisissaient le lieu d'implantation et le remodelaient, ajoutant, au besoin, des collines artificielles, arasant des sommets et des vallées, et des plantations. Les montagnes situées au Nord protégeaient la tombe contre les influences néfastes provenant de cette direction, alors que le Sud devait s'ouvrir sur un paysage ouvert, comportant des vallées, des plaines, des rochers, des sources, des ruisseaux et des fleuves, ainsi que divers groupes de montagnes.

Adossés à une chaîne de montagnes qui culminent à 1 000 mètres, les mausolées Tang sont dans une configuration typique de la Chine centrale : à une altitude moyenne de 500 mètres, elle est traversée par la Wei he et ses affluents ; les rivières aujourd'hui asséchées ont découpé des gorges abruptes dans la couche de loess jaune-ocre et grise d'environ 100 mètres d'épaisseur qui avait été amenée des déserts du Nord-Ouest par les vents. L'homme a laissé ici des traces remontant à la préhistoire : non loin de Xi'an, on a trouvé une des plus anciennes traces de la présence humaine en Chine. Notamment, cette région a abrité les peuplements du début de l'âge du bronze, lequel commença dans ces régions fertiles il y a plus de 8 000 ans et s'étendit jusqu'au troisième millénaire avant notre ère, ainsi que des civilisations qui furent parmi les toutes premières en Chine à se livrer à l'agriculture.

Au cours des millénaires suivants, cette paire de collines constitua le centre culturel de la région. À la fin du premier siècle avant notre ère, 18 dynasties successives y construiront leur capitale. Chang'an fut le siège des mausolées à l'époque Han (à partir de 206 avant notre ère) ; c'était même l'une des plus grandes villes de l'Antiquité. À l'époque des Tang, et tout particulièrement au début du VIII^e siècle, elle était un carrefour de routes commerciales.

Le saint du souverain

Les tombeaux des empereurs Tang s'étendent jusqu'à 130 kilomètres de la ville actuelle de Xi'an (voir la figure 3). Leur construction et leur décoration témoignent de la puissance des souverains de cette époque.

Quatorze de ces mausolées dépassent en splendeur les constructions

antérieures et, peut-être même, postérieures. Le mur qui courait entre quatre portes, autour de l'enceinte intérieure du tombeau, avait une longueur qui atteignait 14 kilomètres. Construit de blocs d'argile, ce mur devait avoir cinq à huit mètres de haut, pour une épaisseur de quatre à six mètres. Il était protégé des intempéries par un enduit de chaux et couvert de tuiles de terre cuite. Les quatre coins de l'enceinte étaient munis de puissantes tours d'argile d'une section de 12 mètres par 20 mètres, vraisemblablement hautes d'une quinzaine de mètres et surmontées d'une construction en bois.

Les quatre portes avaient la même architecture, mais celle du Sud était plus grande et plus décorée. Il ne reste presque rien de ces passages, sinon quelques vestiges de fondation rectangulaire et quelques tessons de tuiles. Toutefois, on a identifié, sur certaines de ces portes, la présence de trois ouvertures : une grande ouverture centrale était flanquée de deux ouvertures plus petites. On retrouve d'ailleurs, à des époques plus tardives, cette disposition à plusieurs mausolées de la région. On reconnaît souvent à la présence de tas de décombres l'emplacement des tours avancées, dressées de part et d'autre de la porte ; elles ressemblaient apparemment aux puissantes tours d'angle. Les deux lions sculptés placés de chaque côté des portes entre les tours et le mur, sont encore souvent en place.

Les deux chemins de l'âme qui venaient, l'un du Nord, et l'autre du Sud, étaient extrêmement imposants. Cette disposition était régie par des règles strictes. Lorsque le visiteur venait du Sud et empruntant le chemin de l'âme, il menait à l'entrée principale, il passait tout d'abord devant deux tours d'angle, puis devant deux tours d'angle à droite et à gauche et qui ressemblaient certainement aux tours flanquant l'entrée principale, aujourd'hui réduites à deux tas de décombres. Après avoir passé entre deux piliers, il arrivait à la tombe.

en pierre, grandeur nature ou plus grandes que nature, disposées paires de part et d'autre du chemin.

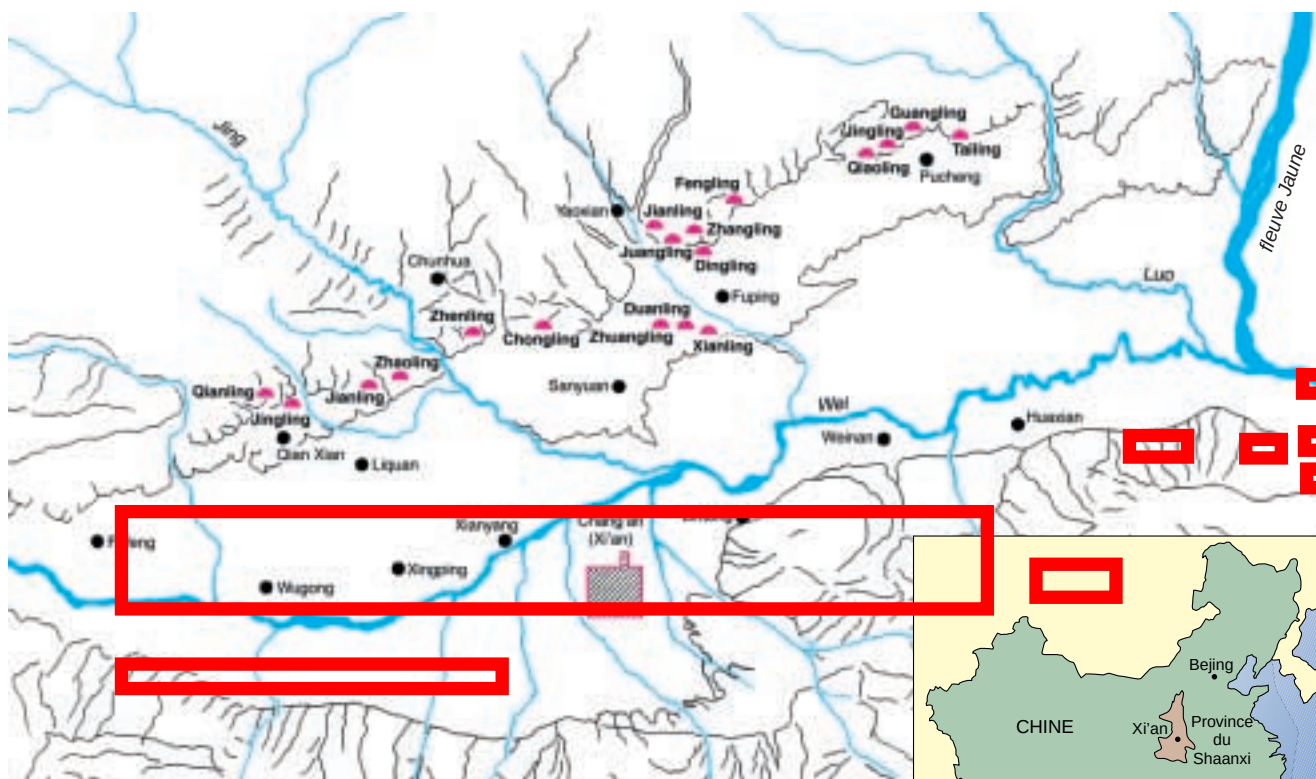
Nombre de ces sculptures existent encore (voir les figures 4 à 6). Une paire de dragons marquait le début de cette voie de 600 mètres de long. Elle était suivie de deux stèles de pierre appareillées représentant en relief un oiseau



Slawisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz/Alexander Koch

2. LES ATELIERS DE RESTAURATION installés depuis 1990 à l'Institut d'archéologie de Xi'an traitent les objets récupérés dans les mausolées Tang. On a longtemps considéré que les deux pendentifs de ceinture datant du ^{vi}^e siècle (*en haut*) constituaient des amulettes, mais

une radiographie a révélé la présence de métal à l'intérieur. Ces objets étaient des couteaux ou des limes. L'inscription en or sertie dans la grande épée (*en bas*) donne des indications sur son fabricant et sur son propriétaire : elle n'est apparue qu'après restauration.



Alexander Koch/Spektrum der Wissenschaft

3. DIX-HUIT MAUSOLÉES d'empereurs Tang (demi-cercles rouges) ont été trouvés dans la province actuelle de Shaanxi, le long du massif montagneux situé au Nord de «l'intérieur des passes». Cette région constituait le cœur de la Chine ancienne. Au Sud se dresse l'ancienne capitale Chang'an, aujourd'hui nommée Xi'an.

ressemblaient à des soldats, à des dignitaires, à des membres de la famille de l'empereur : plus petites, ces tombes restent toutefois imposantes. Les monticules funéraires constitués de terre damée étaient souvent façonnés en pyramides tronquées ; au pied de ces tertres funéraires se dressaient souvent des épitaphes gravées sur des stèles et, plus rarement, des gardiens en pierre.

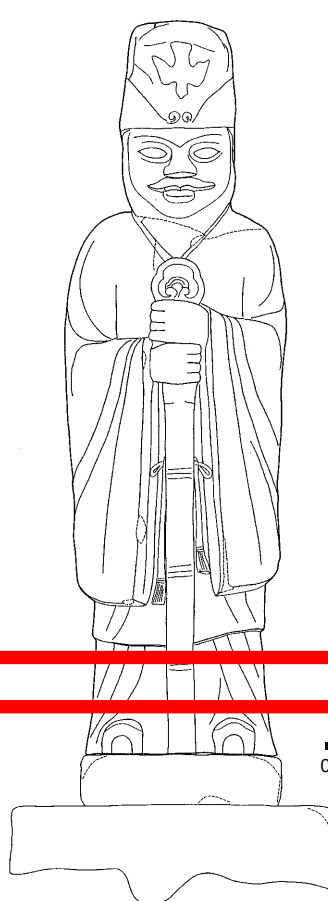
En dehors du mur d'enceinte, à distance du tombeau, se dressaient les

étaient décorées de manière soignée. Une rampe d'accès toujours très pentue, équipée de plusieurs puits d'aération et flanquée de niches, conduisait au couloir horizontal menant à la chambre funéraire proprement dite, elle-même précédée d'une ou de plusieurs antichambres (voir la figure 7). Ces salles étaient décorées de peintures

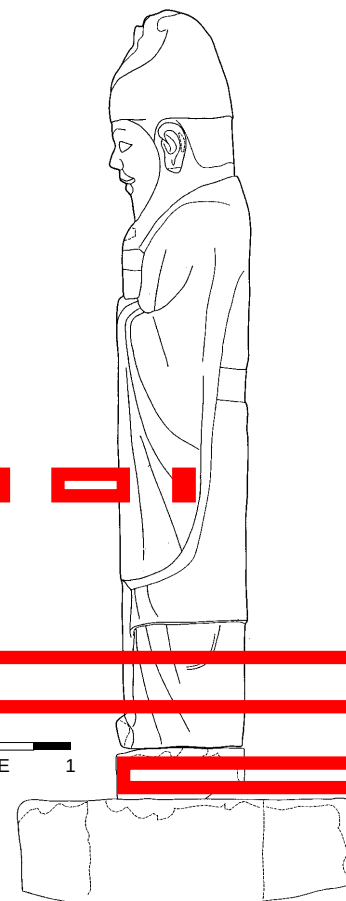


4. CETTE STATUE d'un cheval sellé, grandeur nature (à gauche), est au bord du chemin de l'âme du Qiaoling, le mausolée de Ruizong (662-716), cinquième empereur Tang. Deux soldats, plus grands que nature

(à droite), étaient postés le long du chemin de l'âme du Jingling, le tombeau de l'empereur Xianzong (778-820). Apparemment ils portaient une grande épée dans chaque main.



0 MÈTRE 1



5. LA STÉRÉOPHOTOGRAMMÉTRIE permet d'élaborer des profils cotés des diverses sculptures. Cette sculpture plus grande que nature d'un soldat portant une épée se dressait le long du chemin de l'âme Sud du Qiaoling.

murales représentant des scènes de la vie à la cour de l'empereur.

La structure stéréotypée de ces tombes annexes donne une idée de l'intérieur des tombeaux impériaux, encore inexplorés. Dans les cas favorables, on détecte l'entrée de la sépulture à la présence d'une légère dépression sur le sol, qui s'ouvre sur qu'aux bords taillés des rochers et à la présence de blocs de pierre façonnés. Bien que certains textes mentionnent la violation de telles sépultures au X^e siècle, l'ampleur de ces destructions reste inconnue. L'accès aux chambres funéraires, protégées par plusieurs dalles de pierre, était-il trop difficile pour les pilleurs?

Dans les environs de l'enceinte funéraire, à l'extérieur de celle-ci, des temples accueillaient diverses manifestations de culte telles que des offrandes rituelles, et plusieurs palais recevaient les visiteurs et leurs serviteurs. Les vestiges de ces constructions sont maigres : quelques tessons de tuiles, des blocs de pierre taillée, des restes de fondations et quelques stèles couvertes d'inscriptions.

La construction des parcs funéraires commençait du vivant des empereurs. Leur coût considérable a dû peser lourdement sur les finances de l'État. Comme les mausolées étaient conçus pour l'éternité, leur entretien et la célébration du culte des ancêtres devaient mobiliser de nombreux préposés. La conception traditionnelle chinoise d'une continuité entre le monde persistant des relations entre l'âme du disparu et ses descendants, associée à une pratique mortuaire de glorification des empereurs défunts, avait conduit très tôt à la construction de mausolées qui comportaient des espaces de repos pour les morts et d'accueil pour les vivants ; ce culte des morts culmina sous la dynastie des Tang.

Les études pionnières

Les travaux que nous avons effectués éclairent d'un jour nouveau l'histoire ancienne de la Chine. La synthèse des données des trouvailles archéologiques et des chroniques officielles (les annales des Tang et les chroniques locales) est particulièrement instructive. À ce jour, nous n'avons étudié que la surface de quatre mausolées impériaux et de leurs tombes annexes ; les autres tombeaux seront étudiés au fur et à mesure des possibilités. Au cours de nos repérages,

PIERRE THUILLIER

La revanche des sorcières

L'irrationnel et la pensée scientifique

BELIN

La science, nous dit-on, est « objective » et « neutre ». Un fossé pratiquement infranchissable séparerait la rationalité scientifique du domaine maudit de « l'irrationnel ».

Le puritanisme rationaliste, pourtant, risque fort de dissimuler la profondeur et la multiplicité des relations qui unissent le monde de la science à celui de la religion, pis encore à celui de la magie. Mains exemples, dont le plus fameux est sans doute fourni par Newton, sont là pour le confirmer : la science expérimentale a une dette envers les sciences dites « occultes ».

Pierre Thuillier est philosophe et historien des sciences. Il enseigne à l'université Paris VII.

code 2110 – 160 pages

Prix : 132 F

Voir bon de commande p. 98

BELIN

nous avons décalqué sur papier de riz les inscriptions figurant sur les tombes et sur les stèles. Nous voulons les comparer avec les inscriptions des dynasties suivantes.

Dans un premier temps, nous nous préoccupons des sites dont les vestiges sont directement accessibles. Des relevés sont complétés d'un repérage, d'une

description et d'un enregistrement photographique de tous les objets et monuments. Nous prenons notamment des paires de vues stéréographiques des sculptures. Grâce à des points de repère sur l'objet photographié, on peut exploiter les images de manière très fine (voir la figure 5). Les modèles tridimensionnels ensuite engendrés par ordinateur

permettent de déterminer les dimensions exactes des profils ou des reliefs. Nous cherchons aujourd'hui des méthodes automatiques de mise en correspondance des vues stéréoscopiques.

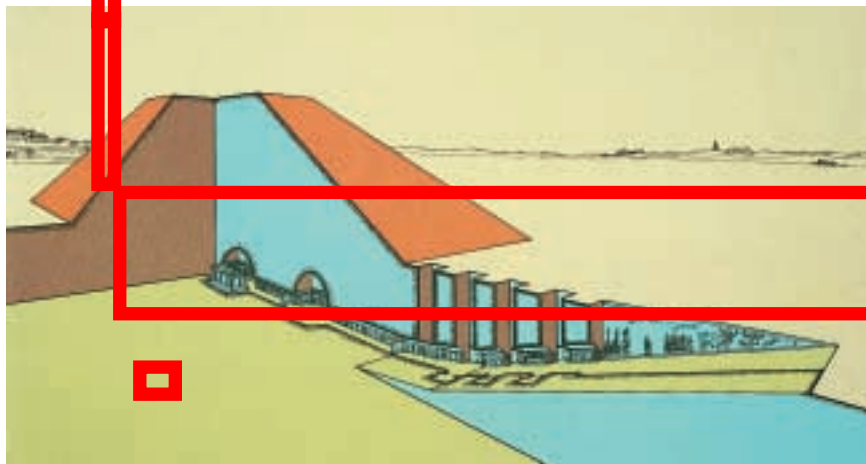
L'établissement d'un plan général de l'ensemble des sites funéraires, qui couvrent quelque 15 kilomètres carrés avec leurs dépendances extérieures, est très long. Nous dressons des plans à une échelle comprise entre 1:100 et 1:5 000. Comme le relief naturel était à l'origine du choix des sites, nous notons les structures du paysage, complexe et parfois peu accessible.

Pour la réalisation de plans d'ensemble dressés à une échelle allant du 1:25 000 au 1:1 000 000, ainsi que pour les modèles tridimensionnels, nous exploitons des images par satellite (voir la figure 6). Quand les prises de vues réalisées par les satellites *Spot* et *Landsat* ne sont pas assez précises pour la réalisation de cartes avec indication de niveau de tous les points de repère, nous les combinons avec les relevés effectués par d'autres moyens.

L'étude archéologique et historique de monuments tels que ces sépultures de la dynastie Tang est d'autant plus urgente que ceux-ci sont progressivement dégradés par les précipitations acidifiées par les rejets industriels. La tâche de conservation devrait être facilitée par l'ouverture de la Chine.



6. VUE D'ENSEMBLE DE L'ENCEINTE INTÉRIEURE du domaine du Qiaoling. La photographie prise par satellite permet de reconnaître le massif montagneux auquel s'adosse le mausolée. La ligne rouge indique le tracé du mur d'enceinte ; l'entrée du tombeau à mi-pente de la montagne, les tours d'angle, les portes percées dans la muraille et le chemin de l'âme Sud sont également indiqués.



7. ON N'A PAS ENCORE FOUILLÉ les tombeaux des empereurs Tang, mais on pense qu'ils ressemblent aux tombes secondaires qui les accompagnaient et où reposaient la famille et les proches de l'empereur. Sur cette coupe d'un de ces tombeaux, on voit la rampe d'accès, venant du Sud, avec des puits d'aération, et le couloir horizontal qui conduisait à une antichambre, puis à la chambre mortuaire.

Alexander KOCH travaille depuis 1993 au Musée central romain-germanique de Mayence.

Alexander KOCH, *Untersuchungen zu tang-zeitlichen Kaisermausoleen in der Provinz Shaanxi (VR China)*, in *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz*, vol. 41, pp. 575-602, 1994.

Dietrich ANKNER, Gong QIMING et Uwe HERM, *Chinesisch-deutsches Restaurationsprojekt in Xi'an*, in *Arbeitsblätter für Restauratoren*, vol. 28, n° 1, 1995.

Alexander KOCH, *Kaisergrabanlagen der Tang-Dynastie (618-907 n. Chr.) in der Provinz Shaanxi, VR China. Ein chinesisch-deutsches Forschungsvorhaben*, in *Archäologisches Nachrichtenblatt*, vol. 1, n° 2, pp. 205-210, 1996.

Jacques GERNET, *Die chinesische Welt*, Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1987.

Roger GOEPPER, *Das alte China. Geschichte und Kultur des Reiches der Mitte*, Bertelsmann Verlag, Munich, 1988.

Des instruments à vent harmoniques

JEAN-PIERRE DALMONT • JOËL GILBERT • JEAN KERGOMAR

Les physiciens complètent le savoir-faire des facteurs d'instruments en étudiant la production du son dans les instruments à vent.

Comment un musicien juge-t-il de la qualité d'un instrument à vent ? Divers éléments interviennent, y compris le passé de l'instrument, son utilisation, son aspect, voire son prix. Le maniement des clés, des pistons ou de la coulisse de l'instrument doit aussi être adapté pour chaque note. Toutefois, les qualités principales qui guident le jugement des instrumentistes à vent sont de nature acoustique : la justesse, le timbre et son homogénéité, et la facilité d'émission.

Au cours de l'histoire, les facteurs d'instruments ont acquis un savoir-faire pour répondre à ces attentes. Les physiciens ont cherché à expliquer les lois physiques sous-jacentes à l'art des facteurs et leur proposer de nouveaux outils : la caractérisation objective des qualités d'un instrument et la simulation numérique fondée sur la résolution des équations de l'acoustique permettent d'identifier des paramètres qui déterminent la justesse, la sonorité ou la facilité d'émission.

Si l'on admet que la hauteur perçue d'une note correspond à la fréquence fondamentale du son, ce qui est en général assez bien vérifié pour les instruments à vent, on estime la justesse en mesurant cette fréquence fondamentale. Pour une configuration donnée d'un instrument, la fréquence fondamentale est principalement imposée par ses caractéristiques acoustiques, mais pas uniquement : le musicien peut, en changeant la position et la tension de ses lèvres, faire varier la hauteur de la note jusqu'à un demi-ton. Plus généralement, chaque musicien apprend à compenser les défauts de son instrument. Le résultat musical est

donc plus ou moins satisfaisant. Mais, que de la qualité de son instrument. S'il est donc relativement facile d'affirmer qu'un musicien joue juste ou faux sur un instrument donné, il est beaucoup plus difficile de savoir si l'instrument qu'il joue est juste ou non : il est tout aussi possible de jouer juste sur un instrument faux que de jouer faux sur un instrument juste.

Pour nous affranchir de cette difficulté, nous avons substitué à l'instrumentiste un système mécanique, une « bouche artificielle ». Dans ce système, qui permet un fonctionnement réaliste de l'instrument, la mise en vibration de l'air est contrôlée par quelques paramètres : la pression d'alimentation, la position et la pression d'appui des lèvres. Un autre dispositif expérimental permet de mesurer, à chaque fréquence, l'impédance acoustique de l'instrument proprement dit, c'est-à-dire l'amplitude de sa réponse acoustique à une excitation donnée. Les fréquences de résonance, qui correspondent aux notes jouables avec cet instrument, sont les fréquences des différents maximums de l'impédance.

Nous avons vérifié expérimentalement, puis par le calcul et la simulation, que, pour un instrument présentant plusieurs fréquences de résonance bien marquées, l'harmonicité de celles-ci (le fait qu'elles soient des multiples entiers de la fréquence fondamentale) est la condition principale de la qualité acoustique. Si l'harmonicité est bonne, le jeu de l'instrumentiste est facile et le timbre de l'instrument est riche ; si l'harmonicité est faible, l'instrument reste jouable, mais de sonorité médiocre ; si elle est importante, l'émission de notes stables peut être impossible.

L'étude scientifique des instruments de musique ouvre aussi des champs d'exploration aux créateurs, facteurs et musiciens. Pour les bois, la perce de l'instrument (la forme de son tuyau) détermine les fréquences de résonance et ses autres caractéristiques acoustiques. Le cône et le cylindre ont été empiriquement sélectionnés par les facteurs comme formes de base de ces instruments. En nous fondant sur le critère de l'harmonicité, nous avons découvert une famille plus générale d'instruments potentiels, dont nous avons vérifié qu'ils sont jouables.

Son et harmonicité

Un son est une vibration de l'air perçue par l'oreille, sensible aux variations rapides de pression sur le tympan. Ces variations, si elles sont périodiques, sont interprétées par notre cerveau comme des « hauteurs », des notes. Cette notion subjective de hauteur est liée à la notion objective de fréquence : à une hauteur donnée on associe une fréquence. Ainsi la note *la* jouée par le hautboïste pour accorder l'orchestre correspond à une fréquence de 440 hertz.

Qu'est-ce qui différencie un son d'un bruit ? En général, les bruits ne sont pas périodiques, et l'on ne peut pas leur associer de hauteur précise. Toutefois, un bruit peut être périodique : il devrait être d'une

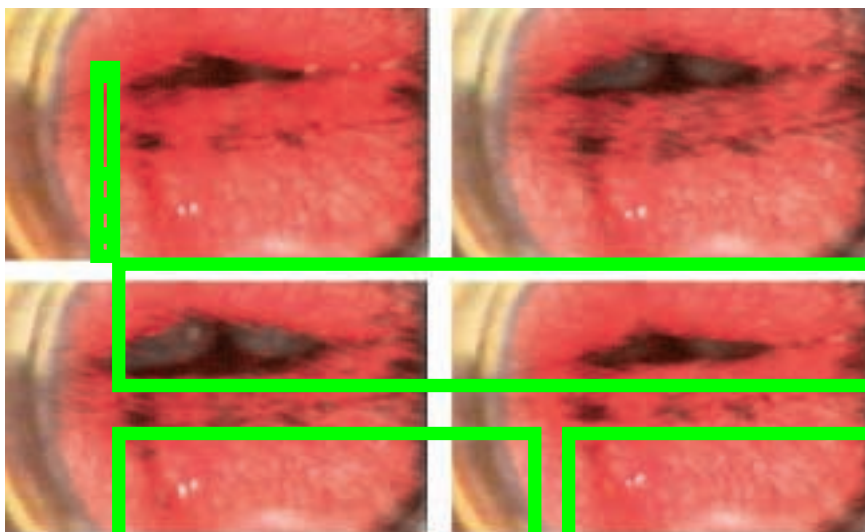
durée infinie. Il est en outre souvent possible de trouver une certaine périodicité dans un bruit. Une opération mathématique, nommée « transformation de Fourier », isole dans les variations temporelles de pression les fréquences émises. Un son périodique est caractérisé par un spectre de Fourier



Guy Le Querrec/Magnum

1. L'INSTRUMENTISTE EXPÉRIMENTÉ varie sa manière de jouer selon le résultat musical qu'il recherche. Il a appris à commander automatiquement et instantanément son instrument et la façon dont il l'embouche (tension des lèvres, pression d'air dans la bouche, appui de ses lèvres sur l'embouchure...). Il compense ainsi les

éventuels défauts des instruments. Pour caractériser objectivement ceux-ci et les comparer, nous avons mis au point une «bouche artificielle», système mécanique qui reproduit quelques paramètres de commande importants du musicien. Elle permet d'emboucher les instruments de façon reproductible.



2. LES LÈVRES DU TROMBONISTE s'écartent et se referment alternativement (de gauche à droite et de haut en bas). Elles transmettent cette oscillation à l'air soufflé dans l'instrument. Lorsque la fréquence correspond à une fréquence de résonance de l'instrument, un régime permanent s'établit : la réaction acoustique de l'instrument sur les lèvres favorise l'oscillation de ces dernières, et la note est facile à entendre.

harmonique, c'est-à-dire dont l'amplitude n'est non nulle qu'autour de fréquences multiples de la fréquence fondamentale, les harmoniques. Au contraire, dans le spectre des fréquences d'un bruit, toutes les fréquences sont présentes.

Dans la musique tonale occidentale, la combinaison des sons est régie par les lois de l'harmonie, grammaire musicale pour l'art d'associer les sons. Le point de départ du système est que l'on peut marier les sons... qui vont bien ensemble, c'est-à-dire dont la combinaison a un spectre harmonique. Ainsi, si l'on combine deux sons purs de fréquence 110 hertz et 220 hertz, le son résultant est de fréquence 110 hertz et son spectre est harmonique, donc agréable à l'oreille (il s'agit d'un *la* et de son octave). C'est ce que l'on fait depuis des siècles lorsque l'on fait sonner ensemble plusieurs tuyaux d'orgue, de son premier organe à nos jours. Les sons sont dans un rapport harmonique. Plus récemment, dans les premiers synthétiseurs « synthèse additive », le son d'un instrument était reconstitué par la superposition de signaux sinusoïdaux dont les fréquences correspon-

daient aux harmoniques de la note fondamentale et les amplitudes relatives dépendant du timbre recherché).

Plus généralement, selon la théorie de la consonance de Helmholtz, deux notes se combinent agréablement si leurs fréquences sont dans un rapport numérique simple. On construit ainsi la série des intervalles musicaux,

du plus commun au moins commun : octave (fréquences dans un rapport 2/1), quinte (3/2), quarte (4/3), tierce majeure (5/4), tierce mineure (6/5). C'est à partir de ces intervalles qu'est définie la gamme dite naturelle (voir l'encadré page 82).

Excitation et résonance

Dans un instrument à vent, le son est produit par la modulation temporelle du débit de l'air insufflé continûment par l'instrumentiste. Cette modulation est commandée par une oscillation mécanique auto-entretenue qui fait varier les dimensions de l'ouverture à l'entrée de l'instrument (oscillation de l'anche contre la table du bec de clarinette ou oscillation des lèvres du tromboniste) ou par l'oscillation d'un jet de part et d'autre d'un biseau pour la flûte.

Lorsqu'un clarinettiste souffle fait entrer l'air dans son instrument, l'anche se déforme pour atteindre une nouvelle position d'équilibre, définie par ses caractéristiques mécaniques et par la différence de pression entre la cavité buccale et l'intérieur du bec : le

jet d'air sortant ne produit aucun son. Si l'instrumentiste souffle plus fort, la différence de pression augmente et la réaction acoustique du tuyau sonore empêche l'anche de trouver une position d'équilibre. En mode de fonctionnement « normal », l'anche oscille périodiquement : sa fréquence fondamentale coïncide avec l'une des fréquences de résonance

du tuyau sonore. La hauteur de la note jouée (la fréquence fondamentale de l'oscillation) est donc contrôlée par l'instrument.

Dans le cas d'une embouchure de cuivre, les lèvres du musicien remplacent l'anche. L'instrumentiste commande mieux cet excitateur : il force plus facilement la vibration à des fréquences légèrement différentes des fréquences de résonance. Le registre suraigu est un cas extrême : le mouvement vibratoire des lèvres n'est pas asservi au tuyau sonore, mais au contraire, il excite ce dernier en oscillations forcées. Le trompettiste ou le tromboniste font osciller leurs lèvres à la fréquence de jeu souhaitée sans l'aide de l'instrument de musique. Cette technique est connue sous le nom de « buzz » (« abeille ») pour le trompettiste, « *tailor* » pour le tromboniste.

Pour une position donnée des clés, des pistons ou de la coulisse (un *doigté*), un instrument à vent a plusieurs fréquences de résonance, caractérisées par les dimensions et de la perce du tuyau sonore. À chacune de ces fréquences de résonance correspond un régime d'oscillation périodique potentiel, une note potentielle. Pour que l'instrument soit juste, il est nécessaire que ces fréquences de résonance correspondent à des notes de la gamme. L'existence et le nombre de régimes jouables dépend de la forme de l'instrument, de la longueur du tuyau sonore et de leur couplage mutuel contrôlé par l'instrumentiste. Dans une configuration donnée du tuyau sonore, le musicien sait emboucher le bec ou poser ses lèvres de différentes façons pour jouer jusqu'à dix notes différentes dans le cas des cuivres ou, plus modestement, deux ou trois dans le cas des instruments à anche.

Naturellement, ces instruments peuvent jouer bien plus de deux ou trois notes : on modifie la forme de l'instrument (principalement sa longueur) à l'aide de trous latéraux, de pistons ou d'une coulisse. L'harmonicité des fréquences de résonance simplifie l'utilisation de ces instruments. On sépare le second régime du premier, et le même doit se permettre de jouer les mêmes notes à des hauteurs différentes. Une exception toutefois pour la clarinette, dont les fréquences de résonance sont des multiples impairs de la fréquence fondamentale, et dont le second régime est plus aigu que le premier d'une octave et une quinte.

Timbre et émission

En déterminant les fréquences de résonance d'un saxophone, nous avons montré les conséquences de l'inharmonicité des fréquences de résonance sur les qualités acoustiques de l'instrument. Un tube fermé de hauteur réglable, placé sur la partie supérieure de l'instrument, permettait de modifier les fréquences de résonance.

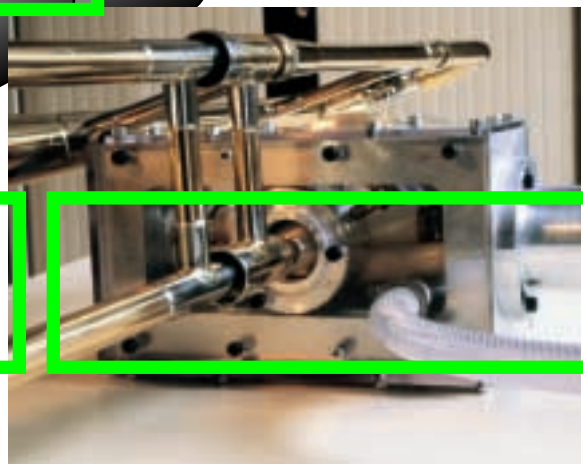
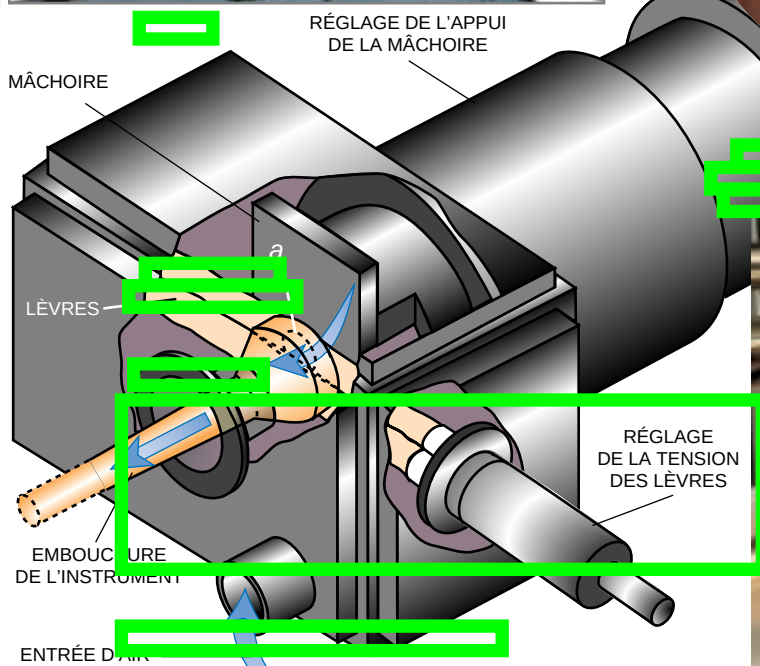
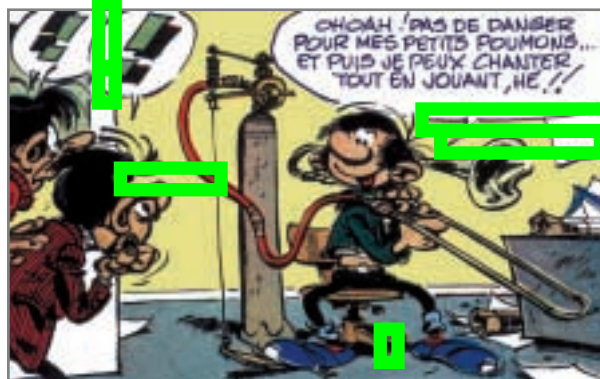
Une variation continue d'inharmonicité provoque un changement de timbre de la note émise : plus l'inharmonicité croît, plus le timbre de la note s'appauvrit. En effet, lorsque les fréquences de résonance ne sont pas parfaitement harmoniques, les harmoniques supérieurs de la note jouée

ne coïncident pas avec les fréquences de résonance. L'oscillation est toujours possible, mais l'amplitude des harmoniques diminue, car ces fréquences ne sont plus favorisées par le résonateur : le timbre s'appauvrit. Avec le saxophone modifié, nous avons mesuré la diminution de l'amplitude du second harmonique à mesure que l'inharmonicité augmente (voir la figure 4).

Le musicien apprend à corriger ces hétérogénéités de timbre, notamment en embouchant différemment son instrument, mais elles sont clairement mises en évidence avec une bouche artificielle. On retrouve ce type de phénomène avec le hautbois, pour lequel les notes les plus aiguës du premier registre ont un timbre plus nasillard,

le timbre de la clarinette, dont le timbre de la note de gorge (*sol* et *la*). L'émission de cette note nécessite l'ouverture d'un trou latéral de diamètre beaucoup plus faible que les autres, nommé trou de registre, dont la fonction première est de faciliter l'émission du second registre pour certains doigtés. L'ouverture de ce trou dégrade l'harmonicité de l'instrument.

Le musicien apprend à corriger ces hétérogénéités de timbre, notamment en embouchant différemment son instrument, mais elles sont clairement mises en évidence avec une bouche artificielle. On retrouve ce type de phénomène avec le hautbois, pour lequel les notes les plus aiguës du premier registre ont un timbre plus nasillard,



3. GASTON LAGAFFE, partisan du moindre effort, a-t-il précédé les physiciens dans l'emploi d'une « bouche artificielle » ? Dans celle mise au point par les auteurs et Jean-François Petiot, de l'École centrale de Nantes, le masque facial du tromboniste (*en haut, à droite*), est réduit aux lèvres, tubes de latex remplis d'eau placés à l'intérieur de la bouche (*dessin et photographie en bas*), et à une mâchoire qui les presse contre l'embouchure métallique de

l'instrument. Un trou (a) dans la mâchoire laisse passer l'air vers l'instrument à travers les lèvres. Un tel système permet de réaliser des expériences et des mesures inaccessibles avec un musicien : tenue de la même note pendant plusieurs secondes, conservation des paramètres de jeu d'une note à l'autre, mesures de pression et de vitesse à l'intérieur du bec ou de la cavité buccale, suivi du mouvement des lèvres.

conséquence d'une inharmonicité plus importante des fréquences de résonance, caractéristique des cônes tronqués courts.

L'harmonicité des fréquences de résonance est aussi nécessaire pour que l'instrument puisse jouer juste.

pour qu'un régime d'oscillations périodiques stable s'établisse. Lorsque les fréquences de résonance sont harmoniques, les résonances d'ordre supérieur sont comparables en amplitude à la fondamentale et elles favorisent son établissement. Par contre, lorsque l'inharmonicité est forte et que la valeur de l'impédance est du même ordre de

grandeur à plusieurs fréquences de résonance, plusieurs régimes périodiques incompatibles (inharmoniques) sont en compétition. C'est pourquoi l'oscillation est quasi périodique qui combine les différents régimes et dont le

Nous l'avons vérifié avec le saxophone : lorsque l'on dégrade l'harmonicité, le régime oscillatoire se dégrade. On ne peut pas mettre, puis bifurquer vers une note qui roule.

Enfin, l'harmonicité des fréquences de résonance est importante pour que la hauteur de la note ne dépende pas

trop de sa puissance. En effet, plus on joue fort, plus les pics d'impédance aux fréquences élevées interviennent dans la sélection.

Des formes harmoniques

Le facteur d'instruments, qui veut fabriquer des instruments dont toutes les notes jouables sont justes, recherche un compromis entre la justesse des différentes notes d'un même registre, obtenues par l'allongement ou le raccourcissement de l'instrument, et l'harmonicité des différents registres pour chaque doigté. La théorie montre que les résonateurs qui remplissent ces conditions sont soit des cylindres, soit des cônes.

Les instruments à vent utilisés pour jouer la musique occidentale sont effectivement des cylindres, telles la flûte traversière et la clarinette, des cônes, tels le hautbois, le basson, le saxophone et certaines flûtes, mais aussi des associations de cylindres et de cônes, tels les cuivres, bien que cette géométrie satisfasse mal le critère d'harmonicité.

De toute façon, les fréquences de résonance des instruments réels ne sont jamais parfaitement harmoniques. L'écart par rapport aux formes théoriques du cylindre ou du cône est une source d'inharmonicité. Ainsi, pour les cônes utilisés avec une anche (hautbois, saxophone et basson), le remplacement de la pointe du cône par l'embouchure est une source d'inharmonicité : les fréquences de résonance ne sont harmoniques qu'au cône est complet.

Nous avons confirmé et prolongé, par le calcul puis par la simulation, un résultat obtenu dans les années 1960 par Arthur Benade et Cornelius Nederveen : lorsqu'on fait varier la longueur du bec, on obtient une faible inharmonicité tout à fait tolérable si le volume du bec est égal à celui de la tronçature du cône. Un léger resserrement de la tronçature du cône, qui diminue le volume de l'instrument diminue encore l'inharmonicité. Ce resserrement est souvent réalisé par les facteurs de hautbois. Mais, si le cône est court relativement à la tronçature, l'inharmonicité reste significative : nous avons vu que les dernières notes du premier registre ont un timbre plus pauvre sur ces instruments.

Dans le cas des instruments à trous latéraux, la présence de ces trous, même fermés, détériore l'harmonicité. Ce phénomène est compensé par la modifi-

Qu'est-ce que jouer juste ?

Une note n'est pas juste en elle-même, mais par rapport aux autres. On distingue la justesse harmonique et la justesse mélodique. Lorsque plusieurs notes sont jouées simultanément, elles sont harmoniquement justes si leurs fréquences sont dans un rapport rationnel ; deux notes successives sont mélodiquement justes si leur relation correspond à la tonalité (notes de la gamme) dans laquelle ces deux notes interviennent. La justesse harmonique a des fondements physiologiques, tandis que la justesse mélodique est plus culturelle.

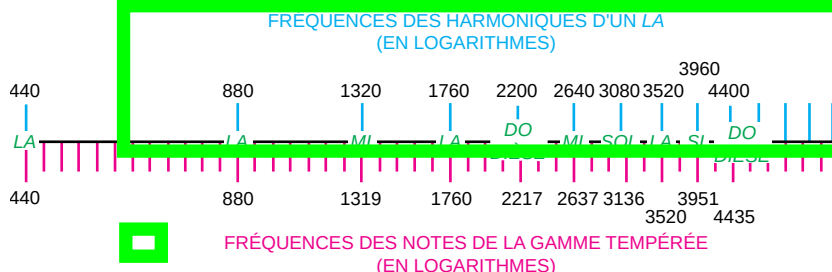
La justesse harmonique et la justesse mélodique ne sont pas toujours compatibles. Ainsi la nécessité pour les instruments à clavier de pouvoir jouer dans toutes les tonalités, incompatibles entre elles, implique de réaliser un compromis lors de l'accord : c'est ce que l'on appelle le tempérament. La plupart des intervalles sont alors harmoniquement faux, mais si le tempérament est bien réalisé, l'oreille accepte ce compromis.

Ainsi, pour le tempérament égal, on divise l'octave en 12 demi-tons égaux. Le rapport de fréquence entre l'octave et la note fondamentale étant 2, le rapport de fréquences

entre deux notes séparées d'un demi-ton est donc $2^{1/12}$. Ce tempérament est de qualité médiocre : tous les intervalles excepté l'octave sont faux relativement aux intervalles harmoniques (dont les rapports de fréquence entre les notes sont des quotients de deux entiers). Par exemple, une tierce majeure (deux tons) correspond à un rapport de $(2^{1/12})^4$ dans la gamme tempérée, soit 1,2599, et de 5/4 dans la gamme harmonique, soit 1,25.

Pour les instruments à vent, qui ne sont pas à son fixe, le problème du tempérament n'est pas aussi crucial : les musiciens adaptent la hauteur de la note, dans la mesure du possible, en fonction de son rôle musical. Toutefois, là aussi, un compromis est nécessaire. Pour que la note soit facile à émettre

et que le timbre soit riche, l'inharmonicité doit être réduite au minimum. La justesse d'une note jouée harmoniquement est proche de la gamme naturelle, et viole ainsi le tempérament. Mais, si on joue une série de notes, on peut compenser l'inharmonicité en jouant la note à l'extrême. On obtient donc une note juste ou facilement jouable.



Les fréquences des notes qui forment la gamme tempérée (en rose), sont régulièrement espacées sur une échelle logarithmique : l'octave est divisée en 12 demi-tons égaux. Les harmoniques d'une note (en bleu), ici la, correspondent, jusqu'au dixième, à peu près à des notes de l'échelle régulière, excepté l'harmonique 7 (sol), trop bas de 30 centièmes de demi-ton. L'écart pour la quinte (mi) est de deux centièmes de demi-ton, alors qu'il est de 14 centièmes de demi-ton pour la tierce (do dièse).

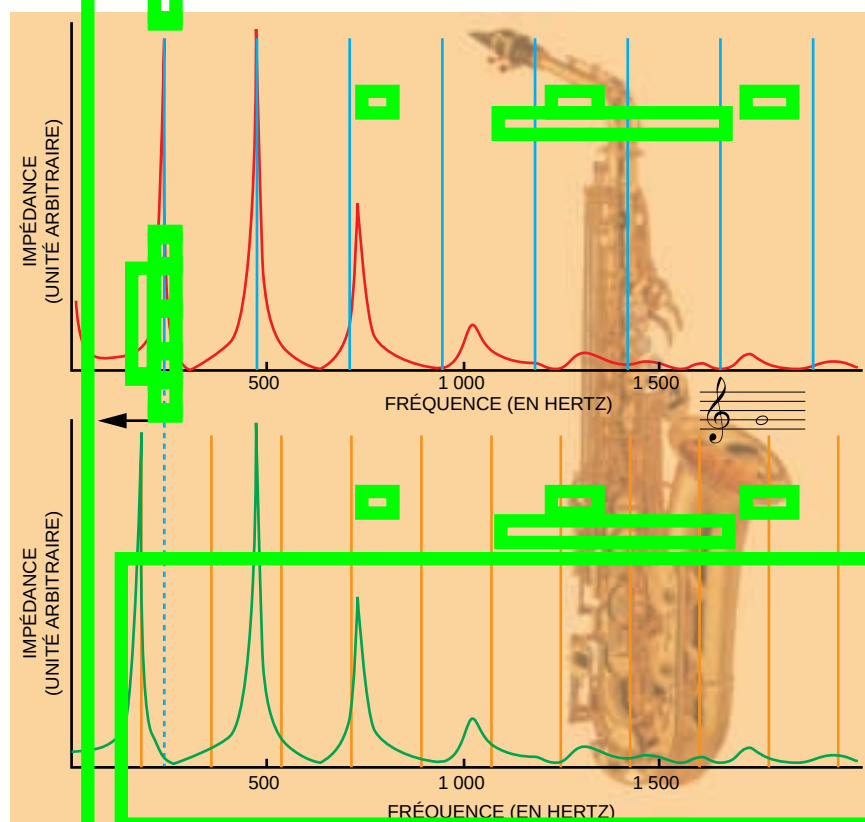
cation locale de la perce de l'instrument. Cela est réalisé sur certaines clarinettes dont la partie supérieure (le barillet) n'est pas cylindrique, comme le reste de l'instrument, mais légèrement conique. Nous avons observé avec différents modèles de clarinettes joués par une bouche artificielle, que la forme exacte du barillet a des conséquences directes sur le timbre de l'instrument. Des inhomogénéités de timbre et des différences de hauteur apparaissent pour des notes différentes de la gamme chromatique, ce qui permet de distinguer sans ambiguïté les instruments.

Enfin, même pour un cylindre parfait, l'harmonicité exacte ne peut être obtenue : elle est perturbée par les frottements visqueux de l'air au voisinage des parois, qui dissipent l'énergie sous forme de chaleur, réduisent l'impédance acoustique pour les fréquences de résonance et décalent légèrement celles-ci. La vitesse du son dépend alors de la fréquence. Les conséquences de ce phénomène sont indépendantes du diamètre du tuyau et jamais négligeables ! En effet, lorsque le diamètre du cylindre est grand, les pertes de viscosité diminuent et les fréquences de résonance se rapprochent des harmoniques, mais les pics de la courbe d'impédance se resserrent et les fréquences de résonance s'éloignent de la fréquence de l'harmonique. En cela un tuyau diffère d'une corde, qui peut être très harmonique (celle de la guitare ou du clavecin en particulier).

Des instruments discontinus

Les instruments à vent peuvent-ils avoir d'autres formes ? En partant des formes connues que sont les cylindres et les cônes, mais en nous autorisant des variations brusques de section, nous avons découvert une infinité d'intermédiaires possibles, formés de tronçons de cônes de longueurs égales mis bout à bout, les dimensions du premier déterminant celles des autres. Ces résonateurs sont *a priori* jouables à l'embouchure d'un saxophone.

Seule une partie de ces résonateurs est utilisable avec une anche : ceux pour lesquels les troncs de cônes sont des cylindres. La section du $n^{\text{ième}}$ cylindre est alors égale à celle du premier multipliée par la somme des n premiers entiers (soit $n(n+1)/2$). Aux changements de section, les diverses réflexions se compensent et permettent une pro-



4. LES FRÉQUENCES DE RÉSONANCE d'un saxophone alto jouant la note *sol* grave sont celles où l'impédance acoustique (en bleu, en rouge) est maximale. Les fréquences harmoniques (traits bleus) de la note fondamentale en sont des multiples exacts, les fréquences de résonance sont légèrement décalées. L'harmonicité des résonances d'un tuyau sonore n'est pas un phénomène naturel, mais résulte de nombreux ajustement et compromis réalisés par le facteur d'instruments. Lorsque l'on détériore l'harmonicité du saxophone en ajoutant un tube de longueur variable sur son bocal, la première fréquence de résonance diminue (courbe verte, en bas) : les deuxième et troisième résonances s'écartent de plus en plus des harmoniques de la note fondamentale (en orange). Le timbre s'appauvrit, l'émission de la note est de plus en plus difficile, puis le régime d'oscillation bifurque vers une combinaison des oscillations aux deux premières fréquences de résonance.

pagation similaire à celle d'une onde progressive. Le résultat sonore est comparable à celui obtenu avec un saxophone. Quand le nombre de troncs tend vers l'infini, on obtient un cône complet. Quand ce nombre est égal à un, on a un cylindre. Par ailleurs, si le résonateur est constitué de N cylindres, les fréquences de résonance multiples de $N+1$ sont absentes. Dans le cas particulier d'un cylindre, les résonances paires sont bien absentes, comme on l'observe sur la clarinette.

Le cas des cuivres est légèrement différent. La section du bocal est directement liée aux fréquences de résonance de l'instrument, est beaucoup plus fortement contrôlée par la façon dont l'instrumentiste embouche celui-ci. L'existence de fréquences de résonance harmoniques est moins stricte. En conséquence, la forme des résonateurs dans le cas des cuivres est plus diverse que dans le cas des instruments à anches.

De manière générale, outre l'embouchure, les cuivres sont décomposables en trois parties : une partie cylindrique, une partie conique et le pavillon. Dans le trombone, la partie cylindrique est de loin la plus importante, alors que, dans le cor de chasse elle est quasi inexistante. Pourtant, dans tous les cas, quelle que soit la proportion entre les deux parties, le résultat est acceptable. Cela est d'autant plus étonnant que, pour un même instrument, le rapport entre les deux portions varie par l'allongement

du cylindre lorsque l'on actionne les pistons ou la coulisse. Le paradoxe a été levé, dans les années 1930, par Henri Bouasse : avec une partie cylindrique et une partie conique bien choisies, les troisième, quatrième, cinquième et sixième fréquences de résonance sont harmoniques entre elles à mieux que deux pour cent, la



5. DIFFÉRENTES FORMES de résonateur possèdent des fréquences de résonance harmoniques lorsqu'ils sont fermés à une extrémité (cas de tous les instruments à vent excepté les flûtes). Le cylindre (a, clarinette) et le cône (b, hautbois) sont les seuls utilisés dans la pratique pour les instruments à anche. Pour conserver cette propriété lorsque l'on tronque le cône afin d'y placer une embouchure, celle-ci doit être de volume équivalent à la troncation. Si les facteurs acceptaient de recourir à des discontinuités de section, ils pourraient fabriquer des instruments de forme intermédiaire, en enchaînant des cylindres de même longueur (c). Pour les cuivres, (d, trombone et e, cor), le musicien contrôle mieux la note émise : l'utilisation d'assemblages de cônes et de cylindres, dans des longueurs de rapport variable, permet de modifier la note.

seconde résonance étant trop basse de six pour cent (un demi-ton). Dans les instruments réels, les fréquences de résonance, excepté la première, trop basses, sont effectivement dans une série harmonique, la seconde étant en général aussi trop basse, mais dans une moindre mesure.

Cette inharmonicité de la première fréquence de résonance est toutefois compensée par les instrumentistes : les notes du registre le plus grave ne coïncident pas avec des fréquences de résonance du tuyau, mais avec la fondamentale d'un régime d'oscillation d'ordre supérieur. Bouasse avait observé ces régimes d'oscillation particuliers et remarqué qu'en remplaçant l'embouchure de trombone par un bec de saxophone ténor de volume identique, la note la plus grave était une quinte plus grave et correspondait au contraire à la première fréquence de résonance du tuyau.

Ce phénomène est très présent dans le cas du basson : dans le spectre des notes graves, l'énergie acoustique à la fréquence fondamentale est très faible, ce qui n'empêche pas l'oscillation d'être produite à cette fréquence, par combinaison des harmoniques aigus du spectre où l'énergie est surtout présente.

Mieux encore, un bassoniste suisse, N. Rihs, a récemment obtenu,

en soufflant dans un tuyau fermé et en modifiant légèrement l'anche, une note fondamentale à l'octave au-dessous de la note la plus grave obtenue normalement pour un doigté donné. La fréquence fondamentale de cette note ne correspond à aucune fréquence de résonance de l'instrument, qui devrait, pour cela, être deux fois plus long.

Ces observations ont ainsi retrouvé expérimentalement un résultat théorique obtenu en 1983 par M. McIntyre et J. Woodhouse, de l'Université de Cambridge, et R. Schumacher, de l'Université Carnegie-Mellon. Ils avaient modélisé de façon simplifiée l'instrumentiste et l'instrument, en couplant deux équations dont l'une correspondait à un excitateur (l'instrumentiste et l'embouchure) et l'autre à un oscillateur (le tube sonore). Ils se plaçaient ainsi dans le domaine plus général de la physique des oscillateurs non linéaires. En fait, les paramètres

des paramètres (dont les équivalents physiques seraient la pression d'alimentation, la raideur de l'anche et l'ouverture entre l'anche et la table du bec) et les conditions initiales, ils obtenaient, par simulation, une cascade « sous-harmonique », c'est-à-dire des notes de fréquences moitié, quart, de la fréquence fondamentale.

L'inharmonicité créatrice

L'inharmonicité des fréquences de résonance, dont nous avons vu qu'elle est souvent préjudiciable au jeu musical, est néanmoins recherchée dans quelques cas. Ainsi les positions possibles des lèvres sur l'anche de la clarinette ou du saxophone sont peu nombreuses, et l'émission des régimes d'ordre supérieur ou égal à deux est difficile : sur un instrument baroque, on ne peut pas passer continûment d'une note à son octave, sans attaquer celle-ci. Les instruments à anche « modernes » sont pourvus d'une clé de registre, avec laquelle on découvre un trou de faible diamètre (de l'ordre du millimètre), placé de manière à modifier la

section, ce qui soit décalée et que l'impédance acoustique y soit fortement diminuée, sans modification pour la seconde résonance. Cette inharmonicité apportée entre les deux premières fréquences de résonance rend l'émission du premier régime quasi impossible au profit du second, et apporte un confort appréciable à l'instrumentiste.

L'inharmonicité est aussi une source d'expressivité musicale. Pour le saxophone ou le hautbois, de perce conique, lorsque le volume du bec est très différent du volume de la troncation du cône, la forte inharmonicité des résonances rend difficile l'émission des notes graves et peut provoquer l'émission de régimes d'oscillation quasi périodiques. Le spectre de fréquences de ces oscillations quasi périodiques est un spectre de raies pour lequel les fréquences sont des combinaisons linéaires des deux premières fréquences de résonance du doigté utilisé. Nous avons obtenu de tels régimes pour de fortes inharmonicités avec le saxophone modifié : la fréquence des roulements est voisine de la

seconde fréquence de résonance et le double de la première. De telles émissions « multiphoniques » sont aussi favorisées par certains doigtés. Ce nouveau mode de jeu polyphonique, que les facteurs d'instruments classiques tentent d'éviter, a ouvert un champ d'investigation pour la musique expérimentale et la musique improvisée.

La compréhension et la modélisation du fonctionnement des instruments de musique à vent sont donc à la fois source d'amélioration pour les instruments et d'évolution pour la musique. La facture instrumentale bénéficie ainsi de nos travaux : le logiciel « Resonans » que nous avons mis au point est aujourd'hui

d'hui couramment utilisé par plusieurs facteurs pour les instruments à vent, la dimension des trous. Nous avons aussi, en réalisant des calculs *a priori*, proposé des innovations que les facteurs n'auraient jamais imaginées : des tubes placés près de l'embouchure d'une flûte ou d'une clarinette permettent de jouer des quarts de tons, fréquents en musique contemporaine, sans doubler le nombre de trous.

Les calculs qui ont produit ces résultats ne prennent toutefois en compte que l'instrument seul, sans l'instrumentiste, et leur capacité prédictive ne concerne que la justesse des notes. En simulant les oscillations elles-mêmes, nous commençons à prévoir aussi la « qualité » des notes en termes de timbre et de facilité d'émission.

Au-delà, la compréhension du fonctionnement des instruments conduit vers une nouvelle synthèse musicale : on ne simule plus le son, mais la source du son. Les synthétiseurs sont commandés par des capteurs artificiels, donc par un véritable instrumentiste, ce qui produit des sons musicaux et évolutifs, en phase avec des causes perçues comme « physiques ». Ils se rapprochent du musicien, qui peut intervenir finement sur son instrument et réagir immédiatement sur le résultat obtenu. C'est cette interactivité et les micro-variations de justesse, de timbre, de phrasé qui permettent d'exprimer les émotions les plus subtiles.

Jean Pierre DALMONT maître de conférence, Joël GILBERT, chargé de recherche, et Jean KERGOMARD, directeur de recherche, travaillent au Laboratoire d'acoustique (UMR CNRS 6613) de l'Institut d'acoustique et de mécanique de l'Université du Maine, au Mans.

Les instruments de l'orchestre, Pour la Science, 1995.

H. BOUASSE, *Instruments à vent*, Librairie Delagrave, Paris, 1986.

N.H. FLETCHER et T.D. ROSSING, *The Physics of Musical Instruments*, Springer Verlag, New York, 1990.

Mechanics of Musical Instruments, sous la direction de J. Kergomard et J. Gilbert, *Colloquia and Lectures No.355*, International Center for Mechanical Sciences, Springer-Verlag, Vienne-New York, 1996.

C. NEDERVEEN, *Acoustical Aspects of Woodwind Instruments*, Northern Illinois University Press, De Kalb, Illinois, 1997.



Pour la recherche française, l'Amazonie n'est ni une terre inconnue, ni une mode passagère : la coopération scientifique franco-brésilienne s'est déployée en Amazonie depuis le début des années 80, et a obtenu des résultats significatifs, tant pour la connaissance de l'environnement que sur le type de développement - ou de non-développement - qui s'y produit.

Pour contribuer au « programme-pilote de préservation des forêts tropicales du Brésil », la France a choisi de favoriser le renforcement du partenariat ancien et précieux qui s'est progressivement construit entre sa recherche et la recherche brésilienne. Ce livre tire les premiers enseignements de l'effort spécial de coopération qui a été mené dans ce cadre.

code 1532 - 208 pages

Prix : 130F

Voir bon de commande p. 98



La recherche d'images numériques

DAVID FORSYTH • JITENDRA MALIK • ROBERT WILENSKY

Les programmes de recherche d'images repéreront les éléments spécifiques d'une personne, d'un lieu ou d'un objet dans les archives photographiques.

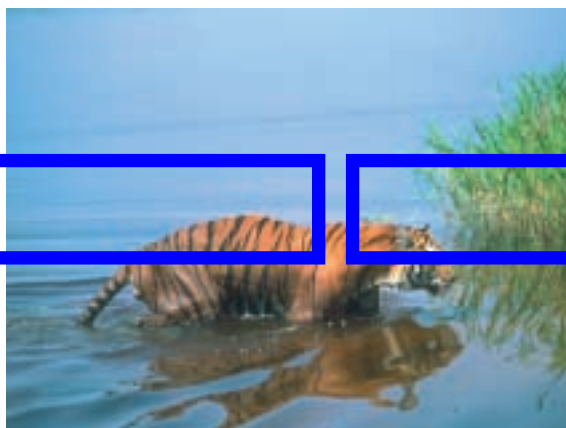
Le réseau Internet et les bibliothèques numériques qu'il relie contiennent une profusion d'informations, mais la recherche d'une information précise et, en particulier, la recherche des images restent difficiles. Aujourd'hui, un utilisateur qui cherche une image aussi simple qu'un cheval au bord de l'eau ne trouve

son bonheur que si les images sur ce sujet ont été correctement légendées.

L'expérience acquise dans les principaux centres d'archives montre qu'il est impossible de prévoir toute les demandes. En outre, la réponse à chaque nouvelle question impose une nouvelle recherche complète dans la base de données. Si, ayant trouvé l'image d'un

cheval au bord de l'eau, on demande des images qui comprennent un cheval et de l'herbe, le réexamen de la collection entière est nécessaire.

Les utilisateurs cherchent des images dans des contextes variés et avec des objectifs différents : l'un demandera aux archives d'un musée d'art combien de fois une couleur par-



1. LA RECHERCHE DE PHOTOGRAPHIES à l'aide de programmes de recherche d'images est difficile, car le mécanisme de la reconnaissance d'un objet reste mal compris. Pour trouver une photographie de fleurs pourpres dans une base de données, un

utilisateur a utilisé un programme prototype de recherche sur des images et demandé les images contenant de petites taches violacées ; quelques-uns des résultats de cette recherche sont montrés dans la rangée supérieure. Beaucoup d'images trouvées

ticulière a été utilisée pour peindre la peau dans les portraits, un autre interrogera une base de données d'images satellite pour estimer la prochaine récolte de blé, un autre cherchera dans les réserves d'agences photographiques une représentation d'un coucher de soleil pour la couverture d'une brochure touristique ; un autre enfin recherchera une série d'images des rivières du Midi afin de comparer l'impact des inondations récentes par rapport à celles des années précédentes...

On ne satisfera ces utilisateurs du réseau que si l'on met au point des méthodes automatiques d'analyse des images. L'un des moyens les plus simples de répondre à ces diverses demandes consiste à utiliser un programme qui discerne si une image donnée contient un objet spécifique, tel un cheval ou une pièce d'eau, quels que soient sa couleur, sa taille, son apparence ou l'angle de vue. Un tel programme n'existe pas encore, mais les informaticiens utilisent des méthodes variées pour le créer : ici

la psychophysiologie de la vision s'allie au raisonnement automatique pour améliorer l'analyse des caractéristiques des images.

Les programmes mis au point analysent le contenu des images de plusieurs manières. Certains recherchent des images qui s'apparentent à un modèle préenregistré. D'autres se fondent sur l'aspect général : pour identifier un champ de fleurs sauvages, ils cherchent des images qui contiennent un grand nombre de points jaunes ; pour trouver un feu, un coucher de soleil ou une voiture de sport, ils cherchent des images dont une région centrale est rouge vif. Enfin, d'autres programmes cherchent un objet si l'image contient une certaine

l'eau ou un cheval. Tous ces programmes sont ainsi des mises en œuvre de trois techniques classiques : trouver des images similaires à un modèle, analyser les images en termes de motifs (des régions de couleur ou de texture à peu près constante) et, enfin, identifier les objets à la manière de l'être humain (la première tech-

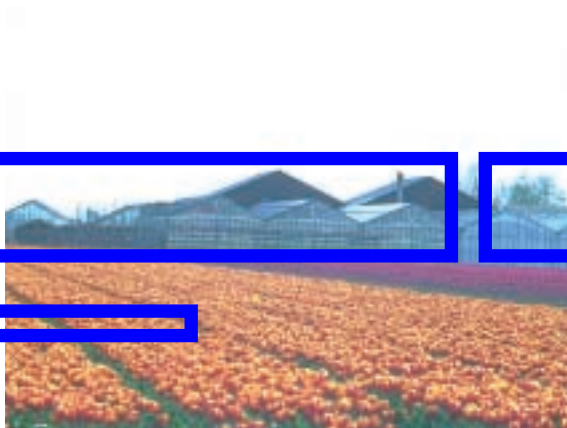
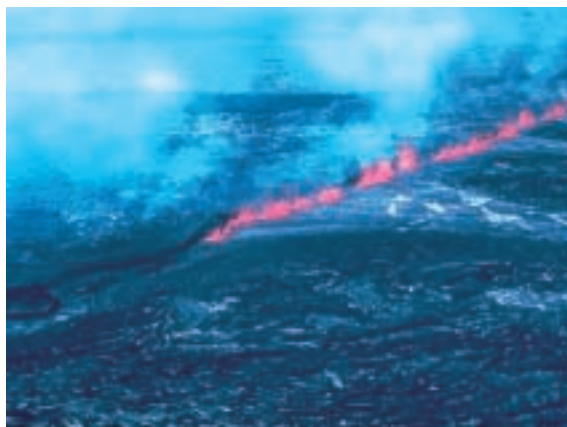
nique est décrite dans *Les circuits configurables*, par John Villasenor et William Mangione-Smith, page 62).

Facile, mais inutile

La simplicité de chacune de ces techniques est à leur efficacité. La comparaison directe de deux images est un jeu d'enfant, mais ne trouve que des ressemblances superficielles. Des changements de position, de composition ou de configuration des objets cherchés feront presque toujours échouer la comparaison : une vue de face d'un cheval ne ressemble pas à une vue de profil.

L'analyse de motifs, plus pro-

cessivement complexes : en une fraction de seconde, un programme détermine la proportion de pixels (éléments d'image) rouges, bleus ou verts d'une image. Comme les images sont composées de motifs, cette technique est utile au début d'une recherche : la plupart des logiciels de recherche d'images l'utilisent. C'est le cas, par

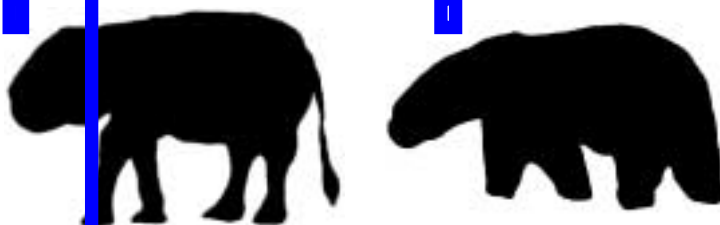


satisfont l'utilisateur, car l'objet recherché (les fleurs) y apparaissait comme des taches violettes. Pour trouver des objets plus complexes, tels des tigres, on utilise un algorithme qui recherche des zones de couleurs et de textures homogènes. Les

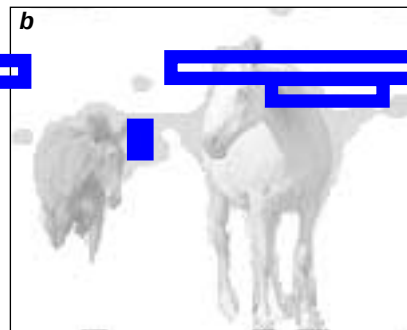
résultats de l'une de ces recherches sur le tigre sont montrés dans la rangée inférieure d'images. L'algorithme qui a trouvé ces images est beaucoup plus précis que ceux qui ignorent les formes. Ces deux programmes ont été mis au point à l'Université de Berkeley.

Trouver un cheval morceau par morceau

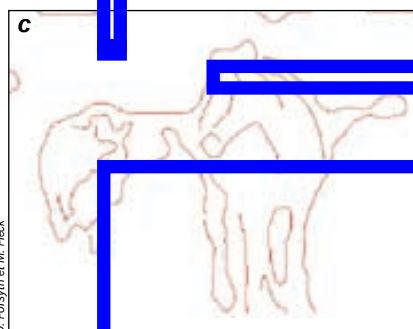
Les programmes de reconnaissance d'objets regroupent des éléments d'image en régions de taille et de complexité croissantes ; puis ils engendrent des hypothèses sur ce que ces régions composites représentent. Un programme reconnaissant des animaux à quatre pattes commence par analyser une image (a), à la recherche de zones qui pourraient être de la couleur des chevaux (b). Il définit les contours de ces régions (c), puis il cherche les régions ayant à peu près la forme du corps d'un cheval (le corps et les jambes sont approximativement des rectangles) (d). Le programme supprime ensuite les régions présentant des relations spatiales impossibles (le corps et les membres doivent être perpendiculaires) (e). Les classifications finales ne peuvent parfois être faites qu'avec une connaissance détaillée de la couleur et de la texture de la surface des objets ; même un être humain peut avoir du mal à distinguer sur la seule base de leur forme les silhouettes d'un éléphant à la trompe enroulée (en haut à gauche) d'un ours (en haut à droite).



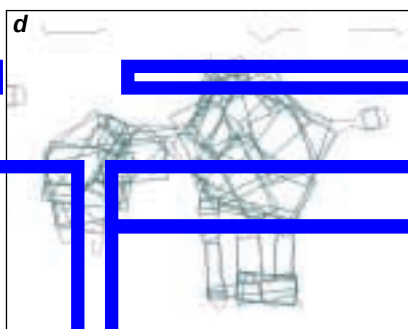
PHOTOGRAPHIE ORIGINALE



MOTIF (OMBRE DES ÉLÉMENTS DE CHEVAL)



CONTOURS DES MOTIFS



TOUS LES BLOCS CORPORELS POSSIBLES



BLOCS CONFIGURÉS COMME UN CORPS DE CHEVAL

exemple, de QBIC (*Query by Image Content*, soit «recherche par contenu d'images»), l'un des plus anciens programmes de recherche d'images, mis au point par des chercheurs de la Société IBM : il permet à l'opérateur de spécifier des critères de recherche en termes de couleurs, de position des couleurs et de textures (celles-ci allant de la simple alternance de deux couleurs, comme les rayures du zèbre, à des motifs multicolores plus complexes). Le programme propose alors une sélection d'images correspondant à la concordance avec les critères demandés.

Un autre programme, *Photobook*, a été mis au point par Alex Pentland et ses collègues de l'Institut de technologie du Massachusetts : comme QBIC, il considère les images comme des juxtapositions de régions uniformes, mais il traite des textures plus

complexes et décompose automatiquement l'image en blocs.

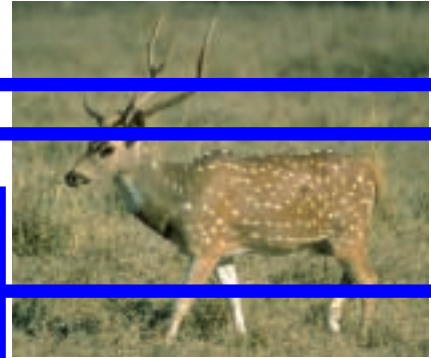
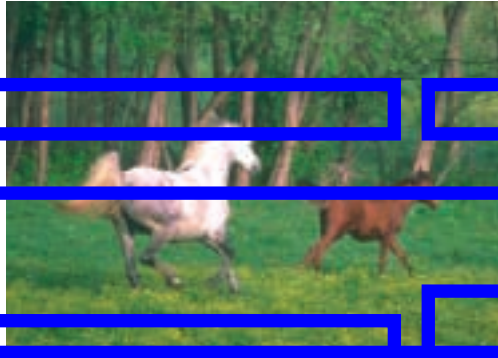
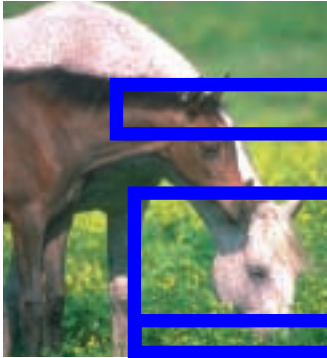
Malgré leurs résultats impressionnants, ces programmes ont des limites. Par exemple, une recherche fondée uniquement sur la proportion des couleurs dans une image ne distingue pas le drapeau français du drapeau britannique. Plus généralement, les utilisateurs sont intéressés par le contenu, lequel n'est exprimé ni par un seul modèle ni par une similitude de motif.

Pour répondre à ces besoins, dans la bibliothèque numérique de l'Université de Berkeley, nous avons mis au point un système de recherche d'images qui traite le contenu. Le projet de bibliothèque, commencé par Ginger Ogle et Chad Carson, contiendra plus de 600 000 photographies. Environ 50 000 images provenant de nombreuses sources, y compris

des photographies aériennes et terrestres sont déjà accessibles sur le réseau internet.

Certains programmes utilisent les diverses techniques de recherche, de sorte que l'utilisateur doit parfois rechercher des objets et des motifs. Cependant, la recherche par objet est difficile, et il est souvent plus efficace de demander des photographies qui contiennent un motif à partir duquel les objets pourront être retrouvés. Les interrogations par motifs les plus efficaces sont celles qui se basent sur des représentations des objets.

Lorsque l'un des concepteurs du programme cherchait des images de planche à voile, il demanda des photographies contenant au minimum 30 pour cent de bleu-vert représentant le ciel ou la mer et au moins une petite partie de jaune pour la rayure jaune d'une voile. Une grande partie des

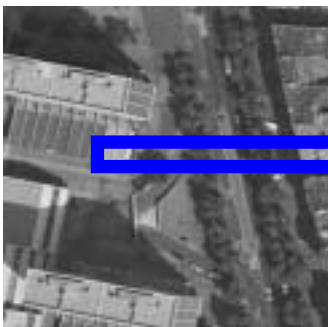


2. LA DISTINCTION d'un même objet vu sous des angles variés met au défi les programmes de reconnaissance d'objets. Le logiciel mis

au point par l'un des auteurs reconnaît parfois si une image comporte des chevaux, quels que soient leur posture et l'arrière-plan.

La reproduction de la mémoire visuelle

Les spécialistes de la vision humaine ont établi qu'un être humain mémorise environ 100 000 images qu'il peut d'identifier en une fraction de seconde. Un robot doué de performances analogues pourrait se déplacer dans un environnement en se fondant sur sa vision : plutôt que de se repérer sur un plan qu'il est difficile de mettre en correspondance avec une image numérique, la machine reconnaîtrait les images de lieux déjà visualisés.



À Grenoble, nous avons mis au point un programme qui reconnaît les images. Ici la recherche se limite à des objets déjà vus plutôt qu'à des formes génériques comme des chevaux ou des humains.

Le principe est simple. On cherche à reconnaître un objet à partir de propriétés locales qui sont invariantes lorsque les prises de vues varient. Pour chaque image, en un certain nombre de points déterminés automatiquement, le programme calcule des propriétés invariantes par rotation et par d'autres transformations comme le changement d'éclairage. Il détermine ainsi une «signature» caractéristique de l'image. En comparant les signatures, le programme trouve les images «déjà vues».

La figure de gauche montre la recherche dans une base de 1 000 images contenant des tableaux, des objets pris sous différents angles, des images aériennes. Les images recherchées le sont toujours à partir d'images prises dans des conditions différentes, par exemple suite à un déplacement de l'avion photographique. Ici, on cherche l'image du haut, le programme trouve l'image du bas qui représente la même scène. À droite, on recherche l'image du haut, le programme trouve l'image du bas qui représente la même scène. À gauche, on présente à l'ordinateur une image dans laquelle se trouve une partie de la queue d'un tyrannosaure, sur un fond de forêt. Là encore, comme dans la quasi-totalité (99 pour cent) des cas, le programme trouve une image qui correspond (le tyrannosaure en incrustation).

Roger MOHR et Cordélia SCHMID,
INPG, IMAG, INRIA, Grenoble

Les algorithmes de recherche de visages

Plutôt que de définir explicitement les éléments qui constituent un visage, des chercheurs de l'Université Carnegie Mellon ont «entraîné» un réseau de neurones à l'aide d'une grande variété d'images légendées représentant des visages et d'autres images sans visages. Finalement, le réseau a appris à distinguer les yeux, le nez et la bouche. Une interface avec le réseau Internet permet à tout utilisateur de soumettre des images au programme. Un échantillon des centaines d'images où celui-ci a cru reconnaître des visages est donné ci-contre.



images trouvées étaient des planches à voile, mais le système afficha aussi d'autres images sans rapport avec celles-ci, et il ne trouva pas certaines images de planche à voile qui étaient pourtant dans la base de données. En matière de recherche d'informations, un compromis entre précision et échec est inévitable : si l'on impose une définition trop stricte, on ne trouve que les images du type cherché, mais certaines images cherchées sont omises ; et si elle est trop large, toutes les images cherchées sont trouvées, mais d'autres images sans intérêt font partie du lot. Ainsi, un puissant moteur de recherche par motifs retrouve assez bien des images contenant des objets particuliers, à condition que l'utilisateur convertisse mentalement la recherche d'un objet en recherche de motifs.

Dans l'état actuel de notre programme, l'utilisateur peut chercher directement un petit nombre d'objets : des chevaux, des bateaux à voile ou des personnes nues. Pour spécifier les motifs, il indique les proportions des différentes couleurs qu'il pense trouver dans une image, ainsi que le nombre et la taille des régions de couleurs devant apparaître.

Il peut aussi préciser d'autres caractéristiques dérivées du contenu de l'image, par exemple si une image contient ou non un horizon. Enfin, il peut rechercher des «métadonnées», c'est-à-dire des informations additionnelles stockées avec l'image, comme sa légende, le nom du photographe ou la date de la photographie.

Les écueils de la reconnaissance d'objets

Quand on donne en outre des connaissances à l'ordinateur, ce dernier peut déduire, d'après les motifs présents dans l'image, quels objets s'y trouvent. L'identification de chevaux, de personnes ou de n'importe quel objet dans une image est une discipline nommée reconnaissance d'objets. Au cœur des recherches sur les systèmes de vision depuis plusieurs décennies, elle est étudiée aussi bien par les laboratoires publics que par les laboratoires privés, par les civils et par les militaires. Cependant, les techniques actuelles ne s'appliquent qu'aux images contenant un petit nombre d'objets dont les formes sont précisément connues et peuvent être vues sous un domaine limité d'angles de vue. Elles ne peuvent pas

pas des objets aussi «ordinaires» que des personnes ou des chevaux. Les objets «ordinaires» présentent une telle variété de tailles, de volumes ou de marques apparentes qu'ils déroutent les programmes de vision automatisée : pourtant, une personne reste une personne, quels que soient sa taille, son poids ou son habillement.

Comment reconnaître les objets de l'arrière-plan de l'image ? C'est un problème difficile, même, dans certains cas, pour un observateur humain. Considérons un léopard dans l'ombre de la jungle. Afin de tenter une identification, le programme doit déterminer quelles parties de l'image sont associées, trouver que les taches appartiennent au léopard, les feuilles aux arbres, etc.

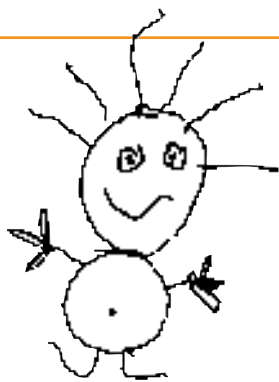
Autrement dit, le programme doit regrouper les motifs en objets.

Ce problème du regroupement perceptif a été beaucoup étudié par l'école gestaltiste. Les psychophysicologues ont mis en évidence plusieurs facteurs qui aident le regroupement. La similarité de couleur ou de texture est très efficace : nous formons facilement des groupes d'après des parties unicolores, telle une tache rouge, ou de texture uniforme, tel un tissu écossais. Des groupements plus complexes ont également lieu : les régions d'une image qui sont symétriques par rapport à un axe sont considérées comme la projection à deux dimensions d'un objet doué d'une symétrie axiale, tel un vase.

Depuis des années, les spécialistes de vision automatisée cherchent à traduire ces règles empiriques en algorithmes efficaces. Serge Belongie, C. Carson, et d'autres chercheurs (dont nous) ont mis au point un programme qui, bien que très rudimentaire par rapport à la vision humaine, décompose l'image en petits ensembles de régions de même couleur ou de même texture.

Chaque bloc ainsi obtenu est caractérisé par sa position, sa forme, sa couleur et sa texture. Ainsi les images sont des ensembles de blocs.

À l'aide de cette décomposition, nous pouvons maintenant trouver des images qui représentent des avions sur fond de ciel en cherchant une tache grise à l'intérieur d'une zone bleue ; nous trouvons aussi des photographies



et haut en bas : H. Pulli, Moeller, K.-P. Zauner, P. Qualtrough, De Vinci, K.-P. Zauner, S.J. Brown, M. Locke, Carnegie Mellon University, H.K. Konishi



de tigrés en recherchant un bloc jaune rayé de noir et un bloc ayant la couleur et la texture de l'herbe, typique de l'habitat du tigre. Pour chaque caractéristique des blocs (couleur, texture, forme ou position), l'utilisateur choisit le degré de précision qu'il désire.

La représentation des objets comme des ensembles de blocs se prête bien aux techniques d'apprentissage automatique. Ainsi on peut éviter à l'utilisateur d'identifier les aspects les plus caractéristiques d'une scène contenant des tigres. On a plutôt utilisé des techniques d'apprentissage statistique afin de réaliser un logiciel de classement statistique auquel nous avons présenté des photographies de plusieurs catégories visuelles (comme des scènes comportant des avions ou des tigres), et avons ainsi entraîné le logiciel à classer de nouvelles photographies dans ces catégories.

Aujourd'hui, nos programmes classent des scènes en analysant uniquement la couleur et la texture ; avec des informations appropriées sur la forme des blocs, ils distingueront les ensembles.

objets et ceux qui n'en forment pas. L'apprentissage fournit un cadre naturel pour traiter les variations non pertinentes au sein d'une classe d'objets, parce qu'un logiciel de classement peut s'ajuster de façon à ignorer ces variations (le ciel peut avoir diverses nuances de bleu, les nuages ont des formes toujours changeantes).

L'apprentissage automatique

Takeo Kanade et ses collègues de l'Université Carnegie Mellon ont mis au point un logiciel de reconnaissance de visages qui applique les techniques d'apprentissage automatique. Comme les programmes classiques détectent difficilement les yeux, le nez et les bouches individuellement, T. Kanade et ses collègues ont entraîné un logiciel du type réseau de neurones à détecter la présence simultanée de tous ces éléments dans une configuration adéquate. Ils ont aussi associé à ces éléments des

forme : une reconnaissance de sons pour analyser des extraits de films. Un ordinateur peut ainsi apprendre à reconnaître un discours sur une bande son de journal télévisé, par exemple, et associer la mention du nom d'une célébrité avec le visage détecté au même moment dans les

Si la couleur et la texture aident à occuper l'image en blocs, plusieurs caractéristiques supplémentaires permettent le difficile regroupement des blocs en objet. Tout d'abord, beaucoup d'objets sont composés de parties aux formes géométriques régulières ; de surcroît, ces formes tridimensionnelles de base se présentent comme des blocs

d'images de forme simple : par exemple, un cylindre apparaît presque toujours comme une région rectangulaire aisément identifiable par le programme.

Lorsqu'il existe des relations géométriques entre les blocs, de la même façon que l'amplitude de rotation des articulations chez l'homme et chez l'animal limite les attitudes possibles entre les différentes parties de leur corps, on peut conclure à l'appartenance de deux blocs au même objet. En bref, l'analyse de chaque bloc engendre une certaine « identité », la répétition de regroupements conduit finalement à l'analyse des images. La théorie de l'apprentissage statistique fournit des mécanismes grâce auxquels on détermine quels regroupements sont possibles. Lorsqu'un groupe suffisamment grand a été formé, à semblé, l'objet est considéré comme identifié.

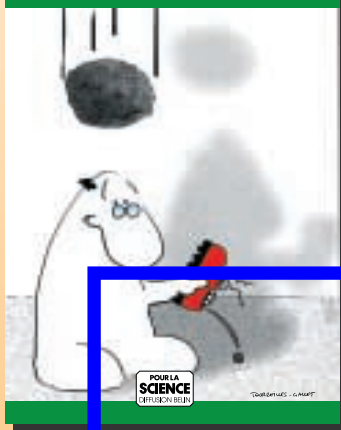
Margaret Fleck, de l'Université de l'Iowa, et l'un de nous (D. Forsyth) ont utilisé ces observations pour construire deux programmes qui reconnaissent des objets particuliers parmi de nombreuses images. Le premier programme trouve les images qui contiennent des

ne fonctionne que pour des gens qui portent peu ou pas de vêtements ; les couleurs et les textures de la peau sont très limitées, comparées à celles des vêtements. Le programme divise d'abord l'image en régions correspondant à la peau (ce qui peut être fait de façon assez précise) et rejette les images comportant peu ou pas de peau.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSSES SÛRES

DIDIER NORDON

**Des cailloux
dans les choses sûres**



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 65 F
Code 1897

**POUR LA
SCIENCE**
ÉDITION BELIN

Bon de commande en p. 98

Lorsqu'il a associé ces régions en groupes de cylindres (qui représentent les parties du corps), il teste les relations géométriques entre ces groupes pour trouver des assemblages pouvant provenir d'un membre. Finalement, il teste les relations entre les éventuels membres pour déterminer les régions pouvant représenter des assemblages plus complexes.

Comme notre modélisation des humains utilise des relations entre les segments du corps, nous pouvons la modifier pour trouver d'autres types de corps. Ainsi, notre second programme trouve des photographies de chevaux en testant les relations entre les blocs de pixels assimilés à un pelage. Nous avons testé le programme qui identifie les personnes sur près de 5 000 images provenant de sources diverses ; il trouve des images de personnes dans 40 pour cent des images qui en contiennent et seulement dans 4 pour cent d'images qui

n'en contiennent pas. Le programme qui identifie les chevaux ne reconnaît que 10 pour cent des photographies de chevaux qui lui sont soumises, mais ne trouve que 0,4 pour cent de photographies qui n'en comportent pas. Nous ne pouvons pas encore appliquer efficacement ces techniques à des scènes contenant de nombreux objets différents à reconnaître.

Ces performances limitées représentent pourtant, à notre connaissance, le summum de ce qu'obtient la recherche d'images fondée sur l'identification d'un objet. De surcroît, souvenons-nous qu'il n'existe pas de système de recherche parfait : même

les meilleures recherches automatisées extraient généralement plus de 50 pour cent des éléments pertinents, sans même compter le nombre élevé d'éléments non pertinents. En outre, quand une personne passe manuellement en revue un assortiment d'images, elle omet généralement un nombre notable d'images d'indices, sans parler du coût prohibitif de l'opération.

Les images et les films numérisés deviennent chose courante, qu'ils fassent partie de grandes collections ou qu'ils soient le contenu de médias plus transitoires. Les pages Web sur le réseau Internet. Bien que nous nous soyons concentrés sur le problème de la recherche d'images dans de grandes bases de données, les mêmes techniques s'appliquent pour d'autres tâches mettant des images en jeu, tel le filtrage de informations recueillies sur le réseau Internet.

Nous avons progressé dans l'extraction d'objets en regroupant simplement des régions similaires selon des critères d'arrangements spatiaux et de motifs analogues, mais de nouvelles techniques sont nécessaires à l'obtention d'une quantité d'images extraites compatible avec un archivage

d'un léopard fondant sur une proie en rampant, un chaté, un couple de félins», bondissant». Ce but accessible est intéressant parce que de nombreuses personnes ont besoin de trouver des objets dans un assortiment d'images, et aussi parce qu'en l'atteignant nous comprendrons mieux les mécanismes de la vision.

David FOSDYTH, Jitendra MALIK et Robert WILKINSKY participent au projet de bibliothèque numérique de l'Université de Berkeley.

R. NEVATI et T.O. BINFORD, *Description and Recognition of Curved Objects*, in *Artificial Intelligence*, vol. 8, pp. 77-98, 1977.

Hazel ROSSOTTI, *Color : Why the World Isn't Grey*, Princeton University Press, 1983.

I. ROCK et S. PALMER, *L'héritage du gestaltisme*, in *Pour la Science*, février 1991.

M. FLICKNER et al., *Query by Image and Video Content, The QBIC System*, in *Computer*, vol. 28, n° 9, pp. 23-32, septembre 1995.

J. PONCE, L. ZISSERMAN et M. HEBERT, *Object Representation in Computer Vision, tome II*, Springer LNCS, n° 1144, 1996.

A. PENTLAND, R.W. PICARD, et S. SCLAROFF, *Photobook, Content Based Manipulation of Image Databases*, in *International Journal of Computer Vision*, vol. 18, n° 3, pp. 233-254, juin 1996.

K. HIRATA et al., *Object-Based Navigation : An Intuitive Navigation Style for Content-Oriented Integration Environment*, *Proceedings of the ACM Hypertext Conference*, Southampton, U.K., avril 1997.

Vous trouverez des liens vers différentes bibliothèques d'images sur notre site <http://www.pourlascience.com>

J'ai descendu dans mon jardin...

FRANÇOIS PEREGO

... pour fabriquer de la peinture.

Les peintres antérieurs au XVIII^e siècle avaient bien du mérite : il ne connaissent qu'une quarantaine de pigments, n'en utilisaient qu'une vingtaine, mais que de couleurs animent leurs tableaux, fresques ou enluminures ! À l'époque, les procédés de fabrication relevaient moins de la chimie raisonnée que de la cuisine, et la plupart des produits utilisés par Rubens et les peintres de son temps sont encore d'origine naturelle. Puis, à partir du XIX^e siècle, la situation s'est inversée ; on se dirige vers le « tout synthétique ». Si nous descendions au jardin, pourrions-nous encore confectionner une gamme de couleurs ?

La pulpe des framboises ou les pétales des fleurs nous font rêver à des couleurs rutilantes, mais nous serions déçus si nous extrayions des colorants de ces matières végétales. Leurs couleurs sont essentiellement dues à trois classes de molécules, les caroténoïdes, les flavonoïdes et les anthocyanes, qui résistent mal à la lumière. Les plantes ont donné aux peintres de superbes jaunes et rouges, et un bleu : ce sont les laques de gaude, de nerprun, de quercitron ou de garance, et l'indigo. Cependant, seuls ces deux derniers résistent raisonnablement à la lumière.

Abandonnons le végétal pour le minéral : ce charbon de bois qui reste, au fond du jardin, permet d'obtenir du noir, et ce vieux morceau de plomb trouvé dans la remise peut nous procurer du blanc. À cette fin, il nous faut du vinaigre, que le raisin de notre jardin nous donne : son jus, abandonné à l'air, tournera au vinaigre. Placé au fond d'un récipient enfoui dans du fumier, avec une plaque de plomb qui s'oxyde lentement à l'air humide, il dégagera des vapeurs qui transformeront l'oxyde de plomb en acétate basique de plomb, lequel acétate sera ensuite transformé en carbonate basique, par réaction avec le dioxyde de carbone produit par le fumier ; ce carbonate forme le blanc de plomb, largement utilisé en peinture jusqu'au début de notre siècle.

Le même vinaigre ou du marc de raisin nous servira à transformer du cuivre pour préparer du vert-de-gris (un acétate

basique de cuivre, et non le carbonate hydraté de cuivre qui se dépose sur le métal en milieu humide) en présence d'air. Et ce vert-de-gris, chauffé avec de la résine qui exsude du pin, donnera un résinate de cuivre, d'un très beau vert émeraude transparent. Il restera à préparer l'azurite, la malachite, le cinabre ou le précieux lapis-lazuli, qui ont permis aux peintres de jadis d'obtenir des couleurs assez vives et assez solides. Mais c'est là une autre histoire.

LES COULEURS QUE L'ON CACHE

Après ce petit tour du propriétaire, quelles ressources nous reste-t-il ? Nous avons vu que la garance contient des colorants assez résistants. Pouvons-nous les préparer simplement ? Ces colorants sont des dérivés de l'antraquinone, molécule composée de trois cycles à six atomes de carbone chacun, accolés par un côté, avec deux atomes d'oxygène liés aux atomes de carbone sur l'axe médian de la molécule (voir la figure 1). Dans les racines, ces dérivés sont sous la forme de glucosides, c'est-à-dire liés à une molécule de sucre. Les colorants antraquinoniques dérivés de la garance intéressent les peintres ; le plus intéressant est le 1,2-dihydroxyantraquinone, ou alizarine, qui fut synthétisée en 1868 par les chimistes Carl Graebe, Carl Liebermann et Heinrich Caro, de la Société *Badische Anilin*, au grand désespoir des cultivateurs du Midi et d'Alsace. La purpurine, ou 1,2,4-trihydroxyantraquinone, moins abondante que l'alizarine, procure aux laques de garance naturelle cette fluorescence rouge feu tout à fait caractéristique.

Pour préparer une laque de garance, nous devons soit avoir la plante dans le jardin (elle pousse facilement), soit l'acquérir dans une pharmacie herboristerie sous le nom de *Rubia tinctorum*, ou *Rubia peregrina*, racine. Après avoir fait sécher et vieillir la racine (le résultat est meilleur, parce que la coupure des glucosides commence pendant le vieillissement), nous la couperons en petits morceaux et suivrons une recette du XIX^e siècle, que nous indi-

quons ici en termes de chimie moderne. Dans un premier temps, nous coupons le dérivé antraquinonique du sucre, en chauffant la racine dans de l'eau légèrement acidifiée par un pour cent d'acide chlorhydrique (que l'on trouve en droguerie) à une température de 40 à 50 °C, durant un ou deux jours (si nous voulions être des puristes de la « peinture du jardin », nous pourrions éviter l'achat d'acide chlorhydrique et provoquer une hydrolyse enzymatique à l'aide de levure de boulanger ; notons que la réaction produit un alcool de garance, qui était jadis consommé). Dans un deuxième temps, nous éliminons un colorant jaune fauve, abondant et préjudiciable à la beauté et à la solidité de la teinte finale, en lavant copieusement la matière végétale à l'eau tiède, légèrement alcalinisée (par une solution filtrée de cendres de bois ou par des cristaux de soude), puis à l'eau claire.

La racine est alors prête pour l'extraction des principes colorants. On la jette dans une solution chaude d'alun de potassium (du sulfate double d'aluminium et de potassium, qui constitue ces bâtons bouillants qui guérissent les blessures du rasage matinal ; on le trouve en droguerie ou en pharmacie) à 12 pour cent et l'on voit rapidement la liqueur prendre la teinte d'un sirop de grenadine. Chauffons modérément pendant une à deux heures afin d'extraire le colorant des racines ; le colorant n'est pas utilisable tel quel, et il n'est pas du rouge qu'on en attend. Aussi les peintres exploitent-ils la propriété qu'a l'alumine d'adsorber les molécules variées : si nous mélangeons la teinture à du carbonate de sodium, une magnifique « laque » (une poudre colorée) se dépose, parce que de l'alumine insoluble se forme par réaction de l'alun présent avec le carbonate ; simultanément, le colorant est extrait de la solution par adsorption sur les grains précipités. Il reste à laver plusieurs fois le précipité à l'eau claire, à filtrer et à sécher : la laque est prête.

LES POUSSIÈRES DE LA COULEUR

Ce principe d'adsorption des colorants par de l'alumine fraîchement préparée (ou d'autres précipités) s'applique à d'autres colorants, et celui qu'on extrait généralement sans le savoir, en faisant cuire des artichauts dans de l'eau. L'ajout d'alun puis de carbonate de potassium provoque la précipitation d'une laque jaune analogue à celle de la gaude, plante jadis largement cultivée pour sa teinture jaune « grand teint », c'est-à-dire qui résiste à la lumière.

Comment peindre avec ce pigment ? Les peintres préparent des peintures en dispersant les pigments avec des liants,

tel de l'œuf de huile de lin ou de la gomme arabique, éventuellement allongés d'un diluant ou d'un solvant. Toutefois, il ne suffit pas de triturer un peu de pigment avec un liant, car le résultat est alors imprévisible : parfois, la peinture est directement utilisable, mais, parfois, elle est excessivement liquide, ou relargue du liant au repos, ou bien encore prend en masse... En outre, comme certains pigments coûtent cher ou sont trop colorants, on y adjoint des charges, c'est-à-dire des pigments incolores et transparents qui ne participent pas directement à la couleur et à l'opacité du film de peinture. Par exemple, le bleu de phtalocyanine est si intense qu'il donne du noir, et non du bleu, quand on l'utilise sans charge. Ainsi, pour éviter de broyer du noir et pour comprendre pourquoi les peintures toutes prêtes sont souvent supérieures aux préparations des « jardiniers », il faut descendre non plus dans le jardin, mais dans la microstructure des pigments.

Observons que les pigments sont des poudres, colorées ou incolores, insolubles dans le milieu de dispersion (solvant ou liant), ce qui les distingue des colorants qui, eux, sont toujours solubles (encre des stylos, éosine, mercurochrome, etc.). Ici nous ne nous intéresserons donc qu'aux pigments, et non aux colorants.

De surcroît, nous ne préparerons que de la peinture à l'huile.

Pour obtenir une peinture, il faut disperser les particules de pigment dans le liant (l'huile) qui est hydrophobe. Or, si certains pigments le sont aussi, d'autres sont plutôt hydrophiles ; autrement dit, l'énergie de surface entre une particule de pigment et de l'huile est souvent élevée. Pourquoi parvient-on toutefois à disperser les pigments dans les huiles ? Parce qu'on apporte de l'énergie mécanique, en « broyant les couleurs ».

Comment se comportent les particules, lors du broyage ? Le microscope le montre : initialement les particules primaires de pigment sont souvent réunies avec une de leurs faces en commun, ce qui conduit à des agrégats, à la manière d'un tas de briques compact (la surface d'un agrégat est inférieure à la surface totale des particules qui le composent). Les particules primaires peuvent également se réunir avec pour seul point de contact des angles ou des arêtes, comme un tas de brique désordonné, ce qui donne les agglomérats, dont la surface est alors proche de la surface totale des briques primaires. Les agrégats peuvent également s'associer en agglomérats. La taille des particules primaires peut être très variable, de 13 nanomètres à 10 micro-

mètres, et jusqu'à 60 micromètres pour les charges et les pigments naturels, notamment les pigments anciens.

Le broyage a plusieurs fonctions : il disperse les particules, il modifie éventuellement leur taille et, ainsi, il accroît le pouvoir colorant. Imaginons qu'on divise un cube d'un centimètre de côté en cubes égaux d'un micromètre de côté ; on obtient ainsi 1 000 milliards de cubes, la surface totale passant de six centimètres carrés à six mètres carrés.

LE MOUILLAGE

Lorsque nous avons formé la pâte en malaxant le pigment et l'huile avec la spatule, de l'air est resté occlus. Comment le chasser ? Il suffit de broyer cette pâte épaissie à la molette (voir la figure 2c). Par la même occasion, on disperse les grains de pigment et l'on dissocie les agglomérats, voire les agrégats. Cette opération effectuée, on devra encore se préoccuper d'obtenir une viscosité appropriée. Pour le peintre, l'idéal est d'obtenir une pâte ; c'est ensuite, sur la palette seulement, qu'il ajuste la viscosité en ajoutant un diluant.

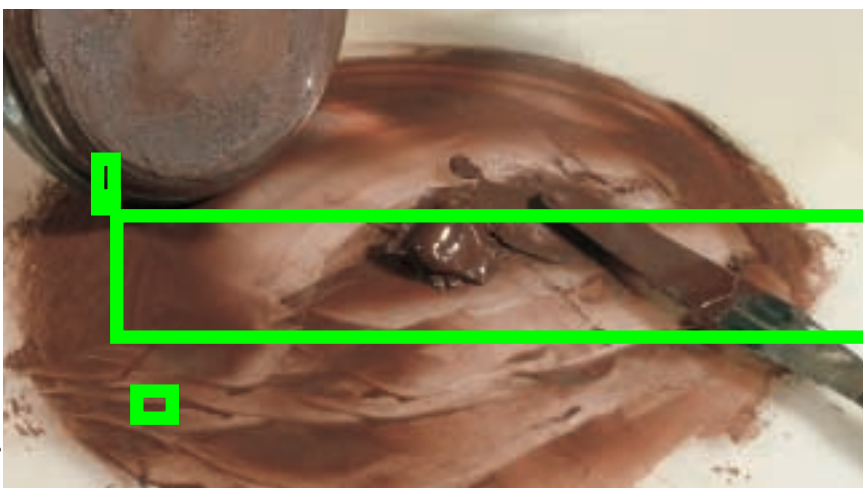
Or le mélange de poudres, tels les pigments, réserve des surprises également connues des maçons : si l'on



1. La racine (en bas à droite) de la garance (au centre) contient des colorants, telle l'alizarine. À partir de cette racine, on prépare une laque rouge (poudre dans le verre de montre), que l'on peut utiliser pour confectionner une peinture à l'huile (en bas, au centre).

On mélange 700 litres de gravier, 450 litres de sable, 350 litres de ciment et 20 litres d'eau, on n'obtient pas 1 520 litres, mais seulement 1 000 litres de béton : le sable s'est logé dans les interstices du gravier, le ciment dans les espaces libres, et l'eau a remplacé l'air restant. Peut-on utiliser ce phénomène pour réduire

la quantité d'huile qui disperse un pigment (on ne peut notamment diluer une peinture que si la pâte est initialement épaisse)? Avec un pigment grossier tel que le noir d'ivoire ou le violet de mars, peut-on insérer un peu d'un pigment très fin sans que la pâte ne perde sa cohésion?



F. Perego

2. Le violet de mars est un oxyde de fer utilisé comme pigment. Pour obtenir une peinture, on disperse la poudre (en haut) avec de l'huile (bouteille en haut à gauche). On malaxe à la spatule et l'on obtient une pâte fine (au milieu). Puis on broie la pâte à la molette (celle-ci est debout sur l'image du haut et sur l'image du centre, couchée sur l'image du bas) : la pâte devient plus fluide (en bas).

Faisons l'expérience : préparons d'abord une pâte de violet de mars (le diamètre moyen de ces particules d'oxyde de fer Fe_2O_3 est égal à 0,7 micromètre) en triturant ce pigment avec de l'huile, à la spatule, puis broyons cette pâte épaisse à la molette sur un marbre ou sur une plaque de verre dépoli. Essayons alors d'introduire à la spatule un volume d'environ deux tiers de silice très fine (l'Aerosil 200 de Degussa, par exemple, est de la silice sous la forme de particules dont le diamètre moyen est égal à 12 nanomètres) : d'abord la pâte se réduit en poudre collante, la silice «volant» l'huile libre à la peinture. Cependant un broyage énergétique à la molette finit par pousser les grains fins dans les interstices, entre les grains du pigment grossier, et l'on retrouve une pâte, plus ferme que la pâte initiale. Attention : pour cette expérience, partez du pigment en poudre et non d'une peinture toute prête, car le fabricant peut avoir ajusté son produit avec des charges ou avec des adjuvants qui fausseraient l'expérience.

FLUIDIFICATIONS

En pratique, le peintre ne peut perdre son temps à ajuster, à chaque utilisation, la quantité d'huile par rapport à la quantité de pigment : il préfère déterminer une fois pour toutes la quantité minimale de liant nécessaire pour obtenir une pâte avec ce pigment. Cette épreuve initiale est nommée détermination de la prise d'huile : il ajoute progressivement de l'huile de lin à 100 grammes de pigment, et malaxe avec une spatule jusqu'à obtenir une pâte plastique qui ne colle pas à la plaque de verre. La prise d'huile est normalement exprimée en volume d'huile pour 100 grammes de pigment.

Pourquoi, au delà de ce seuil, quelques gouttes de plus fluidifient-elles considérablement la pâte? L'effet est analogue à celui que l'on observe quand on applique deux plaques de verre mouillées et bien égouttées l'une contre l'autre, en les séparant, on voit une infime pellicule de liquide : il est très difficile de les séparer, parce que les forces de capillarité, qui tirent l'eau au contact du verre, tirent le verre contre l'eau par réaction. Il en va de même entre deux grains de pigment. En revanche, quand on injecte un peu d'eau entre les plaques de verre soudées par le film d'eau, le glissement redevient possible, parce que les forces de capillarité agissent proportionnellement moins. On retrouve le même effet avec les peintures où la quantité de liant est excessive.

C'est également la raison pour laquelle plus une poudre est fine, plus il

est facile d'obtenir une pâte très ferme. On peut tester cet effet avec du sel fin de cuisine : si l'on essaie de le disperser dans de l'huile (de l'huile alimentaire, par exemple), on obtient difficilement une pâte qui se tient, parce que les grains trop gros ne se tassent pas suffisamment. En revanche, si l'on broie finement cette pâte à l'aide d'une molette, la pâte épaissit à mesure que les grains s'amenuisent, car la quantité de liquide entre les grains diminue suffisamment pour que les distances soient faibles, et les forces de tension superficielle élevées.

Toutes les huiles donneront-elles le même effet ? Les anciens traités de peinture préconisent souvent l'utilisation d'huile vieille pour broyer les couleurs. Pourquoi ce choix ? Parce que l'oxygène oxyde l'huile : les molécules d'huiles sont des triglycérides, avec du glycérol lié à trois chaînes composées seulement d'atomes d'hydrogène liés à un squelette d'atomes de carbone. Les acides gras présents dans les huiles siccatives (c'est-à-dire qui sèchent assez rapidement) sont pour la plupart insaturés (le squelette comporte plusieurs doubles liaisons entre atomes de carbone). L'oxydation provoque la coupure de doubles liaisons, ce qui conduit à la libération d'acides gras. Le groupe acide carboxylique $-COOH$ qu'ils ont à une extrémité modifie les énergies de surface : hydrophile, il se lie aux pigments, tandis que le squelette hydrocarboné, hydrophobe, vient au contact des molécules d'huile. Ainsi les acides gras, sont des agents mouillants et dispersants efficaces.

SAVONS ET ÉMULSIONS

Pour tester cette description théorique, préparons tout d'abord un acide gras en arrosant du savon avec du vinaigre, dans un bain-marie : le liquide qui surnage est constitué des acides gras du savon. Ajoutons une goutte de ce liquide à la pâte ferme de violet de mars et de silice que nous avons préalablement préparée. Quelques tours de molette fluidifient la pâte de façon surprenante : elle semblait être saturée en pigment, mais l'ajout d'acide gras montre qu'elle peut en recevoir davantage. Cet effet provient-il d'un comportement particulier du violet de mars, considéré par les fabricants comme un pigment à problème ?

Refaisons l'expérience avec un pigment qui se disperse bien, tel le blanc de plomb évoqué précédemment. Dispersé d'abord dans de l'huile de lin fraîche et neutre, il donne un résultat décevant : une pâte « givrée », grumeleuse. Toutefois, une pointe d'acide gras lui donnera de la fluidité, puis un onctueux particulier, d'une part en raison de l'ef-



3. Quand on mêle une quantité minime d'acides gras à du violet de mars (à gauche en haut), on obtient une pâte fluidifiée (en haut à droite) où l'on peut introduire davantage de pigment. En bas, on a représenté le même phénomène de fluidification pour un pigment important en peinture et qui se disperse bien dans l'huile : le blanc de plomb.

fet mouillant précédemment évoqué, mais aussi parce que les acides gras réagissent avec le blanc de plomb pour former des savons, excellents dispersants. Ainsi, comme une vieille recette l'indique, on peut commencer par former une pâte de blanc de plomb et d'eau, ce qui permet d'éviter de respirer les poussières toxiques du blanc de plomb ; ensuite on ajoute progressivement l'huile tout en battant le blanc. L'huile remplace l'eau seule une partie reste emprisonnée sous forme d'émulsion, c'est-à-dire de gouttelettes d'eau enrobées des molécules dites tensioactives et dispersées dans l'huile. On obtient ainsi des peintures de consistance crémeuse et de faible teneur en huile, ce qui facilite le séchage : le graphisme précis et incisif de certaines peintures de la période classique est peut-être dû à l'utilisation de tels blancs.

Le peintre joue ainsi des propriétés hydrophiles ou hydrophobes des pigments.

Terminons ce panorama des comportements étranges en examinant le cas du blanc de Meudon, c'est-à-dire de la craie, qui est naturellement hydrophile mais que l'on peut rendre hydrophobe : il suffit pour cela de dissoudre un gramme d'acide stéarique (ou un autre acide gras saturé à 12, 14 ou 16 atomes de carbones) dans 50 millilitres d'alcool à 96 degrés tiédi. Mouillons 100 grammes de blanc de Meudon avec ce liquide, afin d'en former une pâte, en ajoutant au besoin

de l'alcool. Malaxons, laissons évaporer l'alcool, plongeons cette poudre dans un bocal couvert sur le panier d'une cocotte minute, suspendu au-dessus de quelques centimètres d'eau. Chauffons de sorte que la préparation « cuise » pendant une heure : l'acide stéarique réagit avec le sel de calcium pour former, à la surface des grains, un savon qui est hydrophobe.

Comparons le blanc ainsi obtenu au blanc initial, en préparant une pâte avec de l'huile, et une pâte avec de l'eau, pour le blanc non traité et pour le blanc traité. Le blanc de Meudon, qui se disperse bien dans l'eau, se disperse moins bien dans l'huile que le même produit après le traitement.

Toutes ces expériences du peintre dans le laboratoire devraient aider les peintres dans l'atelier, troublés par la qualité de leurs produits : doivent-ils broyer leurs peintures eux-mêmes, comme jadis, ou doivent-ils employer les peintures en tube ? Sans vouloir faire l'apologie des peintures déjà préparées, remarquons qu'il n'est conseillé de broyer soi-même que si l'on broie bien ; et que le métier de peintre peut effectivement se doubler de celui de fabricant, mais au détriment du temps pour peindre.

François PEREGO est restaurateur de tableaux à Bécherel (Ille-et-Vilaine).

Voyageurs et baquenaudiers

JEAN-PAUL DELAHAYE

Le code de Gros-Gray est utile aux choses sérieuses et futiles.

Les physiciens s'interrogent : l'espace n'aurait-il pas plus de trois dimensions ? La relativité, en prenant en compte le temps, soutient

qu'il n'y en a pas moins de quatre, et des théoriciens plus téméraires, armés d'arguments qui échappent au vulgaire, envisagent que nous vivions dans un espace à huit dimensions, voire onze.

Il devient donc urgent de résoudre le problème du voyageur de commerce en dimension n : des points étant donnés dans un espace de dimension n , comment organiser le plus court trajet

qui passe par tous les points ? En suivant l'illustré exemple du mathématicien à qui l'on demandait de calculer le volume d'une vache et qui commençait son raisonne-

ment par « supposons que la vache soit sphérique... », nous nous limiterons au cas des sommets d'un parallélépipède rectangle : quel est le plus court chemin qui passe par tous les sommets d'un tel parallélépipède à n dimensions ?

Un rectangle a deux sommets, un parallélépipède en a huit, et plus généralement un parallélépipède à n dimensions en possède 2^n . Nous noterons ces sommets

00...00, 00...01, 00...10, ..., 11...1 (toutes les suites finies de n symboles "0" ou "1").

Les longueurs des côtés du parallélépipède sont classées de la plus grande à la plus petite. Le problème est maintenant parfaitement bien posé. En imposant de partir du sommet 00...0 (ce qui n'enlève aucune généralité au problème), celui-ci n'admet qu'une seule solution.

La solution est donnée par une suite de sommets qui constituent ce qu'on appelle le code de Gros-Gray, dont le nom provient de Louis Gros et de Frank Gray. Gros était notaire à Lyon ; il publia en 1872 un opuscule où ce code était présenté pour la première fois en lien avec un casse-tête sur lequel nous reviendrons.

Gray travaillait aux laboratoires Bell, il réinventa le code, et en livra une étude détaillée dans les années 1930 ; il se voit parfois injustement attribuée la paternité exclusive de l'invention.

On sait trouver que le code de Gros-Gray donne le plus court trajet du voyageur de commerce sur le parallélépipède rectangle. Ce trajet est représenté sur la figure 2. Le principe de déplacement du voyageur n'est complexe qu'au premier abord : examiné attentivement, il exhibe des régularités fascinantes sur lesquelles nous allons nous attarder.

DES ZÉROS ET DES HUNS

À chaque entier n , nous associons sa notation binaire $b(n)$ et son code de Gros-Gray que nous noterons $g(n)$. Voici quelques exemples :

$b(0) = 0$ $g(0) = 0$
 $b(1) = 1$ $g(1) = 1$
 $b(2) = 10$ $g(2) = 11$
 $b(3) = 11$ $g(3) = 10$
 $b(4) = 100$ $g(4) = 110$
 $b(5) = 101$ $g(5) = 111$
 $b(6) = 110$ $g(6) = 101$
 $b(7) = 111$ $g(7) = 100$

Un tableau plus complet se trouve sur la figure 1. La suite des codes de Gros-Gray peut être définie de bien des façons dont on prouve, avec un peu de patience qu'elles sont équivalentes ; chacune de ces caractérisations sera utile.

La première définition indique comment passer d'un code de Gros-Gray au suivant : on change un seul chiffre (1 en 0 ou 0 en 1), qui est :

– le dernier si le nombre de « 1 » est pair
 – celui à gauche du « 1 » le plus à droite, sinon.

En appliquant cette règle, 110 est suivi de 111, qui a pour suivants 101, 100, puis 1100. Cette règle permet au voyageur d'organiser sa tournée : il n'a d'ailleurs même pas besoin de se souvenir de ce qu'il a fait auparavant, sa position seule lui donnant toutes les informations sur le prochain point où il doit se rendre.

1. LE CODAGE DE GROS-GRAY DES ENTIERS

	CODE BINAIRE	CODE GROS-GRAY	PLACE DES CHIFFRES	EMPLACEMENTS DES 1
0	0000	0000	0	0
1	0001	0001	1	1
2	0010	0001	2	1
3	0011	0000	3	1
4	0100	0010	4	1
5	0101	0011	5	1
6	0110	0011	6	1
7	0111	0010	7	1
8	1000	0100	8	1
9	1001	0110	9	1
10	1010	0111	10	1
11	1011	0110	11	1
12	1100	0100	12	1
13	1101	0101	13	1
14	1110	0101	14	1
15	1111	0100	15	1
16	1000	1100	16	1
17	1001	1101	17	1
18	1010	1101	18	1
19	1011	1100	19	1
20	1100	1110	20	1
21	1101	1111	21	1
22	1110	1110	22	1
23	1111	1110	23	1
24	1100	1010	24	1
25	1101	1010	25	1
26	1101	1011	26	1
27	1101	1011	27	1
28	1110	1001	28	1
29	1110	1001	29	1
30	1111	1000	30	1

Qu'un seul chiffre soit changé à chaque étape explique partiellement que le code de Gros-Gray donne la solution du voyageur de commerce en dimension n : ne changer qu'un seul chiffre signifie que les trajets qu'emprunte le voyageur de commerce sont des arêtes du parallélépipède, il évite donc d'emprunter les diagonales d'un rectangle, qui, on le sait, sont plus longues que les côtés.

Qu'un seul chiffre soit changé à chaque étape est aussi ce qui fait l'intérêt du code en électronique et en informatique, où il est utilisé dans la conception de certains circuits et pour l'exploitation

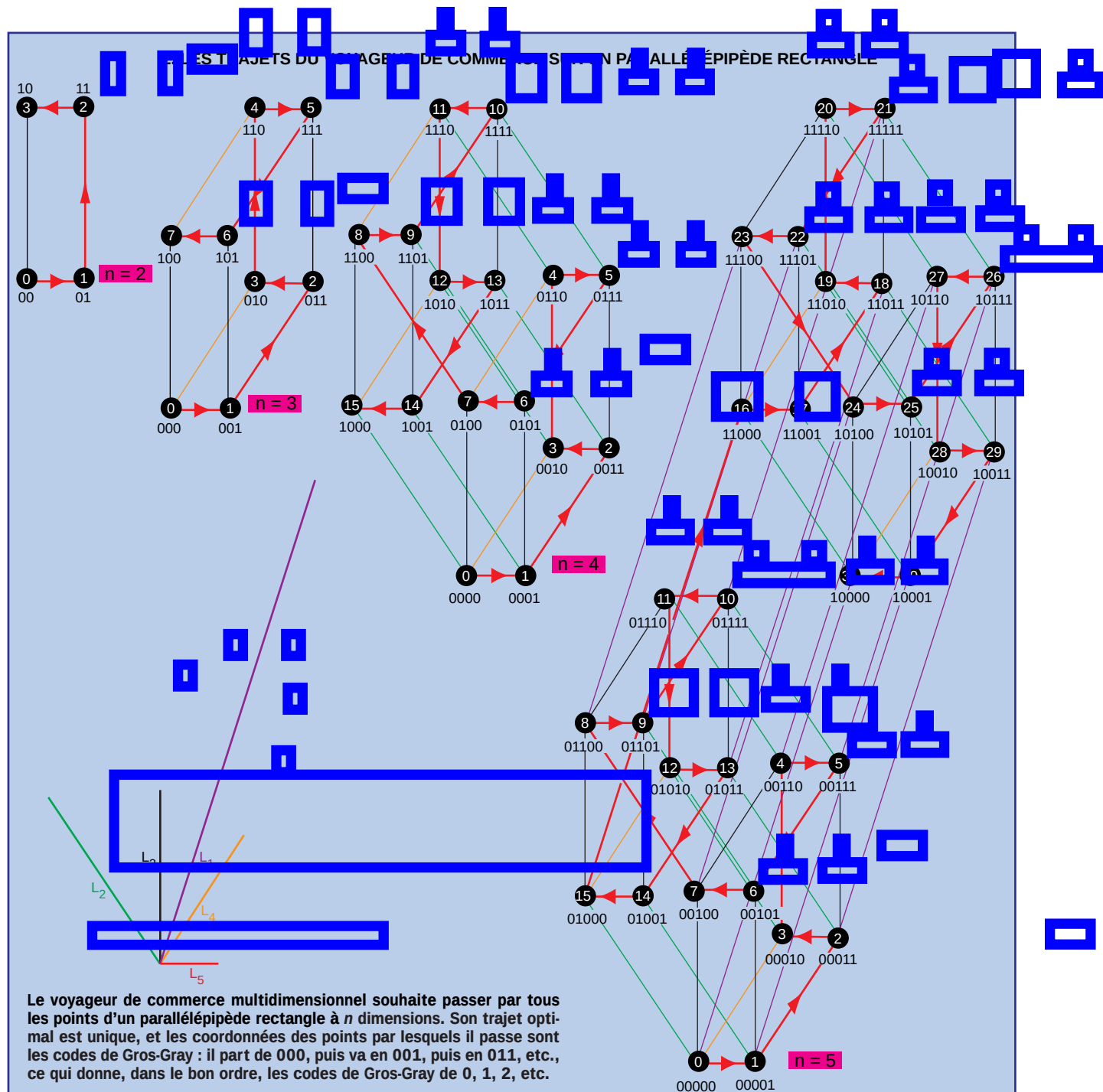
des ordinateurs parallèles : on place les unités de calcul de la machine sur un réseau correspondant à un hyper-cube, et le code de Gros-Gray fournit une numérotation des sommets de cet hyper-cube permettant le contrôle et l'optimisation des communications.

Plusieurs autres propriétés de ce code d'un nombre au suivant ne change qu'un seul chiffre ; toutefois, ils conduisent à des chemins plus longs et d'autre part le code Gros-Gray est le plus élégant de tous les codes continus, comme le montrent ses autres caractérisations.

RÉCURRENCES, COPIE-AUGMENTÉE ET FRACTALS

La deuxième caractérisation procède par récurrence :

- le code de Gros-Gray de 0 est «00» (ce qui pour nous est équivalent à «00» ou «000...» ou «0000...» ; cette dernière façon de noter ne prend pas compte des «0» les plus à gauche d'un code (comme en arithmétique nous ne prenons pas en compte les «0» devant un nombre) ;
- si nous connaissons le code de Gros-Gray des 2^n premiers entiers, celui des 2^{n+1} suivants est obtenu en les reprenant



en ordre inverse et en faisant précéder chacun des codes d'un «1».

Exemple : à partir des 4 premiers codes 00, 01, 11, 10, on obtient les quatre suivants en inversant l'ordre 10, 11, 01, 00 et en ajoutant un «1» devant chaque code : 110, 111, 101, 100. À cause de cette propriété, on dit que le code de Gros-Gray est un code réfléchi.

Cette caractérisation donne un petit air fractal au parcours du voyageur de commerce : le chemin qu'il suit dans la seconde moitié du trajet est, à l'envers et translaté, le même que celui qu'il a parcouru dans la première moitié du trajet ; mais, dans le second quart, le chemin parcouru est aussi, à l'envers et translaté, le même que celui parcouru dans le premier quart ; etc. (voir la figure 2). D'ailleurs, sur un parallélépipède, dans un espace à une infinité de dimensions dont les côtés seraient de longueur $1/2^n$, le trajet du voyageur de commerce serait effectivement une courbe fractale.

La troisième caractérisation indique comment connaître le numéro du chiffre

qui change quand on passe d'un code au suivant : le code de Gros-Gray de n ne change du précédent que par un seul chiffre, dont le numéro (en comptant à partir de la droite) est fixé par la suite : $2^{n-1} 121412131215...$

Cette suite, que l'on dénomme suite de la copie-augmentée, s'obtient de la façon suivante : on part de la suite «1», on la prolonge en la recopiant exactement sauf le dernier élément qu'on augmente de 1, et on recommence : de «1», on passe à «12», puis à «1213», puis à «12131214», etc. Dans la figure 1, on a représenté en rouge les chiffres qui changent ainsi d'un code au suivant : leur dessin, très régulier, fait apparaître là encore une forme fractale.

La quatrième caractérisation indique la description explicite de tous les chiffres. Les derniers chiffres des codes de Gros-Gray suivent le motif 01100110011, etc. Les avant-derniers chiffres des codes de Gros-Gray suivent le motif 001111000011110000... etc. Les chiffres numéro i suivent (en partant de la fin) le

motif 2^{i-1} fois le «0», puis périodiquement $2^{i-1}+1$ le chiffre «1», 2^{i-1} le chiffre «0».

Cette définition est la plus commode pour généraliser dans d'autres bases que deux les codes de Gros-Gray : en base trois, on fait varier le dernier chiffre selon le motif 0122101122100... l'avant-dernier en reprenant le même motif ou l'on répète trois fois chacun des chiffres soit 000111222222111000000111... etc.

Ces codes des Gros-Gray en base p donnent là aussi, la solution au problème du voyageur de commerce sur un réseau parallélinédique comportant p points dans chaque direction.

DÉRIVATION ET INTÉGRATION

Les deux dernières caractérisations sont les plus importantes en pratique, car elles indiquent comment passer de la notation binaire au code de Gros-Gray correspondant, et inversement.

La règle de passage de la notation binaire au code de Gros-Gray est amusante. Le code de Gros-Gray de l'entier n s'obtient en prenant le code binaire de n et en le dérivant :

- les deux notations ont le même premier «1» ; ensuite,
- le digit numéro i en partant de la gauche est 0 si les chiffres numéro $i-1$ et i du code binaire sont égaux, sinon c'est un 1 (il s'agit bien de l'opération analogue à la dérivation lorsque l'on travaille uniquement avec des «0» et des «1»).

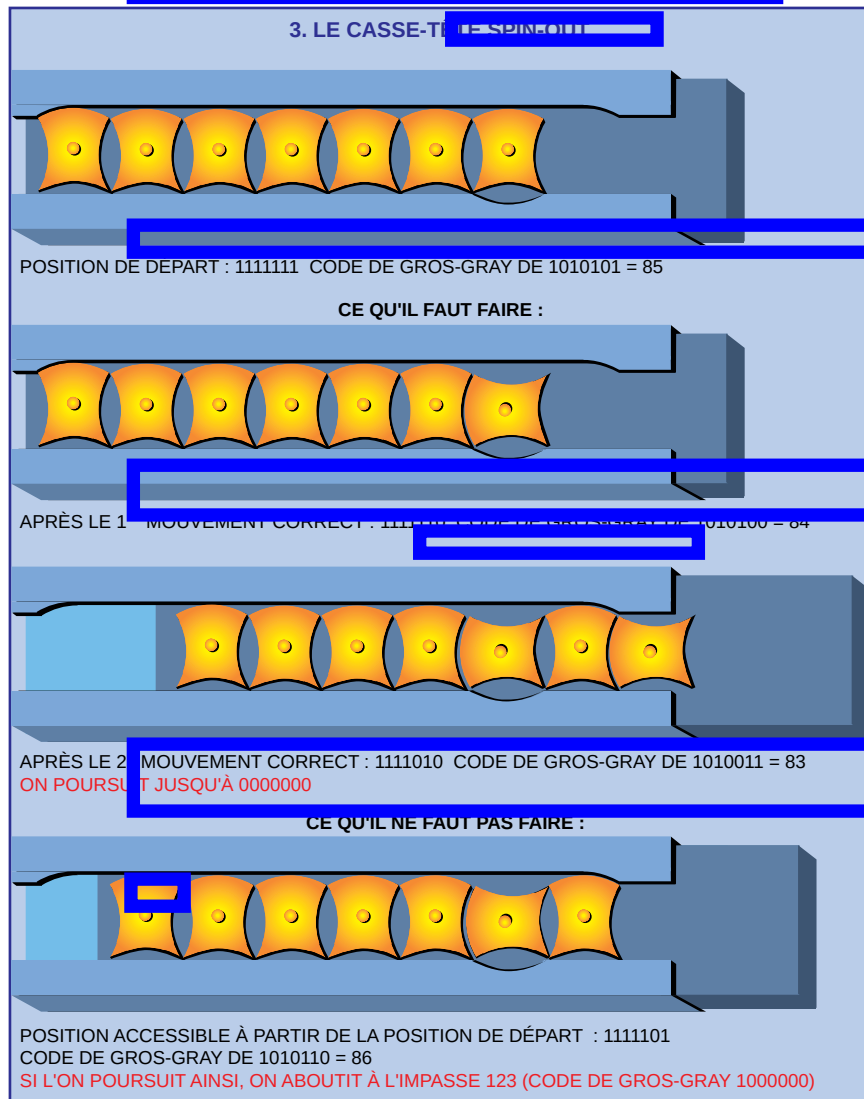
Exemple. L'entier 14 s'écrit 1110 en notation binaire (car $14 = 8 + 4 + 2$), ce qui en dérivant donne le code de Gros-Gray de 14 : 1001 (le deuxième chiffre est un «0», car le premier et le second chiffre de l'écriture binaire de 14 sont égaux ; le quatrième chiffre est un «1», car le troisième et le quatrième chiffre de l'écriture binaire de 14 sont différents.)

Cette méthode de calcul est très utile au voyageur de commerce qui, ne sachant pas où il est, mais se souvenant du nombre n de points qu'il a visités, se demande où il doit aller. Il écrit n en base 2, le dérive et sait alors où il est et donc où il doit se rendre.

La règle de passage du code de Gros-Gray à la notation binaire utilise bien sûr le procédé inverse de la dérivation : l'intégration. La notation binaire b de l'entier n s'obtient en intégrant le code de Gros-Gray g de l'entier n , ce qui précisément signifie que le chiffre numéro i de b en comptant à partir de la gauche est la somme, modulo 2, des chiffres de g jusqu'au chiffre numéro i .

Exemple. $g = 101100$ est le code de Gros-Gray de $b = 110111$, qui est l'écriture binaire de $32 + 16 + 4 + 2 + 1 = 55$ (le quatrième chiffre de b est un «1», car

3. LE CASSE-TÊTE



les quatre premiers chiffres de g sont 1011, dont la somme est 3, ou 1 modulo 2).

AUX LABORATOIRES BELL

Cette dernière caractérisation est appréciée du voyageur de commerce qui ne se souvient plus combien de points il a visités, et, plus important, va être la clef de l'analyse du nouveau casse-tête appelé *Spin-out*, inventé par William Keister autrefois ingénieur des Laboratoires Bell et aussi ancien collègue de Frank Gray.

Ce casse-tête (voir la figure 3) se présente sous la forme d'une règle avec une partie coulissante qu'il faut faire sortir ce que des boutons pivotants semblent empêcher car ils se bloquent les uns les autres et coïncident le casse-tête.

Au départ, tous les boutons sont verticaux et l'on comprend qu'il faudrait les placer tous à l'horizontale pour sortir la partie coulissante. Le bouton le plus à droite peut toujours être tourné (lorsqu'on pousse la partie coulissante centrale le plus à gauche possible). Un peu d'attention montre que le bouton juste à gauche du bouton en position verticale le plus à droite peut lui aussi pivoter (lorsqu'on pousse la partie coulissante centrale le plus à droite possible) et qu'en fait c'est le seul qui puisse aussi l'être (en plus de celui le plus à droite).

Ces remarques étant faites, le casse-tête est résolu ! En effet, en notant «1» les boutons verticaux et «0» les boutons horizontaux, nous venons de retrouver la première caractérisation de la suite des codes de Gros-Gray : un seul chiffre peut varier à la fois, et c'est soit le dernier, soit celui à gauche du «1» le plus à droite.

Les positions du casse-tête donc sont celles (avec la notation proposée) que le voyageur de commerce doit emprunter sur son parcours. Le casse-tête est ainsi conçu pour qu'on ne puisse pas faire autre chose que se déplacer sur le trajet optimal du voyageur de commerce multidimensionnel. Concrètement, que faut-il faire et combien de mouvements allons-nous devoir effectuer avant de sortir la partie coulissante du casse-tête ?

Ce que nous savons du code de Gros-Gray donne la réponse. Au départ, nous sommes en position 111111 dont le numéro en binaire est (par intégration) 1010101, c'est-à-dire $64 + 16 + 4 + 1 = 85$. Notre trajet, si nous nous y prenons au

mieux, comportera donc 85 mouvements qui consisteront à passer au code de Gros-Gray 84 (84 s'écrit 1010100 en binaire et, par dérivation, a donc pour code de Gros-Gray : 1111110) puis 83 (qui a pour code de Gros-Gray 1111010), etc. Nous savons donc exactement ce qui nous reste à faire et le temps qu'il nous faudra. L'erreur à ne pas commettre serait de passer à la configuration 86 (dont le code de Gros-Gray est 11111101) et de poursuivre vers 87, ce qui nous conduirait après 36 autres mouvements à la configuration 123 (1000000), qui est une impasse.

C'est d'ailleurs la seule erreur possible pour quelqu'un de systématique qui applique la règle «déplacer alternativement le dernier bouton et le seul autre qui peut l'être». Cette méthode, que certaines personnes observant empiriquement permet de résoudre le casse-tête sans rien comprendre à ce qu'on fait, avec une probabilité de 50 pour cent (puisque l'on risque de partir dans la mauvaise direction). En voulant rendre le parcours

long, le concepteur du casse-tête l'a rendu assez facile, car il a dû limiter les possibilités de choix à chaque étape. Considéré de manière abstraite, le casse-tête ne propose qu'un déplacement le long d'une ligne - le trajet du voyageur de commerce - dont l'une des extrémités est une impasse et l'autre la solution.

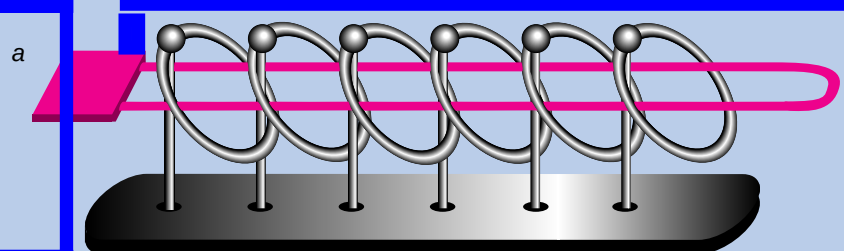
Des variantes sont faciles à imaginer, que vous pourrez vous amuser à réaliser en bois ou en carton. Voici comment obtenir certaines de ces variantes : déplacez l'encoche du bas de la règle d'une ou plusieurs largeurs de bouton, ou bien (dans le but de multiplier les choix à chaque étape) faites plusieurs encoches. Un lecteur saura-t-il faire l'analyse mathématique de ces variantes ?

LE BAGUENAUDIER, AUSSI MEILLEUR QUE LE MONDE

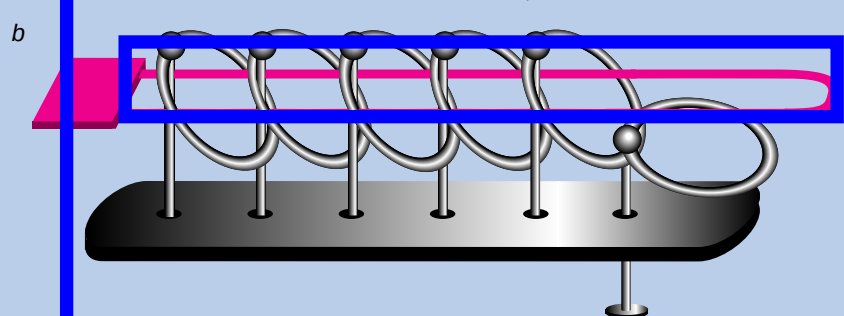
Les connaisseurs de casse-tête mathématiques auront soupçonné une analogie entre le *Spin-out* de Keister et le très ancien baguenaudier (voir la figure 4)

4. LE BAGUENAUDIER

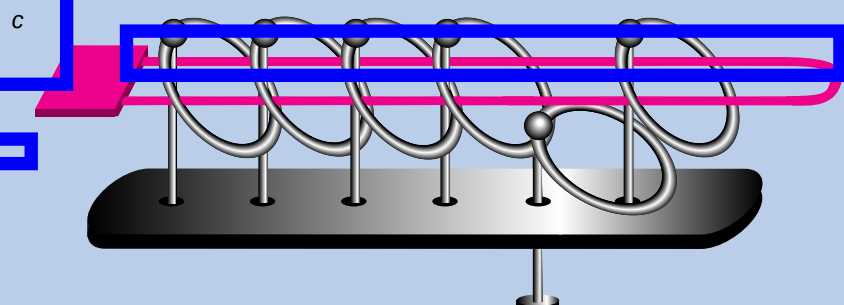
LES DEUX MOUVEMENTS (b) ET (c) POSSIBLES D'UN BAGUENAUDIER À 6 ANNEAUX À PARTIR DE LA POSITION DE DÉPART (a).



POSITION DE DÉPART : 111111 EN CODE DE GROS-GRAY, 101010 = 42 EN CODE BINAIRE



POSITION CORRESPONDANT À : 111110 EN CODE DE GROS-GRAY, 101011 = 43
EN CODE BINAIRE : ON EST PARTI DANS LA MAUVAISE DIRECTION.



POSITION CORRESPONDANT À : 111101 EN CODE DE GROS-GRAY, 101001 = 41
EN CODE BINAIRE : IL FAUT CONTINUER PAR LÀ JUSQU'À 000000

aussi appelé *meleda puzzle*, Talamodspel, ou anneaux chinois. Une légende en attribue l'invention au soldat Hung Ming (181-234), qui en aurait confié la résolution à son épouse pour l'occuper pendant qu'il était parti faire la guerre. La première mention du baguenaudier est faite au milieu du xiv^e siècle sous la plume du mathématicien Jérôme Cardan (1501-1576, plus connu pour sa méthode de résolution des équations du troisième degré et pour son invention des cardans), qui décrit le baguenaudier dans son *De subtilitate libri XXI* paru à Nuremberg en 1550, où il précise : «Cela de soi est inutile ; toutefois on peut le transférer aux serrures artificieuses de coffres.»

Effectivement, en Norvège, des sacs de voyage ont été équipés d'une fermeture utilisant le baguenaudier : on peut craindre que ces serrures ne se soient révélées agaçantes, par exemple lorsque leur propriétaire, pris d'une soudaine envie d'éternuer, désirait y saisir un mouchoir.

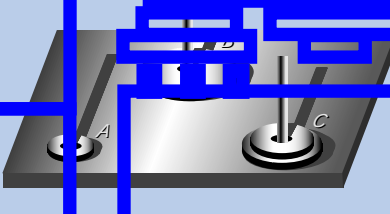
Pour résoudre le baguenaudier, l'analyse proposée pour le *Spin-out* s'applique presque mot à mot. On constate d'abord que le dernier anneau peut toujours être abaissé ou levé et que le seul autre anneau qui accepte de se déplacer est celui qui précède l'anneau levé le plus à droite (et cela à condition d'avoir tiré la double tringle centrale le plus à gauche possible). Cela suggère d'encoder la position du baguenaudier, en associant un «1» à tout anneau levé et un «0» à tout anneau baissé. La position de départ dans le cas d'un baguenaudier à 7 anneaux est donc 1111111, qui est le code de Gros-Gray de l'entier qui, en binaire, s'écrit 1010101, qui est 85. La suite est la même que pour le *Spin-out* : à condition de partir dans la bonne direction, vous aboutirez en 85 étapes, et aucune méthode ne peut raccourcir les manipulations nécessaires à la libération de la double tringle centrale. Si vous partez dans la mauvaise direction, vous aboutirez à une impasse correspondant à la position 1000000, qui est le code de Gros-Gray de l'entier 123, et vous serez alors obligé de repartir en arrière.

Notons deux avantages du *Spin-out* sur le baguenaudier : la commodité des manipulations et la facilité à en imaginer des variantes. Même les casse-tête millénaires sont perfectibles !

Une fois parti dans la bonne direction, la seule règle à appliquer est : «déplacer alternativement l'anneau le plus à droite et l'anneau mobile le plus à gauche (qu'on identifie en tirant au maximum la double tringle centrale)».

L'anneau que l'on déplace, d'après ce que nous avons dit concernant le

5. LES TOURS DE HANOÏ



SOLUTION OPTIMALE EN 15 MOUVEMENTS DANS LE CAS DE QUATRE DISQUES

POSITION DES DISQUES	DÉPLACEMENTS À FAIRE	DISQUES DÉPLACÉS
[4321, , ,]	AB	1
[432, 1, ,]	AC	2
[43, 1, 1,]	BC	1
[43, , 21,]	AB	3
[4, , , 21]	CA	1
[4, 1, , 2]	CB	2
[4, 1, 2,]	AB	1
[4, , 21,]	AC	4
[, , 21,]	BC	1
[, 2, , 1]	BA	2
[, 2, , 1]	CA	1
[, 21, ,]	BC	3
[, 21, , 3]	AB	1
[, 2, , 3]	AC	2
[, 1, 32,]	BC	1
[, , 321]		

5. Dans cette solution, on reconnaît la suite copie-augmentée, déjà rencontrée dans le voyageur de commerce à n dimensions. Récemment, on a prouvé que la suite des déplacements ne se répète jamais deux fois consécutivement (quel que soit le nombre de disques envisagé). La règle «déplacer alternativement le disque le plus petit (de A vers B, de B vers C, de C vers A), puis un autre disque, suffit pour trouver la solution optimale qui, dans le cas de n disques, est une succession de $2^n - 1$ déplacements.

code de Gros-Gray, a pour numéro (en numérotant de droite à gauche) l'entier correspondant de la suite de la copie-augmentée 1213121412131215... qu'on parcourt à l'envers à partir de son 85^e élément.

DES ANNEAUX CHINOIS AUX TOURS DE HANOÏ

Cette suite donne d'ailleurs une solution à un autre casse-tête célèbre et ancien : les tours de Hanoï. Il s'agit de déplacer une pile de disques de taille décroissante en n'utilisant que trois emplacements A, B et C (formant un triangle équilatéral) et en s'imposant à chaque étape de ne jamais poser un disque que sur un disque plus grand. La solution optimale, qui demande $2^n - 1$ étapes, consiste à déplacer alternativement le disque de taille 1 (le plus petit) dans le sens des aiguilles d'une montre, puis celui de taille 2 (le second en taille), puis le premier (dans le sens des aiguilles d'une montre), puis le troisième, etc.,

en suivant le schéma indiqué par la suite copie-augmentée 12131214.

Ceux qui trouvent que la suite de la copie-augmentée est trop compliquée peuvent retenir la solution suivante, encore plus courte et plus simple (analogue à celles énoncées plus haut pour le *Spin-out* et le baguenaudier) : «déplacer alternativement le disque le plus petit dans le sens des aiguilles d'une montre, puis le seul disque disponible après les règles».

Un résultat récent dû aux mathématiciens J.-P. Allouche, D. Astoorian, Randall et J. Shallit indique une propriété remarquable de la suite des mouvements décrivant la solution optimale que nous avons dit qu'elle était constituée de $2^n - 1$ déplacements. Il y a six mouvements possibles à chaque étape : prendre le disque en A et le mettre en B, prendre le disque en B et le mettre en C, etc. qu'on désigne par AB, BC, CA, BA, CB, AC. Dans le cas de quatre disques, la solution optimale consiste en la suite de déplacements AB AC BC AB CA CB AB AC BC BA CA BC AB AC BC. Les quatre mathématiciens ont prouvé qu'aussi grand que soit le nombre de disques considérés, les

déplacements décrivant la solution optimale ne se répètent jamais deux fois consécutivement. On n'a jamais épuisé le pouvoir d'inspiration des bons casse-tête mathématiques !

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

J.-P. ALLOUCHE, D. ASTOORIAN, J. RANDALL et J. SHALLIT, *Morphisms, Squa-free Strings, and the Tower of Hanoi Puzzle*, in *The American Mathematical Monthly*, p. 651-658, 1994.

A. DEBEDIQ, *Mathématiques buissonnières*, éditions CEDIC, 1975.

P. van DELFT et J. BOTERMANS, *Creative Puzzles of the World*, Key Curriculum Press. Trad. française : *Mille casse-tête du monde entier*, éditions du Chêne, 1977.

A. DEBEDIQ, *Le Yin et le Yang, récursivité et itération, les Tours de Hanoï et le Baguenaudier*, in *Récréations informatiques, Pour La Science*, février 1985.

E. LUCAS, *Récréations mathématiques*, tome 1, Paris 1891. Réédition Librairie Scientifique Blanchard, 1992.

Ian STEWART, *Four Encounters with the Sierpinski's Gasket*, in *The Mathematical Intelligencer*, vol. 17, n° 1, pp. 52-64, 1995.

pour vous appeler où vous en êtes. Pour commencer, placez un crayon sur la case 1 et l'autre sur la case 7 (l'indexation des cases ne suit pas l'ordre des entiers ; c'est voulu). Votre objectif est de réaliser une suite de mouvements telle qu'un des crayons au moins arrive dans la case marquée BUT. Pour effectuer un mouvement, choisissez un des crayons, puis suivez les instructions de la case qu'il pointe. Voilà tout. Il n'y a pas d'autre choix à faire, sauf si vous suivez les instructions de la case 55.

Par exemple, si votre premier choix est de pointer la case 7 avec un des crayons, la réponse à la question de la case («L'autre crayon pointe-t-il une case dont le numéro est impair?») est manifestement «OUI». Vous devrez donc faire suivre au crayon de la case 7 le chemin marqué OUI, qui le déplace jusqu'à la case 26.

Facile? Pas tellement. Supposez que vous choisissiez à présent le crayon pointant la case 26 : «Si vous aviez choisi l'autre crayon, seriez-vous sorti par la voie marquée NON?» Hmm. L'autre crayon était (et est encore) dans la case 1. Si c'est lui que vous aviez choisi, la question pour ce crayon eût alors été : «L'autre

CONSEILS

Si vous avez essayé tout ce qui précède et si vous n'arrivez pas à sortir, voici quelques suggestions.

- Pour atteindre la case BUT, vous devez d'abord atteindre (50, 50) avec la règle 60 non activée. Les autres stratégies pour sortir ne peuvent finalement pas être réalisées.
- Pour atteindre (50, 50), vous devez d'abord arriver en (35, 35). Vous êtes alors à 18 pas de BUT.
- Pour atteindre (35, 35), il vous faut aller en (61, 75), puis déplacer le crayon vers la case 61. Alors les deux crayons peuvent atteindre tous les deux la case 1, de laquelle il est facile d'atteindre la position (35, 35).
- Il y a de nombreuses manières d'aller au départ (1, 7) à (61, 75) ; chacune d'elles requiert d'activer la règle 60, puis de l'annuler à la case 65.

SOLUTION

Dans chaque paire ci-après, le nombre écrit en rouge désigne le crayon que vous devez choisir de déplacer. L'astérisque indique que la règle 60 est activée.

(1, 7), (1, 26), (2, 26), (15, 26), (26, 40), (26, 60), (55, 60), (25, 55)*, (7, 55)*, (26, 55)*, (55, 61)*, (15, 61)*, (40, 61)*, (61, 65)*, (61, 75), (1, 1), (1, 9), (1, 35), (9, 35), (35, 35), (35, 40), (35, 60), (25, 35)*, (7, 35)*, (26, 35)*, (35, 61)*, (1, 35)*, (9, 35)*, (2, 35)*, (15, 35)*, (5, 35)*, (5, 40)*, (25, 40)*, (25, 65)*, (25, 75), (50, 75), (50, 50), BUT.

crayon pointe-t-il une case comportant un texte en rouge ou en vert?» La case 7 contient un texte en rouge, et la question a donc pour réponse «OUI». Le crayon aurait donc emprunté la sortie OUI, et la réponse à la question est donc NON. Ainsi le crayon pointant la case 26 prendra l'issue NON, qui mène à la case 55.

Fichtre

La plupart des cases posent des questions, et votre chemin de sortie dépend de la réponse. Certaines, cependant, opèrent différemment. La case 61 vous demande de déplacer les deux crayons, et ce n'est qu'une fois ces deux mouvements achevés que le coup est joué. La case 55 a une sortie marquée IMPROBABLE à la place de l'habituel NON. Et cela fait une différence, par exemple si votre autre crayon pointe la case 26.

Les cases véritablement influentes sont les cases 60 et 65. La case 60 change les règles en éliminant les cases contenant un texte en rouge et en les remplaçant par la règle : «Sortez de cette case par la voie marquée "OUI"», que j'appellerai la règle 60. La case 65 brise la règle 60. Il est possible d'avoir un crayon pointant la case 60 et l'autre la case 65. Dans ce cas, chaque case demande d'ignorer l'autre, mais cela n'introduit pas de problèmes au préférentiel, car vous devez choisir à laquelle vous obéissez : vous n'obéissez pas aux deux à la fois.

Certaines instructions peuvent apparaître ambiguës. Ainsi la case 5 demande si l'autre crayon pointe un texte comportant le mot rouge ou le mot vert. Si l'autre crayon pointe la case 1, bien entendu, la réponse est OUI, mais qu'en est-il s'il pointe la case 5, qui cite les mots «rouge» et «vert» entre guillemets ? L'interprétation de R. Abbott est qu'il faut ignorer les guille-

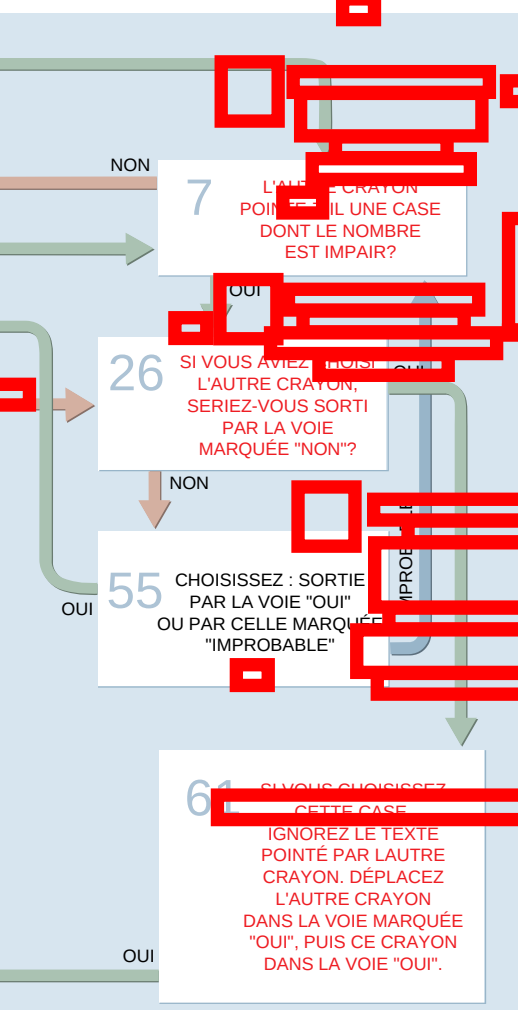
mets et que la réponse est donc OUI. De même, la case 50 demande si l'autre crayon pointe un texte faisant référence à des vaches. Le mot «vaches», cependant, n'apparaît dans aucune autre case. Bien entendu, les deux crayons peuvent pointer la case 50, autorisant alors la sortie vers BUT, à moins que vous estimiez que la case 50 ne fait pas vraiment référence à des vaches ! Un conseil : évitez cette sorte d'argument métaphysique ou vous ne sortirez jamais du labyrinthe.

Peut-être êtes-vous certain à présent que l'unique manière d'atteindre la case BUT est d'avoir les deux crayons pointés sur la case 50. Ce serait vrai, n'était la case 60. Si vous pouvez conduire un crayon en 50 alors que la règle 60 s'applique, alors qu'importe où est l'autre crayon. Vous êtes sorti. En fait, il y a une autre manière d'atteindre le BUT. La voyez-vous ?

La plus étrange situation qui puisse se présenter est le cas où les deux crayons pointent la case 26. Il n'y a pas de réponse claire à la question. Que faire alors ? R. Abbott a si astucieusement construit son labyrinthe que les deux crayons ne peuvent pointer la case 26 que lorsque la règle 60 s'applique, auquel cas le texte de la case 26 doit être ignoré ! Il en va de même si les deux crayons pointent la case 61.

Il ne vous reste plus qu'à tenter votre chance, sans aide supplémentaire. Si vous ne voulez pas vous en tenir à la simple ténacité, vous avez plusieurs stratégies. L'une est de regarder les caractéristiques clés du labyrinthe. Ainsi, pour atteindre la case BUT, il vous faut avoir un crayon en 50 et être en situation telle que l'issue correcte soit OUI. Une autre astuce est de remonter les coups à partir d'une position souhaitée.

À vous de jouer !



Les étiquettes contre le vol

Chaque année, en France, les pertes résultant du vol à l'étalage s'élèvent à plusieurs milliards de francs (deux pour cent du chiffre d'affaires des distributeurs). Imaginées par un commerçant ulcéré de n'avoir pas pu rattraper son voleur, les étiquettes antivols sont aujourd'hui attachées à de nombreux produits vendus en magasin, des livres, des vêtements, des produits alimentaires...

Les dispositifs antivol sont constitués par des étiquettes et par un système comportant un émetteur et un récepteur reliés à une alarme, disposés dans une zone de détection à l'entrée du magasin. Dans la plupart des systèmes encore utilisés, l'étiquette contient une diode semi-conductrice qui module le signal micro-onde produit par l'émetteur. Lorsque le récepteur détecte un signal modifié, il déclenche une alarme. Malheureusement, ces systèmes échouent si les malfaiteurs placent les marchandises volées dans du papier d'aluminium. Par ailleurs, l'alarme peut être déclenchée involontairement par des clients qui transportent des appareils électroniques contenant des diodes semblables à celles des étiquettes.

Pour pallier ces difficultés, une nouvelle génération d'étiquettes, fondée sur des principes «magnéto-acoustiques», a été conçue. Ces étiquettes fonctionnent dans une plage étroite de fréquences radio de manière à minimiser les interférences provenant d'autres appareils électroniques. L'étiquette contient un résonateur fait d'un métal magnétique amorphe de taille définie. Ce métal est excité par les ondes radio de basses fréquences émises à l'entrée du magasin. Le résonateur vibre alors à la même fréquence et le récepteur qui détecte le signal du résonateur déclenche l'alarme.

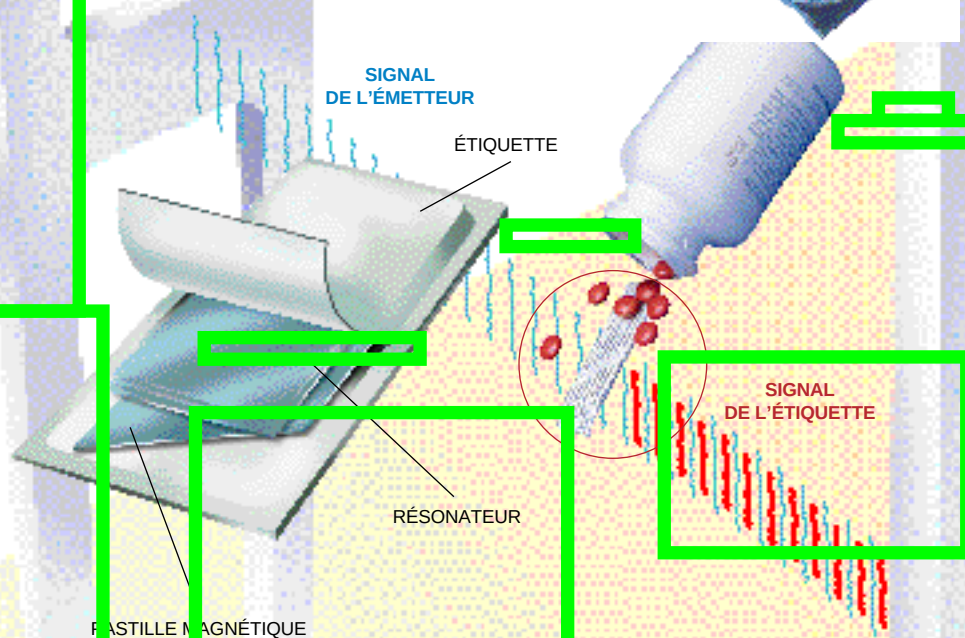
Similaire aux ondes radio de basses fréquences utilisées par l'armée pour les communications sous-marine, le champ électromagnétique de l'émetteur peut traverser des feuilles d'aluminium qui cachent d'éventuels objets étiquetés. Cependant, l'étiquette peut toujours être mise hors d'état de fonctionner si

DES PRODUITS VARIÉS peuvent contenir des étiquettes antivol (sercles rouges) qui auront été cousues au tissu, fixées à l'emballage ou placées dans le contenu.



1. LES ANTENNES qui protègent les entrées des magasins contiennent un appareil qui émet des ondes radio à la fréquence de 58 kilohertz (en bleu).

2. LE RÉSONATEUR situé à l'intérieur du produit qui passe près d'une antenne vibre à la même fréquence que celle émise.



4. UNE PASTILLE MAGNÉTIQUE placée à côté du résonateur assure que ce dernier oscille précisément à 58 kilohertz. À la caisse, un appareil rend l'étiquette inopérante en démagnétisant la pastille ou en altérant ses propriétés magnétiques. Ainsi, le résonateur ne vibre plus ou vibre à une fréquence différente.

3. LE RÉCEPTEUR détecte les trains d'onde séparés de 11 millisecondes. Si, entre chaque train, il détecte au moins quatre fois les signaux rouges émis par l'étiquette, l'alarme se déclenche.

elle est tordue ou enlevée par le malfaiteur. Pour cette raison, les commerçants mettent les étiquettes à l'intérieur du produit lui-même, de sorte que l'on ne peut l'ôter sans abîmer le produit. À la caisse, l'étiquette est désactivée.

Les étiquettes antivols peuvent avoir d'autres applications. Certains produits contiendront bientôt des puces électroniques sur lesquels on lira et on enre-

gistre à l'aide d'ondes radio des informations concernant la date et le lieu de l'achat. La prochaine fois que vous achèterez une paire de tennis, le reçu pourrait se trouver à l'intérieur.

Joseph RYAN est vice-président de la Société **Sensormatic Electronics**.

La bosse des maths

Stanislas Dehaene. Éditions Odile Jacob, 1997.

F redonnons un air : «Malbrough s'en va-t-en guerre», ou le «Taratata» de la Cinquième Symphonie de Beethoven. Combien y a-t-il de notes dans ces fragments ? Huit à dix dans le premier, quatre ou cinq dans le second. Est-on tenté de répondre si on ne les compte pas explicitement. L'estimation «à vue de nez» est imprécise à partir de quatre. Autre expérience : un ami trace un repère à la craie sur un chemin, à dix ou douze mètres de vous, puis vous invite à vous y rendre, les yeux bandés. En général, vous vous arrêtez à hauteur du repère, avec une erreur inférieure au demi-pied. À combien de pas se trouvait le repère et combien de pas avez-vous fait ? Vous voilà incapable de le dire.

En somme, il existe un centre, dans un coin du cerveau, qui programme les mouvements de la marche, évalue la distance, calcule exactement le nombre de pas à faire, mais les éléments de son calcul ne passent pas à la conscience. Nous savons «moins bien que nos pieds» le nombre de pas à faire. Les animaux, aussi, savent compter avec leurs pieds. L'araignée possède, près des articulations des pattes, un organe sensible aux déformations mécaniques. Quand elle part en excursion, elle avance d'un pas régulier, et cet organe lui enseigne sur le nombre de pas accomplis et sur la distance à parcourir pour retrouver son logis.

Maladroits dans le chiffage approximatif, aurions-nous néanmoins quelque talent pour naviguer dans l'espace des nombres purs et y accomplir de l'arithmétique mentale ? Dans son livre passionnant, Stanislas Dehaene entreprend de nous le démontrer : il y défend avec force l'idée que la représentation des nombres dans le cerveau humain est des plus floues, et qu'ils y seraient traités comme des grandeurs analogiques.

Sa proposition s'appuie en premier lieu sur une expérience publiée en 1967 par R.S. Moyer et T.K. Landauer, qu'il a lui-même complétée : la «pesée des nombres». Dans cette expérience, on demande à un sujet de désigner rapidement le plus grand de deux chiffres compris entre 0 et 9. Intuitivement on s'attend à ce que «4 plus grand que 3» ait le même caractère d'évidence

que «7 plus grand que 2», et que le temps de réaction soit égal pour toutes les comparaisons. Or plus les chiffres sont proches, plus les sujets répondent lentement et plus ils commettent d'erreurs. D'où l'idée que les nombres seraient comparés par un processus analogique, une sorte de pesée. S. Dehaene préfère une métaphore visuelle : les nombres seraient gravés sur une sorte de ligne neuronale. Comparer deux nombres reviendrait à comparer des distances à l'origine, sur cette ligne.

Toutefois, insiste-t-il, nous avons une appréhension immédiate et exacte des petits chiffres, entre 1 et 4. Expériences à l'appui, il propose que, «dès l'âge de six mois, le bébé est en possession d'un compteur arithmétique rudimentaire, capable de reconnaître les petits nombres et de les combiner en additions et soustractions élémentaires». Pour lui, l'enfant dispose d'une représentation numérique abstraite et, face à un petit nombre de stimuli, il «perçoit immédiatement un nombre plutôt qu'une configuration sonore ou une disposition géométrique des objets».

Le second point d'appui de S. Dehaene est tiré des observations cliniques qu'il a faites, avec Laurent Cohen sur des patients qui, à la suite de lésions dans des aires précises du cerveau, présentent de curieuses déficiences dans la manipulation des nombres. Notamment un certain M. Nau ne sait plus combien font deux plus deux : il répond tantôt trois, tantôt quatre, tantôt cinq, mais ne donne jamais de résultat éloigné, tel neuf. Le chapitre consacré à ces études de cas est, pour moi, le plus intéressant du livre, par la richesse des exemples et par l'ahurissante virtuosité avec laquelle l'auteur les interprète en termes de circuits neuronaux reliant des aires du cerveau.

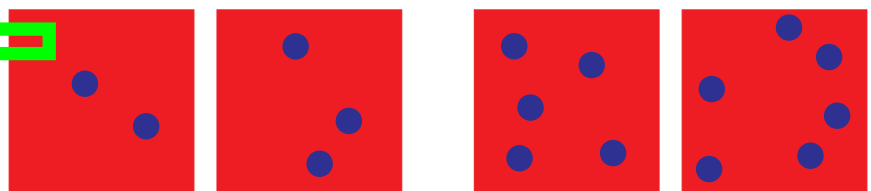
Ce livre est écrit à chaud, sur des questions qui sont loin d'être réglées ; aussi ait-on le droit d'être en désaccord avec l'auteur, sans pour autant méconnaître son mérite. Je dirai donc pourquoi je trouve douteuse l'expérience cruciale de la «pesée des nombres». Je soupçonne que, lorsque deux chiffres sont comparés dans les conditions semi-

hypnotiques des tests psychologiques, leur vue activerait parallèlement deux processus : l'un serait la comparaison arithmétique accomplie par un processeur qualifié, l'autre serait une évocation des valeurs analogiques associées aux chiffres, le second perturbant l'expression du premier. Au lieu de mesurer la compétence arithmétique, on mesurerait le phénomène parasite.

J'ai fait l'expérience de R.S. Moyer et T.K. Landauer, et j'ai constaté que mes erreurs étaient toujours conscientes et qu'elles se produisaient souvent par paliers. C'était comme si, quelque part dans mon cerveau, un centre peu doué pour les chiffres avait pris de vitesse un centre plus compétent et obtenu l'accès prioritaire aux mouvements des doigts. Dès que je commettais une erreur, ma vigilance augmentait, mais vain au coup suivant, mes doigts me faisaient répondre contre mon gré que 2 est plus grand que 9. Comme si le centre qui gère les mouvements des doigts se disait : «puisque Monsieur mes pas d'accord, je ferai juste le contraire de ce que je faisais jusqu'à présent».

Enfin, dans une expérience de contrôle, j'ai comparé directement des étendus sur des surfaces de disques lumineux : là, mes doigts ne me trahissaient pas, et le temps de réaction étaient plus courts. Quand des chiffres étaient inscrits sur les disques et que le grand chiffre était sur le petit disque, les temps de comparaison augmentaient, tout en restant inférieurs à ceux qui étaient mesurés dans la pure comparaison des chiffres. Peut-être que mon processeur arithmétique, incapable de commander aux doigts dans l'épreuve de comparaison de chiffres, réussissait à influencer l'unité chargée de comparer les étendus sur les disques ?

Tout en étant vivement intéressé par le livre, j'ai éprouvé, à sa lecture, un sentiment de malaise grandissant, qui tient à la différence d'état d'esprit entre ma génération de «soixante-huitards» et la génération montante, à laquelle S. Dehaene appartient : nous étions prompts à dénoncer tous les pouvoirs et récusions le droit de cuissage dans les publications scientifiques. Ce qui



On distingue du premier coup la différence entre 2 et 3 (à gauche), mais pas entre 5 et 6 (à droite).

ma donc peiné, c'est que S. Dehaene distribue les critiques et les éloges d'une manière qui coïncide trop étroitement avec les intérêts des réseaux actuels de pouvoir dans la science. Je trouve choquant, par exemple, qu'il qualifie systématiquement de «prestigieuses» des revues médiatiquement puissantes, mais bien connues aussi pour leur peu de fiabilité scientifique. Puisse cette remarque encourager le lecteur à prendre du recul par rapport au texte, mais non le dissuader d'en prendre connaissance.

La bosse des maths est un livre de terrain, écrit par un chercheur à la démarche originale, personnellement engagé dans la construction du savoir contemporain et dont les expériences nous concernent tous. Nous ne sommes pas tenus de le suivre dans ses conclusions, et lui-même a toute une vie pour évoluer, mais ne manquons pas de profiter des riches matériaux qu'il a rassemblés pour nourrir notre réflexion.

Jacques NINIO

Physique

Les atomes existent-ils vraiment ?

Bernard Diu. Éditions Odile Jacob, 1997.

Quelle est l'origine de la régularité macroscopique du monde ? Lorsqu'un système physique isolé évolue, certains attributs macroscopiques mesurables prennent des valeurs infiniment plus probables que d'autres. Cette propriété rend notre monde physique reproductible et prévisible, ce qui est une autre manière de dire qu'un litre d'eau a des propriétés physiques reconnaissables en toutes circonstances.

Si tout ce qui bouge relève de la mécanique, tout ce qui s'échauffe, refroidit et, même, demeure à température fixe est du ressort de la thermodynamique. Rien ne semble trop grand pour elle, pas même l'Univers, ni trop petit, pas même le trou noir.

Née de la nécessité technique d'analyser «la puissance motrice du feu», selon les termes de son fondateur, Sadi Carnot, cette théorie d'une élégance mathématique glacée semble nier son origine pratique et ignée. La thermodynamique, science abstraite des objets macroscopiques, de tous les objets

macroscopiques, est une esthétique du peu. Il est, en effet, vraiment remarquable d'avoir donné le nombre considérable d'atomes qui le constituent, qu'un système de taille macroscopique puisse être décrit par une poignée de paramètres physiques, dont la température et l'obscur entropie, dont le nom fut cisé par Rudolf Clausius en 1865.

L'entropie, classiquement notée par la lettre *S*, est le concept crucial de la physique thermique. La précision et l'utilité de cette notion en font l'une des clefs de la physique en général, et de la cosmologie en particulier : l'idée d'entropie et de son accroissement presque inévitable de fait rend possible une vision évolutionniste du monde et donne aux choses un destin.

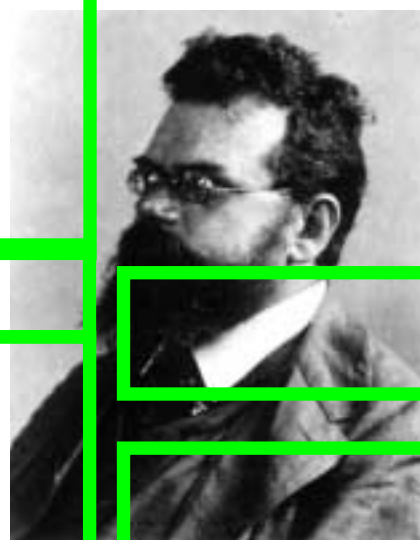
$\Delta S \geq 0$ (pour un système isolé), et le devenir prend possession du monde et des objets !

Cette définition, toutefois, est trop subtile pour donner la moindre intuition de la nature physique de l'entropie et de ce qu'elle mesure. Le concept, finalement, reste comme une simple formule à interpréter. De nombreux textes tentent de lui donner chair en la considérant comme une mesure du «désordre» vers lequel tendraient spontanément les systèmes isolés, alors que rien n'est plus démocratiquement ordonné qu'un gaz en équilibre thermique.

L'interprétation statistique de l'entropie en tant que logarithme du nombre de micro-états quantiques recouvrant un macro-état possible du système ($S = k \ln \Omega$) est, en comparaison, relativement plus concrète et évidente, pourvu que l'on ait défini correctement les notions de micro- et macro-état et, bien sûr, de système. Le logarithme dans la définition de *S* est essentiel si l'on



Rudolf Clausius (1822-1888) introduisit le mot «entropie» en 1865.



Ludwig Boltzmann (1844-1906) fonda la théorie cinétique des gaz et définit l'entropie à partir du nombre de configurations microscopiques correspondant aux états macroscopiques.

veut lier l'entropie et la température d'une manière simple. Ainsi les grandeurs nouvelles, par rapport à une description purement mathématique, purement thermodynamique, ainsi que les lois qui les régissent, sont dégagées du comportement collectif des particules microscopiques dont le mouvement est, en dernier ressort, déterminé par la seule mécanique. Le problème est qu'il n'est pas trivial de montrer, à partir de cette définition, que l'entropie d'un système macroscopique en interaction avec un autre croît inévitablement...

Je ne pouvais imaginer jusqu'alors que l'on puisse exposer sérieusement à une large audience le deuxième principe de la thermodynamique sans susciter de frustration ou de migraine. Enfin un gentilhomme de science parut.

Bernard Diu nous guide d'une main sûre dans le palais ombreux des glaces de l'entropie. Il fait lumière sur les merveilles du raisonnement thermodynamique et du détour d'un couloir, il nous soule un poème, comme pour nous réchauffer. Comment le remercier ?

Mais pourquoi laisser croupir au fond d'une oubliette de bas de page Prigogine le remède, même s'il a construit sa réputation sur une conception inverse de la thermodynamique ? *Les atomes existent-ils vraiment ?* et *La fin des certitudes* ne s'éclairent-ils pas mutuellement ?

Et au chapitre de la pression, pourquoi ne pas mentionner que la pression négative, par le biais de l'équation d'état du vide quantique (pression = - densité d'énergie) joue un rôle déterminant en cosmologie, étant source d'une vertigineuse expansion de l'espace qualifiée d'inflation ?

B. Diu de toute évidence, a voulu cantonner son discours à la théorie dynamique la plus classique et, peut-être, à cette heure, est-il en train de donner un prolongement à cet ouvrage. C'est ce que nous souhaitons le plus ardemment. Une suite, une suite... Tel est la pression extérieure que nous nous plairions à exercer sur le système relativement ilotique que représente l'auteur, comme tous les auteurs...

Michel CASSÉ

Linguistique

L'origine des langues

Merritt Ruhlen. Éditions Belin, 1997.

Le livre *L'origine des langues*, de Merritt Ruhlen, vient d'être traduit en langue française. L'auteur s'est adonné à une tâche intéressante, que la plupart de ses collègues avaient condamnée à l'échec : savoir si les langues du monde descendent toutes d'une seule langue originelle, ou de plusieurs.

Le phénomène d'évolution des langues a suscité l'attention des penseurs dès l'Antiquité. Dans un de ses dialogues, Platon chercha s'il existait une relation entre la signification des mots et leur son. Selon Socrate, les traces de cette équivalence originelle auraient disparu, en raison de la « paresse » des locuteurs, qui ne se préoccupent pas de conserver la prononciation initiale. Aujourd'hui les linguistes ont conclu que le son et la signification sont complètement indépendants, à l'exception d'une poignée d'onomatopées. Dante Alighieri a discuté le cas d'une personne qui reviendrait dans son pays d'origine 1 000 ans après y avoir vécu : elle ne se fait pas en mesure de comprendre ses concitoyens, car 1 000 ans est l'ordre de grandeur du temps après lequel une langue qui évolue différemment dans deux sous-populations se transforme au point que les deux groupes ne se comprennent plus. La rapidité de l'évolution linguistique et l'absence d'écriture il y a 5 000 ans ont fait conclure à certains linguistes que le problème de la langue commune était insoluble.

L'est-il vraiment ? se demande M. Ruhlen. Élève du plus grand taxonomiste de tous les temps, Joseph Greenberg, il est bien au courant des méthodes de son maître, et de la possibilité d'établir des ponts entre les

familles linguistiques existantes, afin de créer ainsi des groupes plus larges que ceux qui sont établis aujourd'hui.

C'est bien ce dont on a besoin pour reconstruire la partie la plus ancienne de l'arbre évolutif des langues. Âgé de plus de 80 ans, J. Greenberg vient encore quotidiennement travailler à la bibliothèque de l'Université Stanford. Il achève la réparation d'un livre sur une nouvelle superfamille «eurasiatique», qui inclut les familles indo-européenne, altaïque, ouralique et d'autres langues du continent asiatique. Il y a dix ans, il publiait un livre sur les langues du continent américain, qu'il a classées en trois familles. La plupart des spécialistes des langues américaines usent de méthodes complètement différentes et ne s'occupent que de deux ou trois langues, ce qui ne les prédispose pas aux grandes visions. Ils ont, vis-à-vis du vieux grand maître venu troubler leur paix avec ses idées nouvelles, un comportement qui ne leur fait pas honneur : «Il faudrait le faire taire.» C'est une répétition de ce qui déjà eut lieu, vers 1960, quand J. Greenberg révolutionna la classification des langues africaines, en distinguant quatre familles. Les linguistes anglais qui avaient proposé une classification beaucoup plus compliquée, tentèrent de le l'abattre... mais, aujourd'hui, elle est acceptée par tous.

C'est J. Greenberg qui a donné le premier exemple de racine universelle, qui se trouve dans presque toutes les familles linguistiques du monde : *tik* signifie surtout «doigt», ou «un», ou recouvre des concepts très proches, tel «main». C'est un pas vers la langue originelle.

Le livre de M. Ruhlen commence par des leçons élémentaires de taxonomie linguistique : il montre comment on peut reconstruire la famille indo-européenne et ses branches, en proposant des exercices plus simples que la résolution de mots croisés élémentaires. Puis il applique cette méthode aux familles américaines et à d'autres familles qui ont donné du fil à retordre aux indo-européanistes : il ne présente qu'un petit nombre de mots, mais on n'oubliera pas que les classifications sont fondées sur un nombre de mots considérable. Pour tout adepte de l'analyse statistique, comme moi, il

y a toujours la tentation d'aller revoir les conclusions : on favoriserait certainement l'acceptation des résultats, mais on ne les modifierait probablement pas beaucoup. La plupart des taxonomies ont été faites sans méthodes statistiques, et sont encore valides. L'analyse statistique de l'ADN a introduit quelques nouveautés importantes pour la classification des êtres vivants,

mais aucune analyse comparable n'est possible en linguistique ; malheureusement, on ne dispose pas d'écritures anciennes en nombre suffisant.

Je me suis amusé à reconstruire les familles dont je connaissais déjà l'existence avec les exercices proposés dans le livre, et j'ai dû reconnaître qu'ils fonctionnent bien, malgré l'usage du corpus réduit de mots qui a été retenu. Je connaissais bien le travail de l'auteur, puisqu'il m'a été utile, il y a plus de dix ans, quand j'ai dû mettre un peu d'ordre dans une liste de quelque 1 800 populations dont on avait étudié la génétique. Avec Paolo Menozzi et Alberto Piazza, nous voulions reconstruire leurs arbres évolutifs : après 14 ans de travail, nous avons publié le livre *Histoire et géographie des gènes humains*, un document publié en 1994 qui pèse 3,4 kilogrammes et dont j'ai extrait un livre intitulé *Gènes, peuples et langues* (éditions Odile Jacob).

Initialement, nous avons utilisé la classification de M. Ruhlen comme un code numérique, mais quand notre travail s'est achevé, nous avons observé qu'elle était plus qu'un guide arbitraire : des correspondances importantes apparaissaient avec l'évolution génétique. M. Ruhlen mentionne ces observations dans son livre : il montre bien comment les chercheurs en viennent à s'émouvoir des synthèses inattendues entre champs qu'on croyait séparés (naturellement, on doit signaler, comme le fait M. Ruhlen, que la correspondance entre les langues et les gènes n'est pas parfaite : les deux changent, parfois rapidement).

La dernière partie du livre de M. Ruhlen est une récolte de 27 mots, notamment *tik*, qui font partie du travail de M. Ruhlen et de M. Bengtson, qui pourraient être très proches de mots de la langue humaine originelle. Ces mots ont une importance particulière dans notre vie, et ils varient moins que les autres. On talien reconnaîtra facilement qu'*aqua* désigne l'eau ; un Anglais retrouvera l'homme (*man*) dans *mano*, et le lait (*milk*) dans *malik'a* ; un Grec verra le chien (*kuon*) dans *kuan*, et, en beaucoup de langues, *puti* sera proche du mot qui désigne la vulve.

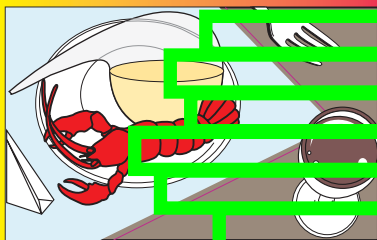
Je suis certain que ce livre donnera un grand plaisir intellectuel au lecteur curieux, sans qu'il ait initialement de notions de linguistique. Depuis une prohibition édictée à Paris au siècle passé, les linguistes évitaient les théories évolutives, mais j'espère qu'ils seront nombreux, en lisant ce livre, à se livrer enfin à ce penchant défendu. Les «néogrammairiens», ceux qui croient qu'il n'existe pas d'exception

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monod-Courat.

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 28 août 1997.

FRANCE

info

aux règles les plus rigides de correspondance des sons, y trouveront des règles inadmissibles, mais un indo-européiste enragé a été assez honnête pour reconnaître, avec J. Greenberg, que, s'il n'existait pas d'exceptions aux lois de la correspondance des sons, la famille indo-européenne, le joyau de la linguistique, n'existerait pas.

Luca CAVALLI-SFORZA

Paléontologie

Opération Adam

Ivan Petrovitch C. Éditions du Cerf, 1997

Un congrès, international forcément, rassemble à Tucson (Arizona) tous les fossiles préhumains et humains récoltés à la surface du Globe, de l'enfant de Taung jusqu'aux australopitèques vieux de quatre à cinq millions d'années. Alors qu'ils ne songent qu'à tapoter et à s'éblouir mutuellement, les gentils scientifiques sont distraits de leurs travaux par des traîtres à la Cause : de méchants créationnistes dérobent les objets mêmes de leurs discours. Heureusement les voleurs sont aussi très stupides, et quelques chapitres suffisent pour faire triompher la Raison. Dans une deuxième partie, on assiste au procès des méchants-stupides, et l'on voit ces empêcheurs d'homíniser en rond condamnés lourdement.

Voici donc un roman paléoanthropologique à petit suspense, mais à nombreux rebondissement, qui veut à la fois populariser l'histoire de l'homme telle que la lisent les paléontologues et combattre les thèses révisionnistes des créationnistes. Il est probable que la forme « roman-photo » eût mieux convenu à ce scénario très ramassé, mais alors à qui attribuer le rôle du pasteur plus que sectaire qui veut jeter australopitèques, cromagnons et autres néandertals aux oubliettes de la science ? Peter Lore n'a pas trouvé de successeur, et la galerie des possibles évêques Cauchon n'est guère fournie. Au demeurant, la présentation que fait l'auteur de la démarche des scientifiques est souvent caricaturale. Elle consiste à opposer deux vérités « révélées », l'une par la Bible (*The Good Book* à Tucson, Arizona, et ailleurs), l'autre par les fossiles.

Est-ce là décrire bien cette construction intellectuelle qui conduit à l'édifi-

cation d'une théorie scientifique, que de la réduire à une somme d'évidences qui tout naturellement, s'emboîtent au fur et à mesure que sont découverts de nouveaux fossiles ? D'autant qu'à l'heure actuelle, si notre passé animal ne fait aucun doute, il n'existe pas de consensus sur la forme qu'il convient de donner à l'arbre phylogénétique des hominidés (voir *Évolution de l'homme*, par Ian Tattersall, *Pour la Science*, juin 1997).

Quant au créationnisme, qu'en dire ? La doctrine interdit que l'on poursuive de feu nourris les ambulances, à plus forte raison lorsque leurs chauffeurs sont aveugles. Alors pourquoi l'auteur fait-il appel dans son roman pour leur faire passer grâce, ce qui est fort à propos, à certaine Mme du Berry, ce qui l'est moins : sous ce pseudonyme, il dissimule un chercheur du CNRS qui, me semble-t-il (il le semble à d'autres que moi aussi), joue d'une certaine façon dans le même camp que les créationnistes, refusant de voir dans l'influence composée et réciproque du hasard, des gènes et de la nécessité de l'environnement les facteurs premiers de l'évolution biologique. Pour elle, il existe ainsi une « horloge interne du vivant » qui expliquerait l'émergence de l'homme et, surtout, celle de sa conscience voici quelques milliers d'années. Par ce biais, elle rejoint tout à fait les créationnistes, qui envisagent que tout fut dit et fait voilà longtemps. Que vient faire ce galimatias métaphysico-scientifique versé par Jean Chaline au dossier de l'accusation dans le procès de Tucson ? Marcherait-il sur ces brisées ? On n'ose l'envisager.

Matthias NEMAUSUS, p.c.c. Jean-Louis HARTENBERGER

Chimie

La chimie supramoléculaire. Concepts et perspectives

Jean-Marie Lehn. Éditions de Boeck, 1997 (174 pages, 165 francs)

Le XIX^e siècle a été, pour les chimistes, le siècle de la découverte des molécules, avec, comme point culminant, les travaux de Louis Pasteur sur la chiralité, cette propriété que possèdent certains objets de ne pas se superposer à leur image dans un miroir. En cette fin de XX^e siècle,

nous venons d'assister à l'étape suivante, tout aussi importante : l'avènement de la chimie supramoléculaire, découverte par Jean-Marie Lehn.

Suivant la définition même de son inventeur, cette chimie est «la chimie au-delà de la molécule», contrôlant et utilisant les liaisons intermoléculaires de faible énergie : liaisons électrostatiques, liaisons hydrogène et liaisons de Van der Waals. On connaissait depuis longtemps la liaison hydrogène, qui lie les molécules d'eau dans un réseau infini ou qui assure le regroupement des deux brins de la double hélice d'ADN. Toutefois, on n'avait pas utilisé ce type de liaison pour construire des assemblages moléculaires. J.-M. Lehn a justement imaginé de tirer parti des forces intermoléculaires directionnelles pour construire des machines «supramoléculaires», destinées à exercer des fonctions précises : reconnaissance, transport ou catalyse.

Reproduisant des fonctions biologiques, il réalise des assemblages programmés, par exemple quand il façonne des doubles hélices inorganiques qui ressemblent à l'ADN. D'ailleurs, la biologie, fondée sur la fonction de reconnaissance, est également régie par la chimie supramoléculaire. À l'heure où la société attend de la biologie moléculaire des remèdes aux maladies virales et de la vieillesse, la chimie supramoléculaire constitue précisément un des éléments essentiels de compréhension des mécanismes biologiques qui permettent de progresser dans cette direction.

J.-M. Lehn s'adresse aussi au chimiste en lui montrant comment devenir ingénieur moléculaire, bâtisseur d'édifices, et comment faire fonctionner l'usine qui orchestre dans un tube à essais. Les brouettes moléculaires transportent les électrons, les protons et les ions de place en place. La lumière est utilisée comme déclencheur de systèmes automatiques d'ouverture et de fermeture des portes. Il s'agit d'une véritable électronique supramoléculaire. Les applications en sont la mise au point de fils conducteurs, d'interrupteurs optiques ou électriques, de capteurs, de dispositifs logiques.

La connaissance et le contrôle de la matière supramoléculaire n'ont bien sûr été possibles que grâce au développement des méthodes physiques modernes, allant de la cristallographie des macromolécules, telles les enzymes, à la microscopie électronique, en passant par la photophysique et toutes les spectroscopies. La chimie supramoléculaire est donc interdisciplinaire et fédérative.

J.-M. Lehn est un artiste. Ses talents de pianiste et d'organiste sont connus. On peut contempler, comme le montre joliment la couverture du livre, la symbiose entre l'art et la création scientifique : chaque molécule est une note de musique, et J.-M. Lehn organise l'ensemble des notes pour construire la partition. Pour le dixième anniversaire de l'attribution de son prix Nobel de chimie, les éditions de Boeck nous offrent, grâce à André Pousse, l'excellente traduction française de son livre magnifiquement écrit, très pédagogique, publié il y a deux ans à peine chez l'éditeur allemand VCH, en anglais. Il s'agit, à présent, du premier texte en français sur la chimie supramoléculaire, que tout chimiste francophone, qu'il soit étudiant, chercheur ou industriel, se doit d'acquiescer. Ce livre passionnera également les biologistes, les physiciens et de nombreux profanes.

Didier ASTRUC

Médecine

Histoire de la contraception

Angus McLaren. Éditions Noesis, 1996.

Histoire naturelle et artificielle de la procréation

Jacques Gonzalez. Éditions Bordas, 1996.

Les médias présentent fréquemment les progrès des techniques biologiques appliquées à l'une des fonctions les plus naturelles de l'espèce humaine : la reproduction. Ces dernières années, ce sont la contraception et la procréation qui ont surtout été évoquées, du fait de la pandémie de SIDA, qui a imposé une promotion de la contraception, et en raison de l'importance que prend l'assistance médicale à la procréation dans les sociétés industrialisées.

La contraception n'est pas une invention nouvelle. L'ouvrage de A. McLaren nous en donne de nombreux exemples, que ce soit en Grèce ancienne ou à l'époque contemporaine. Professeur d'histoire à l'Université de Victoria, l'auteur s'est intéressé, depuis de nombreuses années, à l'histoire sociale de la

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-46-34-21-42
http://www.pourlascience.com

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Alleman, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot. Pascale Thiolliez. **Conseil d'Administration** Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Anne-Marie Bacon, Michel Brunet, Paloma Cabeza-Orcel, Anny Cazenave, Corinne Debaine-Francfort, Paul Decaix, Évelyne Host-Platret, Patrick Michel, Alessandro Morbelli, Claude Olivier, Guy Paulus, Pierre Pfeiffer, M. Saint-Mauvy, Sylvaine Turck-Chièze, Jean-Louis Fischer.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Lautwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemcevic, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : Robert Biewen, Frances Newburg, John Moeling, Anthony Degutis.

PUBLICITÉ France

Chief de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 46 34 09 12.
Téléc : LIBEL N 202978F.

Télécopieur : 01 46 34 10 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Module - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec H2B 2H2 Canada

Suisse : G.M. International, 1027 Lonay

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 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 des marques 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 d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

sexualité et, notamment, aux pratiques du contrôle des naissances. Il se préoccupe plus d'histoire sociologique de la sexualité que d'«histoire historique» ou d'histoire des techniques biomédicales : la contraception, l'avortement et la démographie, qui sont les thèmes centraux de ses investigations historiques, dépassent largement le domaine biomédical, puisque les instances religieuses donnent leur avis sur ces questions et que le politicien doit tenir compte des changements de mentalité en réaction aux progrès de la science ; de surcroît, la sexualité humaine s'exerce dans un cadre juridique, éthique, économique, qui détermine les conceptions de la natalité.

Aussi comprenons-nous que la préface de ce livre sur l'histoire de la contraception soit signée par Pierre Simon, l'un des promoteurs du planning familial. Dans cet objectif historique sociopolitique, le livre de A. McLaren, qui est la traduction de l'édition parue en 1990, n'est pas sans intérêt, se lit facilement, et l'appareil critique non négligeable permet de remonter aux sources originelles.

En complément de cette *Histoire de la contraception*, celle de la procréation serait bienvenue : les hasards de l'édition auraient pu bien faire les choses et, dans ce cas, apporter un complément historique nécessaire, si l'*Histoire naturelle et artificielle de la procréation*, de J. Gonzalès, avait été autre chose qu'une vaste compilation dont la somme des inexactitudes, des erreurs et des mauvaises interprétations gâchent l'intérêt.

Les leçons de Canguilhem et de Jacques Monod semblent bien étrangères à ces auteurs qui se forgent un habit d'historien des sciences de la vie et de la médecine, sous le seul prétexte que, spécialistes d'une discipline scientifique, ils pensent pouvoir en écrire l'histoire en pillant une littérature secondaire dont à l'évidence ils ne savent pas apprécier la valeur réelle. Pourquoi J. Gonzalès ne s'est-il pas contenté d'écrire l'histoire de la procréation de son époque ? C'est aux pages 331 à 385 que l'auteur aurait dû se consacrer, dans la mesure où ce contenu correspond à son vécu de médecin et d'enseignant. Certes, il prévient qu'il n'est pas un «historien patenté». Pourquoi, alors, écrire une histoire de la procréation qui va de l'homme préhistorique à aujourd'hui ? Un historien des sciences de la vie et de la médecine aurait reculé devant pareille tâche (et quel historien des sciences de la vie et de la médecine oserait ouvrir un cabinet médical en inscrivant «médecin non patenté» sur sa

carte de visite pour se faire pardonner des maladrotes qu'il ne manquerait de commettre ?).

On ne peut empêcher des auteurs d'écrire les livres d'histoire des sciences, ni des éditeurs d'éditer des ouvrages dans cette discipline, mais les uns et les autres doivent savoir qu'il existe des professionnels de l'histoire des sciences, et que ceux-ci ont notamment pour tâche d'éviter les lieux communs et la propagation des erreurs.

Aucun d'entre eux, par exemple, n'écrit plus que Lamarck a créé le mot biologiste : on sait depuis 1983 que T.G.A. Rose a été l'inventeur du terme en 1797. Aucun d'entre eux n'affirmerait que les travaux de C.F. Wolff ont été «délibérément négligés» au XVIII^e siècle, et son œuvre «réhabilitée au XIX^e siècle» : en 1961, A. Gaissinovitch a démontré le contraire. Aucun d'entre eux ne dirait qu'à l'époque de Lamarck et d'Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, «on ne prononçait pas encore le mot milieu» : ces auteurs et d'autres l'utilisaient dans le sens qu'on lui donne aujourd'hui en biologie. À propos de Geoffroy Saint-Hilaire, son prénom n'est pas Étienne-Geoffroy, mais Étienne, et son nom est Geoffroy Saint-Hilaire, et non Saint-Hilaire ; dire que Buffon était, au XVIII^e siècle, un «des classificateurs les plus ardents» et «un grand classificateur», c'est peut-être oublier la différence à faire entre la recherche d'un concept d'espèce et la pratique de la nomenclature, et c'est aussi oublier que, pour Buffon, le but de l'histoire naturelle était de décrire et non pas de classer. Mais il est vrai aussi que J. Gonzalès veut nous faire croire que Buffon décrivait les ergots du coq comme des organes copulateurs !

À plusieurs reprises, J. Gonzalès n'hésite pas à évoquer les erreurs commises par les «savants» : De Graaf, Buffon, Harvey... Quand on a le savoir de 1997, on ne comprend pas l'intérêt d'évoquer un concept d'erreur chez des auteurs qui, au XVII^e ou au XVIII^e siècle, débattaient des problèmes du vivant avec leurs connaissances et interprètent leurs découvertes dans les possibles de leur époque.

Abregeons ce jeu de la mauvaise critique, qui n'est ni agréable ni enrichissant, car nous aurions souhaité plus d'efforts de la part d'un auteur qui s'en gage dans un travail qui prouve que l'histoire de la procréation. Car entre les erreurs grossières, qu'il était facile d'éviter, les manques importants et les interprétations erronées, il sera difficile aux lecteurs de faire la part des choses entre le vrai et le faux, le bon et le mauvais.

Jean-Louis FISCHER

analyse de la presse